

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE AÇO E CONCRETOS ESPECIAIS

Mariana Passos de Pádua¹; Cassia Silveira Assis²

¹ Aluna de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professora da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *O trabalho de iniciação científica foi desenvolvido a fim de realizar ensaios de flexão em três pontos em vigas confeccionadas em concreto armado em que o concreto é de alto desempenho e alguns tipos de aço CA-50 e CA-60. Durante o ano foi estudada a caracterização dos materiais constituintes: cimento, areia e britas para a adaptação do traço do concreto e assim a elaboração do projeto de vigas para tal estudo.*

Introdução

A utilização do concreto, diferente do atual, mas com características semelhantes, perde-se na Antiguidade: já era conhecido e aplicado nos tempos do Império Romano.

Os assírios e babilônios pioneiros da construção, usaram argila como aglomerante, mas a sua fraca resistência não permitiu um maior desenvolvimento das construções.

Os egípcios conseguiram uma ligação mais rígida com argamassa de cal e gesso, como atestam suas pirâmides e seus templos.

Os romanos criaram um aglomerante de grande durabilidade adicionando ao calcário determinada cinza vulcânica do Vesúvio, chamada “pozzolana”.

Em 1824, o escocês JOSEF ASPDIN desenvolveu um cimento bem semelhante ao atual, dando-lhe o nome de “Portland”, nome de uma cidade do litoral sul da Inglaterra, onde existem rochedos com a mesma cor cinza esverdeado do cimento descoberto.

Em 1845, JOHNSON produziu um cimento do mesmo tipo que o moderno Portland.

Apesar de descoberto o aglomerante ideal, nenhum desenvolvimento notável se verificou em estruturas de concreto, devido principalmente a fraca resistência do material aos esforços de tração.

Somente em meados do século XIX, quando surgiu a ideia de se adicionar ao concreto um material de elevada resistência à tração (aço), é que progressos relevantes se fizeram sentir. Nascia assim um material composto: “cimento armado”, e posteriormente, “concreto armado”. (KAEFER, 1998).

Historicamente, percebe-se uma evolução nos incrementos de resistências, em função das necessidades, sendo a partir daí adotada a denominação de concreto de alta resistência, referindo-se àqueles que possuem resistências muito mais elevadas em relação aos outros mais regularmente utilizados, denominados concretos comuns. Neste novo conceito, as demais propriedades do concreto, principalmente, à durabilidade, são colocadas em pé de igualdade com suas características mecânicas.

O concreto de alto desempenho tem tido uma larga aceitação na indústria de construção, principalmente no que visa à obtenção de obras com maior durabilidade, dispensando os gastos com manutenção de estruturas. A utilização de concretos de maior durabilidade deverá fazer com que obras de arte como pontes, viadutos, pavimentos e respectivas estruturas portantes possam ter maior durabilidade, sendo este o maior desafio: a

implementação de todos os conhecimentos para a disponibilização de recursos para novos projetos.

As principais características do concreto de alto desempenho estão, em geral, associadas diretamente a benefícios propiciados com o seu emprego, como por exemplo: alta resistência à compressão, que se traduz no aumento de capacidade portante e/ou diminuição da seção transversal do elemento estrutural, alto Módulo de Elasticidade, baixa permeabilidade o que representa um aumento significativo na vida útil da estrutura, principalmente no que tange a ataques de fatores corrosivos em meios agressivos, sendo fator preponderante para a durabilidade. (DA SILVA MENDES, 2002).

No cenário atual, é fundamental a preocupação com a durabilidade e resistência das estruturas de concreto. Assim, estudos estão cada vez mais presentes a fim de aumentar o uso destas estruturas com segurança e durabilidade.

Material e Métodos

O concreto de alto desempenho é composto por agregados miúdos e graúdos, água, cimento Portland (ARI-V) e alguns aditivos para aumentar a resistência do material. A seleção criteriosa dos materiais é de fundamental importância na preparação do Concreto de Alto Desempenho, pois é muito difícil conquistar a trabalhabilidade necessária para lançá-lo com segurança e uniformidade, ou alcançar o último MPa de resistência à compressão. Para isso, foi realizada a caracterização dos materiais que compõe o concreto.

