

Alto Desempenho: O Concreto Armado do Século XXI?

Michel S. Lorrain¹, Mônica Pinto Barbosa², Maurice Arnaud¹ e André Luis Gamino³

¹INSA, Département de Génie Civil
135 Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse, Francia
Tel.: 33 05 61 55 99 20; Fax: 33 05 61 55 99 00
e-mail: michel.lorrain@insa-toulouse.fr; maurice.arnaud@insa-toulouse.fr

²UNESP, Departamento de Engenharia Civil
Alameda Bahia, 550, CEP 15385-000
Ilha Solteira, SP, Brasil
e-mail: mbarbosa@dec.feis.unesp.br

³USP, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações,
Av. Prof. Almeida Prado, 271, CEP 05508-900
São Paulo, SP, Brasil
e-mail: andre.gamino@uol.com.br

Resumen

Este trabalho trata de uma análise do material concreto armado no cenário do século XXI sob o ponto de vista dos materiais constituintes. Primeiramente descreve-se a aproximação teórica do dimensionamento de elementos fletidos com base em notações contidas nas Normas BAEL 91. Posteriormente são apresentados resultados numéricos carga-flecha obtidos para vigas e placas de concreto armado sendo estes validados por intermédio de ensaios experimentais. As modelagens numéricas foram efetuadas no programa CASTEM 2000. Neste programa um modelo elastoplástico de Drucker-Prager define a superfície de ruptura do concreto em plasticidade não associativa. A fissuração é tratada de maneira distribuída sobre os pontos de integração dos elementos finitos com critério de formação a partir da definição da superfície de ruptura no ramo tração-tração do modelo de Rankine. As armaduras foram modeladas de maneira discreta com aderência perfeita. Por fim faz-se uma análise comparativa entre os resultados numéricos obtidos e os critérios de dimensionamento, traçando-se assim criticamente o futuro do concreto armado de alto desempenho neste início de século XXI.

Palavras-chave: *concreto armado, critério de dimensionamento, resistência à compressão do concreto, tensão de escoamento das armaduras.*

HIGH STRENGTH CONCRETE: THE REINFORCED CONCRETE OF THE CENTURY 21ST

Summary

This work is about the 21st century reinforced concrete analysis under the point of view of its constituent materials. First of all it is described the theoretical approach of the bending elements calculated based on the Norms BAEL 91 standarts. After that, numerical load-displacement are presented from reinforced concrete beams and plates validated by experimental data. The numerical modellings has been carried on in the program CASTEM 2000. In this program a elastoplastic model of Drucker-Prager defines the rupture surface of the concrete in non associative plasticity. The crack is smeared on the Gauss points of the finite elements with formation criterion starting from the definition of the rupture surface in the branch traction-traction of the Rankine model. The reinforcements were modeled in a discrete approach with perfect bond. Finally, a comparative analysis is made between the numerical results and calculated criteria showing the future of high performance reinforced concrete in this beginning of 21st century.

Keywords: *reinforced concrete, structural calculate criteria, concrete strength, reinforced yield stress.*

INTRODUÇÃO

O conhecimento atual do concreto armado adquirido ao longo de 150 anos de experiências acumuladas pelo trabalho de empresários audaciosos e de pesquisadores meticolosos cobre a totalidade do domínio científico e técnico, desde o material até a obra, o que se subentende em um bom domínio na troca das escalas microscópica à macroscópica. Podemos até mesmo acrescentar que a passagem do linear para o não linear já foi realizada: o cálculo elastoplástico, assim como os teoremas de análise limite, já figuram dentro das normas de cálculo em vigor. Neste contexto, procurar ainda propor, uma contribuição original, útil e significativa sobre este material quase que perfeito parece ser uma idéia em vão.

Entretanto, se por um lado constata-se a existência de numerosos resultados e de conhecimentos quando se trata de concretos armados convencionais, tais como foram concebidos no início do século XX, os progressos realizados na produção industrial dos concretos e dos aços para armaduras não foram acompanhados até hoje de um desenvolvimento ou expansão correspondente para se conhecer o comportamento dos “novos Concretos”, que poderiam ser armados com “novos aços”. Sabe-se bem que os recursos a uma exploração sem justificativa não deverão constituir uma resposta satisfatória ao domínio do composto concreto em evolução dentro do senso de “alto desempenho”. Este termo reflete um conjunto de propriedades e de qualidades em contínuo desenvolvimento, na medida que surgem novas aspirações e novas técnicas de investigação. Contentar-se-á de evocar aqui, unicamente a primeira qualidade obtida pelo Concreto de Alto Desempenho (C.A.D.): a resistência mecânica. Havia portanto necessidade de pesquisar para começar a constituir, em relação aos concretos armados de alto desempenho, o mesmo patrimônio do saber e do saber fazer que foi acumulado durante 150 anos para os concretos armados que qualificamos de “*concretos convencionais*”, sem dar a este termo qualquer conotação pejorativa. O projeto nacional BHP 2000 lançado em 1995 na França, continha como forte componente o concreto armado. Um grupo de trabalho envolvendo representantes de vários laboratórios de pesquisa e de instituições de renome^{1,2} foi constituído a fim de obter as respostas adequadas.

Os trabalhos sobre aderência do concreto de alto desempenho-aço de alta resistência, as capacidades de ancoragem, as conseqüências dos novos desempenhos sobre o aparecimento das fissurações foram evidentemente realizados em primeiro lugar^{3,4,5}. O comportamento mecânico das vigas e placas foi examinado em seguida, através de estudos experimentais apropriados^{6,7,8,9,10,11}. Esta pesquisa irá abordar o aspecto conceitual do material, e sua aplicação aos primeiros elementos estruturais tendo como objetivo implícito à formulação de recomendações do uso do C.A.D. para calculistas e construtores possibilitando-lhes assim meios de exercer sua arte com satisfação, respeitando as recomendações das normas de cálculo.