-Agregados miúdos e graúdos: tem por finalidade resistir aos esforços, diminuir a retração e o consumo de aglomerantes, por isso há uma seleção criteriosa quanto à granulometria a fim de encontrar a dimensão máxima característica.

a) agregado miúdo: dimensão máxima sendo 2,4mm e módulo de finura, 2,28.

b) agregado graúdo: dimensão máxima sendo 12,5mm e módulo de finura, 5,99.

Além dos estudos sobre granulometria, a caracterização dos materiais exige a determinação das massas unitária e específica.

a) agregado miúdo: massa unitária igual a 1,517 (kg/cm³) e massa específica igual a 2,622 (g/cm³).

b) agregado graúdo: massa unitária igual a 1,598 (kg/cm³) e massa específica igual a 2,941 (g/cm³)

-Água: A água potável é internacionalmente convencionada como adequada para a produção do concreto e o seu aspecto quantitativo é fator fundamental para a produção do CAD.

- Cimento Portland (ARI-V): O cimento portland de alta resistência inicial (CP V - ARI) tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação devido ao grau de moagem ao qual é submetido.

Para o estudo, foram determinadas sua massa unitária 1,013(kg/cm³) e sua massa específica 2,975 (g/cm³).

-Vergalhão CA-50: aço laminado à quente, forma a estrutura principal da armação do concreto armado. Possui diâmetro de 10 mm e resistência nominal de 500 MPa.

-Vergalhão CA-60: aço de baixo teor de carbono, apresenta ótima soldabilidade, além de maior aderência do aço ao concreto, melhor ancoragem nas estruturas e melhor

combate à fissuração do concreto, forma o estribo da armação do concreto armado, responsável pela resistência ao cisalhamento. Possui diâmetro 4,8mm e resistência nominal de 600 MPa.

Para realizar o ensaio de flexão em três pontos é necessário seguir as normas brasileiras. A principal norma para o projeto de estruturas de concreto armado e protendido é a NBR 6118/2003 - Projeto de estruturas de concreto.

Assim, foi elaborado um traço em massa para o concreto a partir da massa de cimento utilizada. Partiu-se de um traço empírico com uma pequena porcentagem de aditivo: 1:1,5:2,5:0,4: 1,5% de aditivo.

Para realizar a proporção entre as massas, foi calculado o consumo de cimento para 1 m³ de concreto, através do cálculo:
$$\text{consumo} = \frac{1000}{\text{soma dos traços}} * 2,45$$
, sendo 2,45 a massa específica do concreto (não experimental). Em seguida, foi elaborada uma proporção deste consumo com o volume da betoneira utilizada para assim, encontrar a massa do cimento para o traço.

No primeiro traço foi obtido o consumo de cimento para 1m³ de concreto igual a 454 kg/m³ e para a betoneira cujo volume é 22L, a massa de cimento igual 10kg. Assim o traço em massa foi: 10:15:25:4: 150g de aditivo.

Com os resultados obtidos no primeiro teste, o traço do concreto foi alterado, aumentando assim a porcentagem de argamassa a fim de cobrir os vazios no concreto. Assim o traço em massa foi: 1:1,8:1,2:0,4:1% aditivo.

Neste traço, por meio dos cálculos ditos acima, foi obtido o consumo de cimento para 1m³ de concreto igual a 557 kg/m³ e para a betoneira cujo volume é 26L, a massa de cimento igual 15kg. Assim o traço em massa foi: 15:27:18:4: 150g de aditivo.

Com os resultados obtidos no segundo teste, o traço foi alterado novamente adicionando um retardador pois o concreto endurecia rapidamente enquanto era moldado. Além disso o traço do agregado graúdo diminuiu e foi acrescentado 1 kg de Meta Caulin, um pó para facilitar o preenchimento dos vazios no concreto.

Este ultimo traço(1:1,8:0,7:0,282:1% de aditivo: 0,02% de retardador: 1 kg de Meta Caulin) atendeu às expectativas durante os testes e foi utilizado durante o ano para todos os moldes a partir de então.

Por meio dos cálculos acima foi obtido o consumo de cimento para 1m³ de concreto igual a 628 kg/m³ e para a betoneira cujo volume é 26L, a massa de cimento igual 17kg. Assim o traço em massa foi: 17: 30,6:11,9:4,8: 170g de aditivo: 3,4g de retardador: 1kg de Meta Caulin.