APROXIMAÇÃO TEÓRICA DO DIMENSIONAMENTO

Atualmente, o cálculo estrutural de vigas e de placas se apóia praticamente sobre o mesmo conceito. O cálculo das dimensões a serem atribuídas as fôrmas e as armaduras de uma seção do elemento estrutural solicitado em flexão consiste em resolver o problema que se segue expresso através das equações formuladas com as notações em vigor dentro das normas BAEL 91, a saber:

$$\text{Min} [A_s + A_{sc}] \tag{1}$$

Função operante < Função resistente

Onde:

A_s = área de armaduras longitudinais comprimidas

A_{sc} = área de armaduras longitudinais tracionadas (sob flexão)

Esta condição pode ser escrita de maneira mais detalhada, algebricamente, no equilíbrio limite, como se segue:

$$\begin{aligned} N &= N_{bc} + A_s \sigma_s + A_{sc} \sigma_{sc} \\ \{1\}M &= M_{bc} + A_{sc} \sigma_{cs} (d - d') \\ &Min(A_s + A_{sc}) \end{aligned} \quad (2)$$

Onde:

N_{bc} = força normal resistente do concreto; M_{bc} = momento fletor resistente do concreto; σ_s = tensão normal na armadura comprimida; σ_{sc} = tensão normal na armadura tracionada (sob flexão) $(d - d')$ = braço de alavanca.

Convém notar que as tensões que entrevêm nas duas equações acima relacionadas estão condicionadas pelos limites introduzidos à título dos estados limites a considerar. É conveniente acrescentar a essas equações expressas em função das variáveis de tensões, as inevitáveis limitações de deformação do elemento da estrutura, expressas frequentemente sob a forma de um deslocamento limite regulamentado em norma:

$$\{2\} \delta < \delta^* \quad (3)$$

Onde:

δ = deslocamentos calculados; δ^* = deslocamentos limites (Normas).

O sistema {1} visa, a um dado elemento estrutural, determinar as quantidades de armaduras. A condição {2} diz respeito essencialmente a estrutura e dentro de uma menor importância as armaduras.

Uma utilização freqüente, do sistema {1}, conduz ao estado limite regulamentar da resistência dos materiais, de maneira a utilizar a armadura no máximo de sua capacidade, a saber:

$$\sigma_s = \sigma_c = f_e / \gamma \quad (4)$$

Onde:

σ_s = tensão normal nas armaduras; f_e = tensão de escoamento das armaduras; γ = coeficiente de ponderação de resistência.

Isto resulta que os esforços normais parciais $A_s \sigma_s$ e $A_{sc} \sigma_{sc}$ condicionam diretamente as quantidades A_s e A_{sc} das armaduras.

Para uma dada estrutura, uma vez distribuída as solicitações em cada uma das duas componentes, aço e concreto da seção, as equações do tipo:

$$N_s = A_s f_e / \gamma_s \quad (5)$$

Onde:

N_s = componente da força normal resistente pelas armaduras; A_s = área de armaduras; f_e = tensão de escoamento das armaduras; γ_s = coeficiente de ponderação de resistência.

Poderiam conduzir, à medida que a indústria siderúrgica acompanhe, a uma perspectiva atraente de redução da quantidade de armadura proporcionalmente o aumento do limite de elasticidade do aço dos novos aços que poderiam estar disponíveis no mercado.

Ora, este raciocínio que conduz a uma conclusão vantajosa sob o plano econômico, não pode ser tomado como um modo operatório sistemático:

- Porque a otimização de uma seção transversal não deve ser considerada sem ser pesquisado a melhor distribuição de esforços entre aço e concreto, o que exclui de fixar N_s a priori;
- porque σ_s será as vezes limitada e por conseguinte reduzida em relação ao seu valor máximo regulamentar pelas condições tais como a necessidade de se controlar a fissuração;
- porque o cálculo de tensões de uma dada estrutura deixa, a parte a questão da rigidez do elemento estrutural que freqüentemente é determinante em serviço;
- Porque assim o comportamento de uma estrutura, localmente e no seu conjunto, não deve ser do tipo frágil face a uma situação do critica;
- porque enfim todas as teorias se esbarram numa exigência verdadeiramente específica à disciplina que é de culminar sobre uma realização, cujas sugestões de execução são tão numerosas quanto variadas, e que não serão abordadas.

A pesquisa de otimização será, portanto, examinar sobre bases mais amplas, associando “quantidade e qualidade” dos dois materiais, para se obter uma resposta satisfatória em todos os sentidos sobre tensões, deslocamentos, deformações e comportamento estrutural. Ao se explorar a atual potencialidade dos computadores é possível, sem qualquer restrição, que este problema de otimização possa ser tratado através das técnicas de pesquisa operacional. Sem esperar pelos resultados, foram utilizados modelos numéricos de vigas e de placas para explorar, em alguns casos particulares, o campo de dimensionamento em flexão e examinar a natureza da resposta a uma única questão que se coloca no momento:

“Que aço para que concreto”?

ALGUNS RESULTADOS DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.

Para verificar a influência das características mecânicas do aço e do concreto sobre o comportamento de elementos estruturais de concreto armado, foi utilizado e operacionado um modelo numérico apropriado, validado por resultados experimentais¹². Desta maneira, foi possível variar os parâmetros relativos à quantidade e a qualidade dos materiais que constituem o concreto armado dentro dos limites que foram estimados razoáveis. Foram selecionados alguns resultados significativos relacionados a vigas e placas, que são apresentados a seguir, como exemplo.

Modelos Constitutivos

Nas modelagens computacionais efetuadas alguns modelos constitutivos clássicos foram utilizados dentro de uma plataforma computacional denominada CASTEM 2000 desenvolvido pelo “*Département de Mécanique et de Technologie (DMT) du Commissariat Français à l’Energie Atomique (CEA)*”.

Para o concreto fora adotado um modelo oriundo do modelo de integridade física de Ottosen denominado modelo de Drucker-Prager conforme ilustra a Figura 1.

Acoplado a este modelo utilizou-se um critério de fissuração distribuída sobre o elemento quadrático plano adotado nas modelagens com ângulo limite de 90° em que pressupõe-se a utilização do modelo *rotacional* segundo informa a Figura 2.

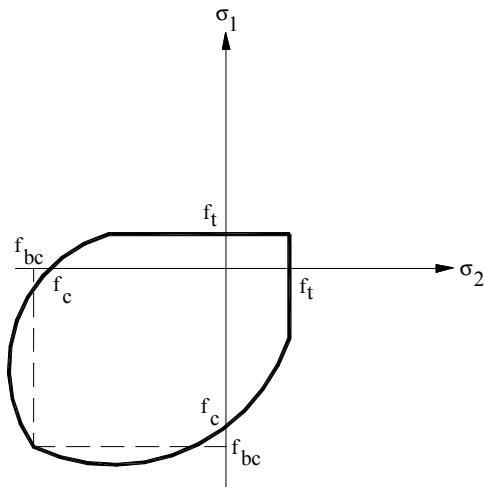


Figura 1. Modelo de integridade física de Drucker-Prager utilizado para o concreto

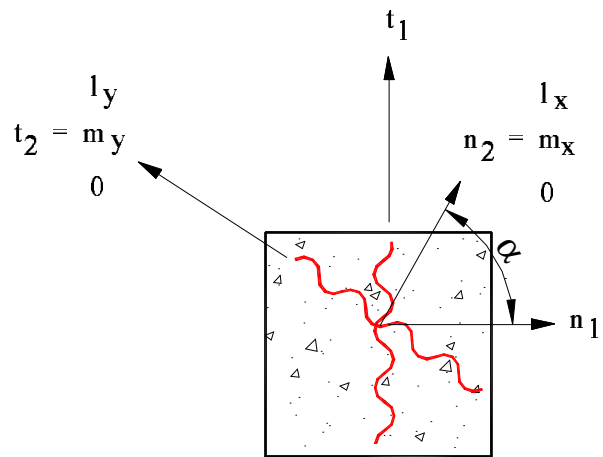


Figura 2. Modelo de fissuração distribuída com ângulo limite fixado em 90°

A matriz constitutiva da fissura para a configuração bidimensional é dada por:

$$D^{cr} = \begin{bmatrix} \frac{\mu}{1-\mu} E & 0 \\ 0 & \frac{\beta}{1-\beta} G \end{bmatrix} \tag{6}$$

Onde:

E = módulo de elasticidade longitudinal; G = módulo de elasticidade transversal; μ = fator de retenção longitudinal; β = fator de retenção ao cisalhamento.

O critério de formação de fissuras segue o disposto no modelo de *Rankine* (Figura 3): haverá fissura se a máxima tensão principal de tração exceder a resistência à tração do material.

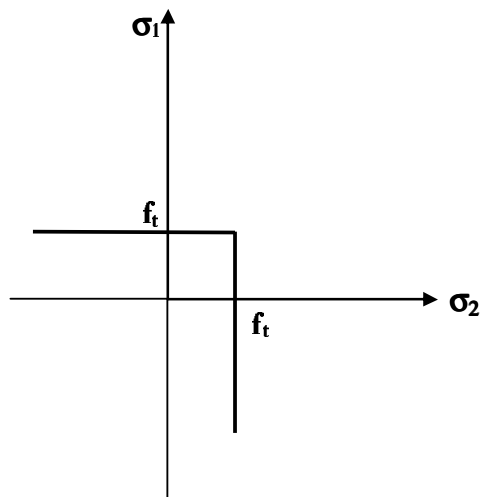


Figura 3. Modelo de Rankine

Para as armaduras utilizou-se o modelo de *Von Mises* cujo funcional pode ser descrito como:

$$F = \lambda \frac{\sqrt{J_2}}{f_y} - 1 = 0; \lambda = \text{constante}$$

Onde:

J_2 = invariante do tensor desviador de tensões

f_y = tensão de escoamento do material

O lançamento das armaduras foi efetuado de maneira discreta, ou seja, sobre os *edges* dos elementos planos de concreto pois o CASTEM não possui ainda uma formulação incorporada para o lançamento e edição de armaduras. Isso por um lado causa uma dependência do posicionamento quanto a malha existente porém diminui a rigidez global da estrutura como resultado das modelagens.

Resultados experimentais das vigas

As vigas aqui apresentadas foram ensaiadas em quatro pontos e possuíam 3,60m de vão, base de 15cm e altura de 28,3cm, com estribos de diâmetro igual a 6mm espaçados em 8cm. As armaduras longitudinais de tração compostas por duas barras de diâmetro 16mm e as armaduras longitudinais de compressão eram formadas por duas barras de diâmetro igual a 6,3mm. As propriedades mecânicas dos materiais utilizados encontram-se dispostas nas Figuras subsequentes. A Figura 4 ilustra um dos ensaios experimentais realizados no Departamento de Génie Civil do INSA de Toulouse- França.