Para a confecção das vigas, foi utilizado bases de ferro seguindo um padrão dado pela NBR 6118/2003 para as dimensões em teste de flexão. No caso deste ensaio confeccionaremos vigas de 500 mm de comprimento x 150 mm de altura x 150 mm de largura. A armadura longitudinal dos modelos ensaiados será composta de quatro barras de aço com diâmetro de 10 mm e classe CA-50 e CA-60.

Para os experimentos foi utilizado corpos de provas cujo diâmetro era 10 cm e a altura 20 cm. a resistência à compressão simples é a propriedade mais importante de um concreto, pois além do concreto trabalhar predominantemente à compressão, ela fornece outros parâmetros físicos que podem ser relacionados empiricamente à resistência à compressão. Determinada através de corpos de prova moldado e preparado segundo NBR 5738 (2008), e ensaiados de acordo com a NBR 5739 (2007). No Brasil, na ausência de normatização a

respeito, o IBRACON, define o CAD em função da resistência à compressão, que pode ser a classe superior à C50, ou seja, concretos com resistência característica à compressão (f_{ck}), superior a 50MPa.

Com cálculo do traço em massa, corpos de prova e vigas prontas, foi iniciado o procedimento para a elaboração do concreto. Na betoneira adicionou-se a quantidade de britas (agregados graúdos), em seguida, 2% da água calculada, para a pré-molhagem, e logo após, colocou-se toda a quantidade de areia. Deixar em torno de 10 minutos mexendo para então adicionar a quantidade de cimento e, por fim, a água já com aditivo inserido na mesma. Assim deixar mais 10 minutos para a obtenção do concreto.

Após tal procedimento o concreto foi colocado nos moldes para as vigas e para os corpos de provas para os testes. Para as vigas, foi utilizado uma armadura de aço CA-5, aço com quatro estribos de CA-60. Esta armadura está caracterizada com quatro barras de aço CA-50 de 46cm de comprimento, sendo duas destas (debaixo) dobradas 5 cm, e quatro estribos de aço CA-60 de 10cm de largura e comprimento. A armadura foi posicionada em cada viga a aproximadamente 2 cm de distância do perímetro da viga. Depois os moldes eram levados depois de um ou dois dias para a estufa úmida e assim realizar a cura do concreto armado, que é aproximadamente sete dias, segundo a NBR-5733.

Ao obter-se a cura do concreto foi realizado teste de flexão em cada viga e teste de compressão nos corpos de prova para encontrar as respectivas tensões máximas e, portanto verificar se tais valores estavam de acordo com o esperado.

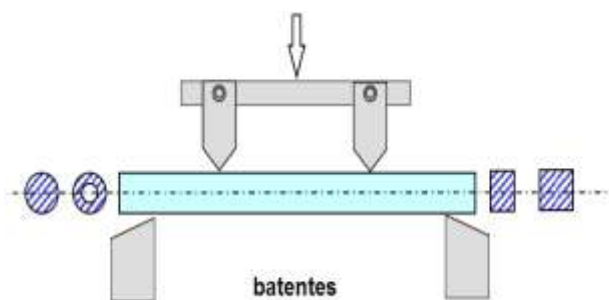


Figura 1- Esboço do teste de flexão duas cargas superiores aplicadas.

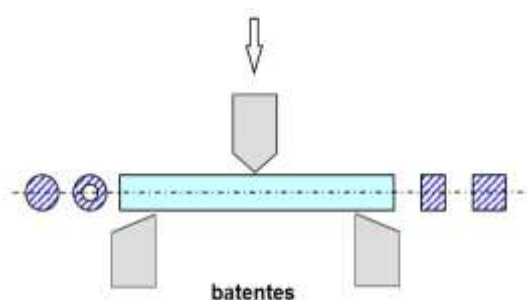


Figura 2- Esboço do teste de flexão uma carga superior aplicada.

Na figura 1, o espaçamento superior corresponde a 1/3 do espaçamento total nesta parte. Já na figura 2, o espaçamento superior corresponde a metade do espaçamento total nesta parte.

O procedimento foi o mesmo para todos os tipos de traço em massa citados anteriormente.

Resultados e Discussões

Os primeiros dados foram experimentos com tentativas e erros a fim de aprimorar o traço do concreto e a real posição das cargas concentradas nos testes de flexão nas vigas.

A Tabela 1 apresentada abaixo mostra os valores experimentais obtidos utilizando os traços de concreto, variando tanto o teor de agregados graúdos, miúdos, a relação água/cimento e também o teor de aditivos. O procedimento foi adotado para a obtenção do traço mais adequado tanto na resistência à compressão simples objetivando um concreto de alto desempenho passível de ser reproduzido para a sequência de experimentos.

Tabela 1- Valores experimentais de tensão de compressão dos corpos de prova.

corpos de provas		diâmetro: 10 cm			Area: 78,540(cm²)
Traço	Amostra	Carga aplicada (kgf)	compressão (kgf/cm²)	compressão (MPa)	
1: 1.5: 2.5: 0.4: 1.5% aditivo	1	33120	421,6969	42.17	
	2	45080	573,9764	57.40	
	3	42840	545,4558	54.55	
	4	41730	531,3229	53.13	
1: 1.8: 1.2: 0.4: 1% aditivo	1	34230	435,8299	43.58	
	2	36920	470,0800	47.01	
	3	38070	484,7223	48.47	
	4	37050	471,7353	47.17	
1: 1.8: 1.2: 0.4: 1% aditivo	1	32550	414,4395	41.44	
	2	34190	435,3206	43.53	
1: 1.8: 0.7: 0.282: 1% aditivo: 0.02% retardador: 1Kg meta Caulin	1	32650	415,7127	41.57	
	2	31810	405,0175	40.50	

Segundo a NBR-5733, a resistência à compressão do Cimento Portland de alta resistência inicial (CP-V-ARI) após 7 dias de idade tem limite inferior a 34MPa, como verificado na tabela 1.

Segundo a NBR-6118, projeto de estruturas de concreto, o Momento fletor para vigas bi-apoiadas, na parte superior, é dada por: $M = \frac{P \cdot L}{6}$, sendo P a carga máxima (dada pelo aparelho medidor de tensões) e L o comprimento do vão entre os apoios inferiores. Para as vigas que só possuem um apoio, na parte superior, o momento é dado por: $M = \frac{P \cdot L}{4}$.

Já o módulo de resistência indica o cociente do momento de inércia em relação ao eixo que passa pelo baricentro e a distância deste eixo até a borda mais extrema da seção em estudo, é dada por $W = \frac{b \cdot h^3}{6}$.

Por fim, a tensão de flexão é dada por $\sigma = \frac{M}{W}$.

Os valores de tensão encontrados estão dados em kgf /cm² (quilograma força por centímetro quadrado) e a unidade convencional para tensão é MPa (Mega Pascal). Dessa forma, foi necessário converter a unidade seguindo a devida proporção.

A Tabela 2 mostra os resultados experimentais para a tensão de flexão nas vigas utilizando o espaçamento entre os apoios igual a 40 cm. Temos as duas primeiras amostras testadas sem armadura, e a partir de então todas as outras, até o final do estudo, foram testadas com armadura.

A ultima amostra de viga da Tabela 2 se destacou no estudo devido ao fato que a sua ruptura se apresentou diferente das outras, pois se rompeu próximo a uma das extremidades.

Assim concluiu-se que o espaçamento da carga concentrada na parte debaixo no teste estava grande e por isso foi alterado de 40 cm para 36 cm. Os resultados podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 2- Valores experimentais para tensão de flexão nas vigas, para espaçamento de 40 cm.

Traço	amostra	Carga aplicada (kgf)	Momento(kgf.cm)	Módulo de resistência(cm³)	tensão (kgf/cm²)	tensão (MPa)
1: 1.5: 2.5: 0.4: 1.5% aditivo	1	7210	48066,67	562,5	85,4519	8.545
1: 1.8: 1.2: 0.4: 1% aditivo	1	7620	50800	562,5	90,3111	9.031
1: 1.8: 1.2: 0.4: 1% aditivo	1	16490	109933,33	562,5	195,4370	19.544

Dados:

Espaçamento superior (duas cargas)= 13,5 cm

Espaçamento inferior (duas cargas)= 40cm

Largura= altura= 15cm

Tabela 3- Valores experimentais para tensão de flexão nas vigas, para espaçamento de 36 cm.