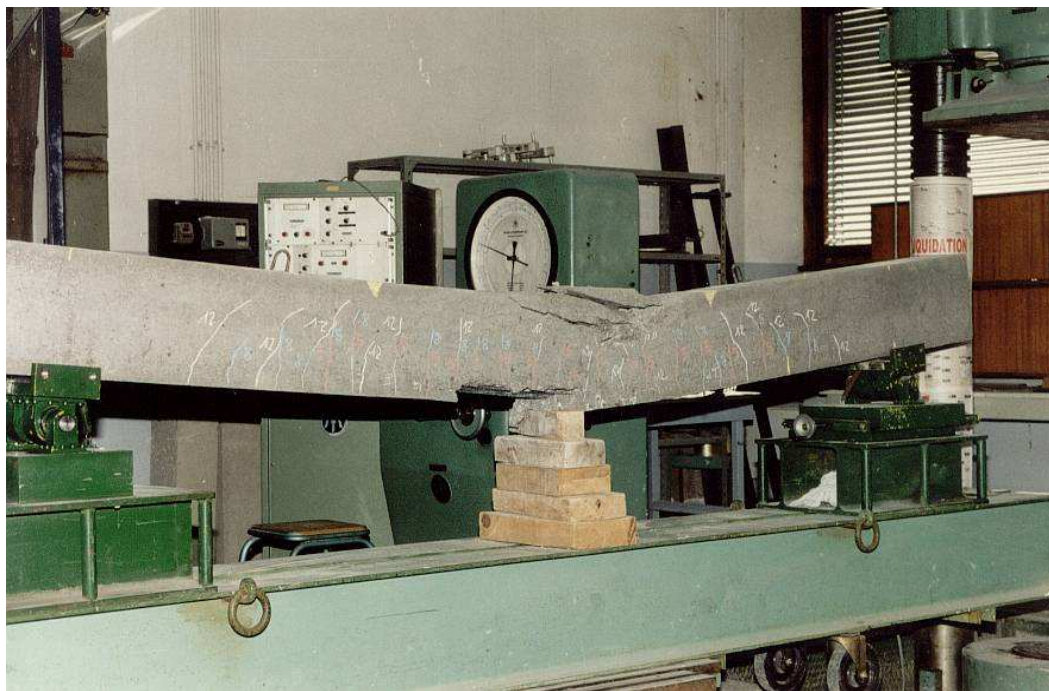


Figura 4. Ensaio experimental da viga $f_c=75$ MPa

Os resultados apresentados nas Figuras 5 a 7 representando as variações das flechas centrais em função do carregamento aplicado sobre vigas solicitadas em flexão pura, mostram os efeitos separados e combinados do desempenho dos materiais constituintes em quantidades constantes ou variáveis.

a) Em quantidades constantes:

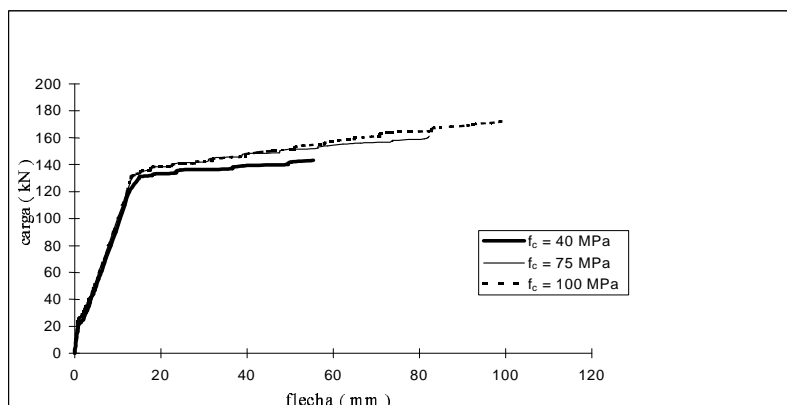


Figura 5. Influência da resistência mecânica do concreto

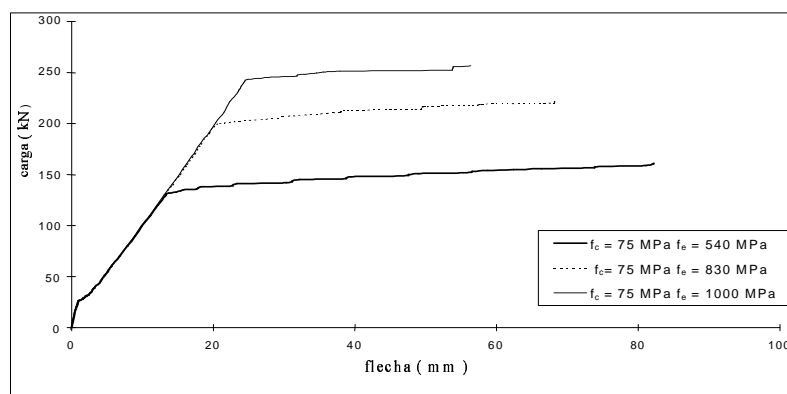


Figura 6. Influência do limite elástico da armadura para concretos com $f_c = 75$ MPa