Traço	amostra	Carga aplicada (kgf)	Momento(kgf.cm)	Módulo de resistência(cm³)	tensão (kgf/cm²)	tensão (MPa)
1: 1.8: 1.2: 0.4: 1% aditivo	2	25170	151020	562,5	268,48	26.848

Dados:

Espaçamento superior (duas cargas)= 12 cm

Espaçamento inferior (duas cargas)= 36 cm

Largura= altura= 15cm

Na sequencia de ensaios, foi avaliada a possibilidade de se colocar apenas uma carga superior ao invés de duas, por ser mais simples já que o vão inferior não é grande o suficiente para necessitar de duas cargas superiores. Além disso, foi alterado, novamente, o espaçamento inferior a fim de avaliar se a tensão se tornaria maior ou menor que as anteriores. A Tabela 4 se refere aos resultados obtidos.

Tabela 4- Valores experimentais para tensão de flexão nas vigas, para espaçamento de 38cm.

Traço	amostra	Carga aplicada (kgf)	Momento(kgf.cm)	Módulo de resistência(cm³)	tensão (kgf/cm²)	tensão (MPa)
1: 1.8: 0.7: 0.282: 1% aditivo:	1	16200	153900	562,5	273,600	27.360
0.02% retardador: 1Kg meta Caulin	2	15800	150100	562,5	266,844	26.684

Dados:

Espaçamento superior (uma carga)= 16,5 cm

Espaçamento inferior (duas cargas)= 38 cm

Largura= altura= 15cm

Com esses resultados foi possível tornar padrão o traço do concreto além dos espaçamentos superiores e inferiores.

A Tabela 5 apresenta os resultados de resistência à compressão simples do traço selecionado para a utilização na confecção das vigas.

Tabela 5- Valores experimentais para tensão de compressão dos corpos de prova - Padrão para análise.

corpos de provas		diâmetro: 10 cm		Area: 78,539 cm²	
Traço	Amostra	Carga aplicada (kgf)	compressão (kgf/cm²)	compressão (MPa)	
1: 1.8: 0.7: 0.282: 1% aditivo: 0.02% retardador: 1Kg meta Caulin	5	48730	620,450	62.04	
	6	36790	468,425	46.84	
	7	53360	679,401	67.94	
	8	54900	699,009	69.90	
	9	53060	675,581	67.56	
	10	60620	771,838	77.18	
	11	48950	623,251	62.33	
	12	39580	503,948	50.39	

A resistência à compressão simples é a característica mais importante de um concreto. Foi determinada em corpos de prova padronizados para possibilitar que resultados de diferentes concretos possam ser comparados.

A resistência à compressão simples é a característica mais importante de um concreto. Foi determinada em corpos de prova padronizados para possibilitar que resultados de diferentes concretos possam ser comparados.

Observa-se que resultados da tensão ruptura (f_c) obtidas no ensaio de diversos corpos de prova, Tabela 5, são mais ou menos dispersos em torno da resistência média (f_{cm}), conforme o rigor com que se confeccione o concreto. Pode-se elaborar um gráfico com os valores obtidos de f_c versus a quantidade de corpos-de-prova relativos a determinado valor de f_c , também denominada densidade de frequência. A curva encontrada denomina-se Curva Estatística de Gauss ou Curva de Distribuição Normal para a resistência do concreto à compressão (Figura 3).

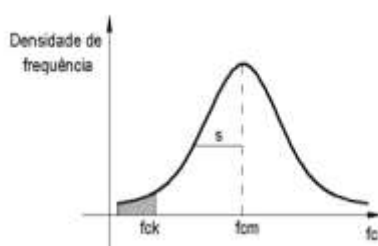


Figura 3- Curva de Gauss para a resistência do concreto à compressão.

Pelo controle estatístico do concreto por amostragem parcial, é possível obter o valor estimado da resistência característica à compressão (F_{ck}). Segundo A NBR 12655:2006, para lotes com números de exemplares entre 6 e 20, o valor estimado é dado por:

$$F_{ck} = 2 * \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{m-1}}{m - 1} - f_m$$

sendo $m = \frac{n}{2}$. E f_1, f_2, \dots, f_{m-1} valores das resistências dos exemplares, em ordem crescente.