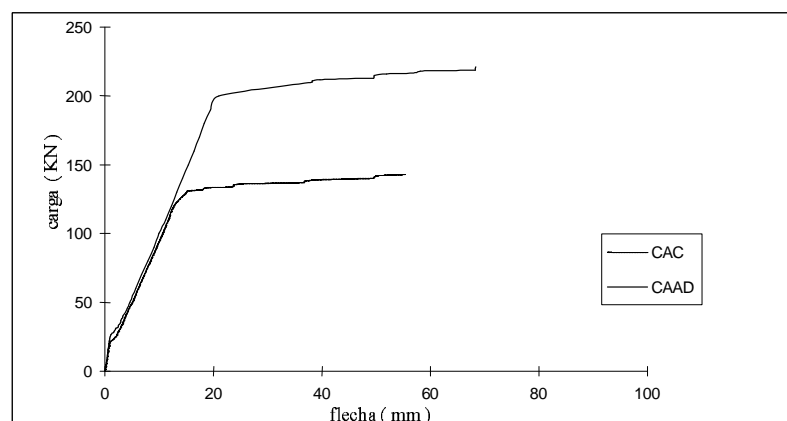


Figura 7. Influência da natureza do concreto armado convencional(CAC) e do concreto armado de alto desempenho (CAAD)

Esses diagramas mostram que o material concreto armado melhora quando seus constituintes o são: com razão o projetista pode estar tentado em diminuir as quantidades quando a qualidade aumenta.

b) Em quantidade e qualidades variáveis:

A Figura 8 apresenta as curvas do comportamento carga-flecha de três vigas armadas de diferentes maneiras com aços de resistência variável, onde a dupla variação conduz a um momento de plastificação praticamente constante. Assim sendo, a comparação das curvas entre elas mesmas restam possíveis de serem feitas. (Portanto é possível comparar as curvas entre si).

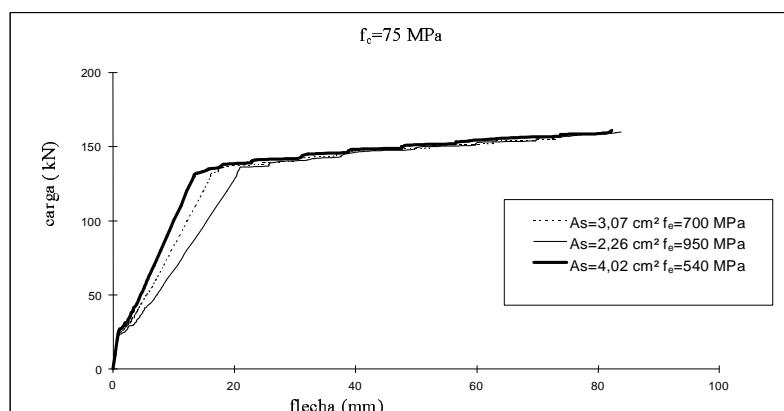


Figura 8. Influência da quantidade e da tensão de escoamento das armaduras longitudinais

Constata-se que antes da fissuração do concreto a resposta do elemento estrutural é a mesma para qualquer que seja a combinação quantidade-qualidade. O mesmo acontece na fase de escoamento plástico, onde existe uma compensação da quantidade pela qualidade e vice e versa.

Em compensação, a zona intermediária, que recobre integralmente aquela da utilização do elemento estrutural, atribui ao parâmetro quantidade uma preeminência importante em relação ao parâmetro qualidade uma vez que a rigidez à flexão acontece prioritariamente segundo a quantidade e não segundo a qualidade.

As conclusões a serem tiradas são, portanto, mais profundas e discutíveis do que o sistema de equações de dimensionamento das seções transversais previa e, devem a partir de agora, estarem inseridas numa reflexão muito mais ampla, reconsiderando a questão inicial, todavia reformulada: **“Que aço para que concreto e principalmente para fazer o que?”**, pois no concreto armado uma questão só tem um grande interesse se ela não permanecer demasiado tempo apenas no plano acadêmico.

Resultados numéricos das vigas

Um estudo numérico de avaliação da eficiência dos modelos constitutivos foi realizado segundo os dados experimentais obtidos – vigas 1,2 e 3, e Ribeiro¹³ – vigas 4, 5 e 6, para uma viga de concreto armado submetida à flexão pura, cujas características físicas mecânicas encontram-se na Tabela I.

As vigas ensaiadas por Ribeiro(1996) possuíam 4,50m de vão, base de 15cm e altura de 45cm, com estribos de diâmetro igual a 6,3mm espaçados de 8cm (vigas 4 e 5) e de 10cm (viga 6).

A Figura 9 ilustra a forma de modelagem efetuada nas vigas dado a simetria do problema.

Viga	f_c (MPa)	f_y (MPa)	A_s	A'_s
1	40	620	2 ϕ 16	2 ϕ 6
2	75	830	2 ϕ 16	2 ϕ 6
3	100	830	2 ϕ 16	2 ϕ 6
4	28,3	560	4 ϕ 12,5	2 ϕ 8
5	65,5	540	2 ϕ 16	2 ϕ 8
6	68	540	5 ϕ 20	2 ϕ 8

Tabela I. Propriedades físicas e mecânicas das vigas ensaiadas no programa experimental e por Ribeiro¹³

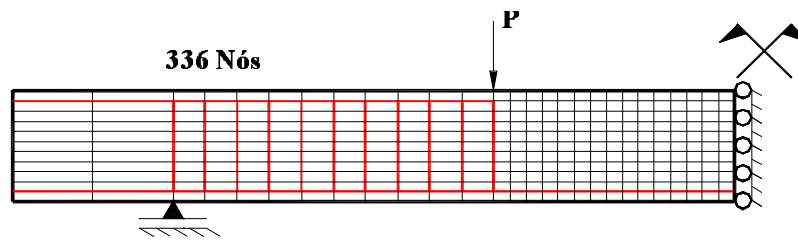


Figura 9. Discretização utilizada nas simulações das vigas de concreto armado

As Tabelas II e III apresentam os resultados obtidos para as forças de fissuração (F_{fiss}), plastificação (F_{plas}) e ruína (F_{ru}), bem como dos deslocamentos δ_u e δ_y para as seis vigas.

Viga		1	2	3
F_{fiss} (kN)	Exp.	15	25	22
	Num.	18	26	20
	Exp./Num.	0,83	0,96	1,10
F_{plas} (kN)	Exp.	147	224	210
	Num.	148	230	230
	Exp./Num.	0,99	0,97	0,91
F_{ru} (kN)	Exp.	149	248	270
	Num.	149	243	261
	Exp./Num.	1,00	1,02	1,03
δ_u (mm)	Exp.	29,69	73,53	71,94
	Num.	29,18	70,15	69,23
	Exp./Num.	1,01	1,05	1,04
δ_y (mm)	Exp.	19,69	26,74	24,07
	Num.	15,63	22,68	22,16
	Exp./Num.	1,26	1,18	1,09

Tabela II. Resultados numéricos obtidos para as vigas 1, 2 e 3 ensaiadas

De uma forma geral nota-se uma maior convergência numérica em relação às vigas oriundas do programa experimental em detrimento às vigas de Ribeiro(1996) devido à própria heterogeneidade do material concreto. Outro fato que acarretou problemas de convergência com relação aos resultados de Ribeiro (1996) foi a adoção nas simulações de um módulo de elasticidade longitudinal uma vez que não realizaram-se ensaios experimentais para a determinação desta grandeza.

Viga		4	5	6
F_{fiss} (kN)	Exp.	31	29	43
	Num.	34	41	89
	Exp./Num.	0,91	0,71	0,48
F_{plas} (kN)	Exp.	136	106	378
	Num.	148	124	454
	Exp./Num.	0,92	0,85	0,83
F_{ru} (kN)	Exp.	160	122	414
	Num.	150	132	461
	Exp./Num.	1,07	0,92	0,90
δ_u (mm)	Exp.	35,00	81,9	37,5
	Num.	25,08	60,51	24,84
	Exp./Num.	1,39	1,35	1,51
δ_y (mm)	Exp.	17,04	16,86	24,69
	Num.	14,21	12,47	17,84
	Exp./Num.	1,20	1,35	1,38

Tabela III. Resultados numéricos obtidos para as vigas 4, 5 e 6 ensaiadas por Ribeiro¹³

A avaliação numérica para vigas de concreto armado convencional e de alto desempenho foi efetuada com base nas dimensões dispostas na Figura 10.

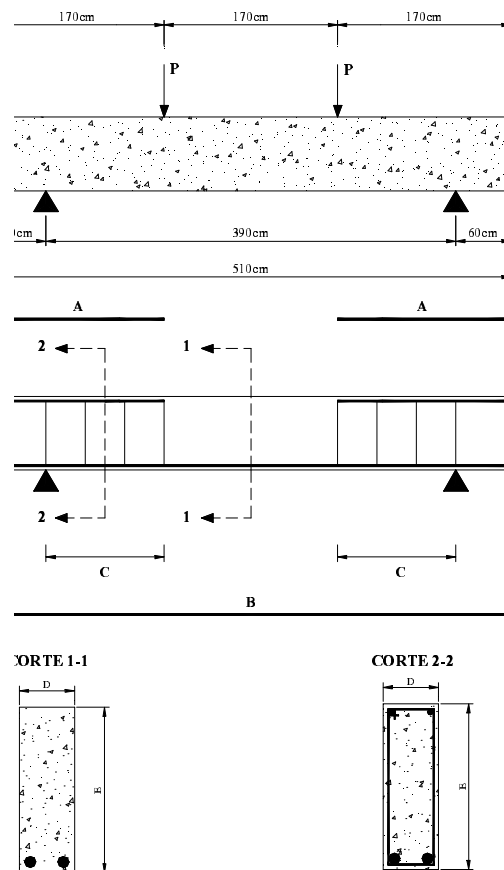


Figura 10. Detalhamento das vigas utilizadas nas modelagens

A Tabela IV apresenta as físicas das vigas segundo as descrições da Figura 10.

Estudo	A	B	C	D	E
01	2 ϕ 6,3	2 ϕ 12,5	ϕ 6,3 c/ 11	15cm	45cm
03	2 ϕ 6,3	2 ϕ 16	ϕ 6,3 c/ 11	15cm	45cm

Tabela IV. Propriedades físicas das vigas

O estudo 1 compreende a variação da resistência à compressão do concreto para um mesmo tipo de armadura; já o estudo 2 compreende a variação da tensão de escoamento do aço para um mesmo tipo de concreto.

Assim no estudo 1 variou-se a resistência do concreto em 40MPa, 55MPa, 70MPa e 100MPa para uma tensão de escoamento das armaduras admitida em 500MPa.

Os resultados obtidos encontram-se na Figura 11.