Dessa forma temos:

$$F_{ck} = 2 \cdot \frac{69,900 + 67,940 + 67,560}{3} - 77,180 = 59,750 \text{ MPa.}$$

Sabendo que esta é a tensão característica do concreto à compressão, através da NBR 6118, é possível achar a tensão de resistência à tração do concreto, uma vez que esta é 10% do valor obtido pela Fórmula de Student.

$$\text{Assim sendo, } F_{tk} = \frac{F_{ck}}{10} = 6,000 \text{ MPa.}$$

Tendo selecionado o traço de concreto de alto desempenho foram confeccionadas as vigas para ensaio de flexão em três pontos cujos resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6- Valores experimentais para tensão de flexão nas vigas- Padrão para análise.

Traço	amostra	Compressao(kgf)	Momento(kgf.cm)	Módulo de resistencia(cm³)	tensão (kgf/cm²)	tensão (MPa)
1: 1.8: 0.7: 0.282: 1% aditivo: 0.02% retardador: 1Kg meta Caulin	5	18710	177745	562,5	315,9911	31.599
	6	15540	147630	562,5	262,4533	26.245
	7	16720	158840	562,5	282,3822	28.238
	8	10760	102220	562,5	181,7244	18.172
	9	19360	183920	562,5	326,9688	32.697
	10	14450	137275	562,5	244,0444	24.404
	11	18390	174705	562,5	310,5866	31.059
	12	16590	157605	562,5	280,1866	28.019

A partir da média feita das tensões de flexão, Tabela 6, pode-se estabelecer o valor da resistência média encontrada .

$$F_{tj} = \frac{1}{n} \sum f_t = 28,019 \text{ MPa.}$$

Observa-se que o valor encontrado de 28,019 MPa, no ensaio, é superior a quatro vezes o valor estimado pela NBR-6118.

Conclusões

Com base nos conceitos de materiais de construção, sabe-se que o concreto é muito mais resistente à compressão enquanto o aço é à tração.

Assim, neste trabalho de iniciação científica, foi comprovado que o aço melhorou a propriedade de tração do concreto tornando o concreto em estudo resistente tanto à compressão quanto à tração, este está diretamente relacionado aos resultados dos testes de flexão nas vigas.

Para se obter uma resistência alta, é fundamental um rigoroso controle de qualidade do cimento utilizado, bem como um estudo de distribuição granulométrica dos agregados miúdos e graúdos. Além de utilizar as quantidades adequadas de aditivos plastificantes e retardadores de pega e adições como Meta Caulin.

Referências Bibliográficas

- FUSCO, P.B. (1976) *CONCRETO ARMADO* Fundamentos do Projeto Estrutural. McGRAW-HILL, São Paulo.
- Estefano, M. (2011) *MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL*. São Paulo.
- ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 12142 (2010). *Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos*. Rio de Janeiro.
- _____. NBR 6118 (2003) *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- _____. NBR 7480 (2007) *Barras e fios destinados a amaduras de concreto armado – Especificação*, Rio de Janeiro.
- _____. NBR 7190 (1997) *Projeto de estruturas de madeira- Procedimento*. Rio de Janeiro.
- _____. NBR 8953 (1992) *Concreto para fins estruturais-Classificação por grupos de resistência*. Rio de Janeiro.
- _____. NBR 12655 (2006) *Concreto de cimento Portland- Preparo, controle e recebimento- Procedimento*. Rio de Janeiro.
- FERREIRA DE SOUZA JUNIOR, T. *Estruturas de Concreto Armado*. Disponível em: <http://www.tooluizrego.seed.pr.gov.br/redeescola/escolas/27/2790/30/arquivos/File/Disciplinas%20Conteudos/Quimica%20Subsequente/Quimica%20Inorganica/Carlos_3Sem_Concreto.pdf> Acesso em 04 jan.2013.
- DA SILVA MENDES, S.E. *Estudo experimental de concreto armado utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba*. Disponível em: <<http://www.ppgcc.ufpr.br/dissertacoes/d0010.pdf>> Acesso em 10 ago.2013.
- CARLOS DE ALMEIDA, L. *Estruturas IV– Concreto armado*. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~almeida/au405/Concreto.pdf>> Acesso em 01 dez.2013.
- KAEFER, L.F. *A evolução do concreto armado*. Disponível em: <<http://www.hdutil.com.br/site/arquivos/biblioteca%20cpcm/HistoriadoConcreto.pdf>> Acesso em 04 jan.2013.