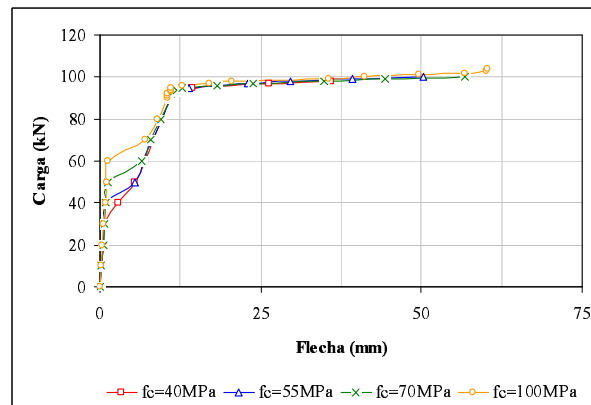


Figura 11. Resultados numéricos para vigas de concreto convencional e de alto desempenho

A ampliação da ductilidade dos elementos com concreto de alto desempenho são notadamente superiores às vigas de concreto convencional.

No segundo estudo a resistência do concreto foi mantida no patamar de 70MPa e a tensão de escoamento do aço foi variada em 500MPa e 600MPa. A Figura 12 ilustra os resultados obtidos.

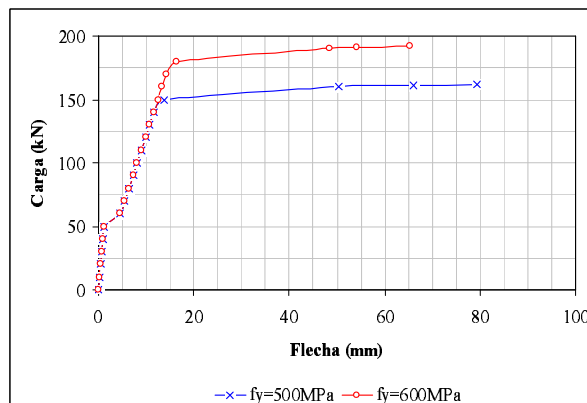


Figura 12. Resultados numéricos utilizando-se aços com tensão de escoamento diferenciada

As vigas com aços de maior tensão de escoamento apesar de possuírem maior capacidade portante possuem menor ductilidade.

Resultados relativos as Placas

Um programa computacional de simulação foi colocado à disposição para o estudo de uma serie de placas numéricas imaginadas para um concreto de resistência de 100 MPa, associado à armadura de limite elástico variando entre 550 a 1400 MPa. As variações carga/flecha obtidas são apresentadas na Figura 13.

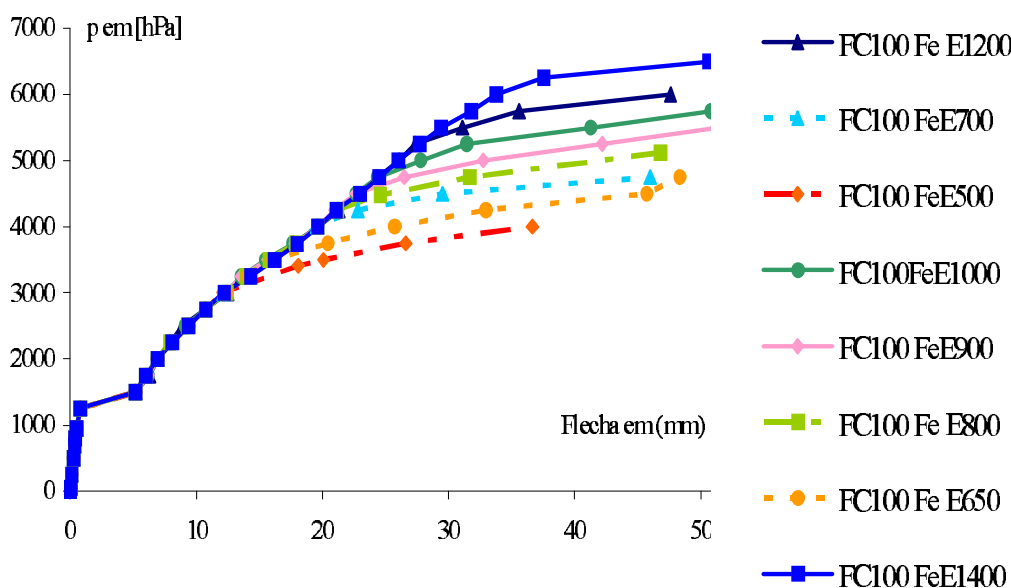


Figura 13. Influência do limite elástico das armaduras ($f_c = 100$ MPa)

Constata-se que essas curvas são estritamente confundidas até atingir um nível de carregamento que correspondente precisamente à posição em deformação plástica do aço com menor resistência. A primeira vista todas essas curvas se deduzem uma das outras por uma espécie de afinidade segundo a hierarquia dos limites de elasticidade. Num segundo momento, um comportamento inesperado se manifesta: a curva envoltória é marcada por uma inflexão acentuada situada no sentido da carga de aproximadamente 3500 hPa, valor que poderia estar associado à um aço cujo limite de elasticidade seria da ordem de 750 MPa aproximadamente.

Afim de tornar esse resultado diretamente explorável em termos de qualidade do aço a conservar, traçou-se na Figura 14 as variações da carga de formação do mecanismo elasto-plástico das placas em função do limite elástico das armaduras associadas.

O fenômeno anteriormente descrito aparece aqui com mais evidência. O máximo de rendimento (faixa de eficiência ótima do aumento de f_c) é obtido por uma gama de aços de limite elástico situados dentro de um intervalo de 750 a 1200 MPa com variação quase linear. Tal observação é demonstrada claramente pela descontinuidade de primeira espécie da derivada primeira da função $f_e = g(p)$. Como fora desses limites a relação desempenho/custo não é ótima, a questão “**que aço para que concreto**” é, pois pertinente e sabe-se a partir deste momento que ela tem uma resposta.

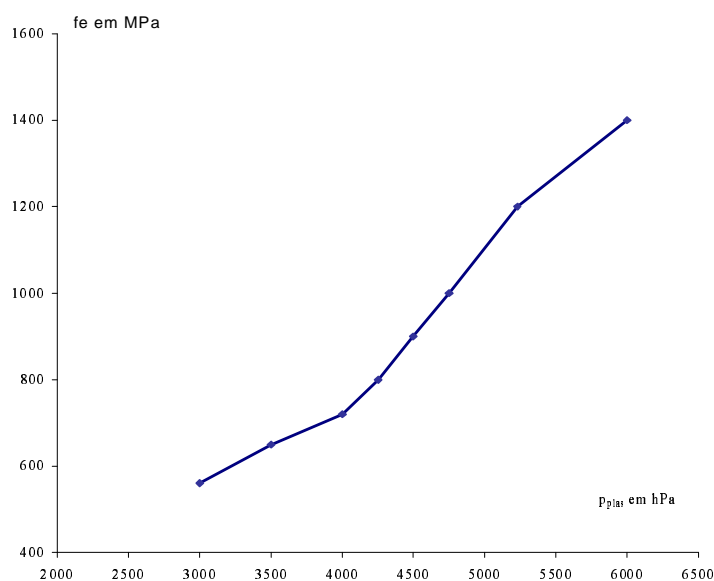


Figura 14. Variação da carga de formação do mecanismo elastoplástico das placas em função do limite elástico da armadura associada

CONCLUSÕES

Acaba-se de apresentar através de duas vertentes relativos à vigas e placas de concreto armado de alto desempenho, indicações objetivas sobre a gestão de otimização do dimensionamento desses dois elementos estruturais bem característicos da engenharia civil. Duas questões de grande importância foram colocadas em discussão:

- A primeira diz respeito a harmonização da armadura e do concreto a serem escolhido dentro de uma gama de materiais de desempenhos largamente estendidos. Tal questão é colocada hoje em discussão porque o C.A.D. existe, e em vista dos resultados relatados nesse artigo a indústria siderúrgica pode e deveria investir como ela o fez no passado, a cada grande etapa de evolução do concreto armado.
- A segunda questão diz respeito à pesquisa do valor mais adequado da relação quantidade/qualidade introduzida pelo conceito propriamente dito de alto desempenho. O que fica de essencial e o que não deixará de interessar aos siderurgistas, é que não há fatalmente redução da quantidade em proporção à melhoria da qualidade.

Dependendo de como serão respondidas essas questões, vai se traçar o futuro do concreto armado de alto desempenho neste início do século XXI.

REFERÊNCIAS

- 1 "Béton armé à hautes performances – Association de bétons et d'armatures à hautes performances", Edité sous la direction de Lucien Pliskin, à paraître aux Presses des Ponts et Chaussées, Paris, Septembre, (2003).
- 2 IREX info, Projet National BHP 2000, bulletin N° 31, Décembre (1994).
- 3 Ph. Rivillon e B. Mesureur, "Etude des bétons à hautes performances armés avec des armatures à hautes performances", Cahiers du CSTB, N° 2979, Septembre (1997).

- 4 M. Lorrain, A. Hamouine e O. Maurel, "Etude de l'ancrage d'armatures à haute adhérence de haute nuance dans du béton de hautes performances", Rapport d'avancement N° 1, Groupe AHP, Projet National BHP 2000, Juin (1996).
- 5 M. Lorrain, O. Maurel e M. Seffo, "Cracking behavior of reinforced high strength concrete ties", *ACI Structural Journal*, pp. 626-635, September-October (1998).
- 6 M. Lorrain, M. Seffo, O. Maurel et B. Mesureur, S. Bernardi e P. Rivillon, "Sur la fissuration de tirants en bétons de hautes performances", *Annales du BTP*, N° 3, Juillet-Août (1999).
- 7 M. Lorrain, M. Arnaud e S. Boukari, "Comportement à l'effort tranchant de poutres en BHP/AHP sollicitées en flexion simple", Rapport d'avancement N° 5, Groupe AHP, Projet National BHP 2000, Décembre (1999).
- 8 M. Arnaud, M. Lorrain e O. Mecheti, "Aptitude au service de dalles en béton armé de hautes performances", *Materials and Structures*, Vol. **34**, pp. 495-501, October (2001).
- 9 M. Lorrain, O. Mecheti e M. Arnaud, "Etude expérimentale de dalles en béton armé de hautes performances", Colloque National de Génie Civil, Université de Mostaganem, pp. 14-19, Algérie 13 et 14 Novembre (2000).
- 10 S. Boukari "Contribution à l'étude des potentialités du béton armé de hautes performances par simulation numérique à l'aide des éléments finis", thèse de doctorat de l'INSAT, dirigée par Michel Lorrain, Mars (2000).
- 11 O. Mecheti, "Apport de haute performance au comportement de dalles en béton armé", , thèse de doctorat de l'INSAT, dirigée par Maurice Arnau, Octobre (2001).
- 12 M. Lorrain, S. Boukari, O. Maurel e M. Pinto-Barbosa, "Comportement de poutres en béton de hautes performances munies d'armatures de hautes performances - Etude expérimentale et numérique", *Materials and Structures*, Vol. **32**, pp. 708-718, December 1999,
- 13 P.T.P. Ribeiro, "Influência da Taxa de Armadura na Ductilidade de Vigas de Concreto de Alta Resistência. Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, p. 98, (1996).