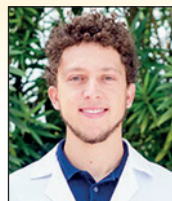
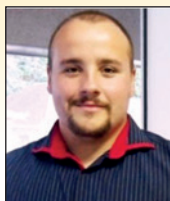


Case study: influence of performance levels of ABNT NBR 15575 without consumption of materials used in reinforced concrete structures

Estudo de caso: influência dos níveis de desempenho da ABNT NBR 15575 no consumo de materiais utilizados em estruturas de concreto armado



F. S. CUNHA^a
fselaucunha@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-7496-3908>

K. A. L. COLLA^a
klebercolla@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5234-920X>

H. EHRENBING^a
hzamis@unisinis.com
<https://orcid.org/0000-0002-0339-9825>

F. L. BOLINA^a
fabriciolb@unisinis.br
<https://orcid.org/0000-0002-0495-099X>

B. TUTIKIAN^a
bftutikian@unisinis.br
<https://orcid.org/0000-0003-1319-0547>

Abstract

The Brazilian construction industry still discusses the consequence of the Performance Standard on housing developments. According to ABNT NBR 15575 [1], the systems that compose residential buildings need to meet minimum performance requirements. Among the systems, the structural must reach a minimum Service Life (SL) of 50 years, or intermediate or higher that corresponds to 63 and 75 years, respectively. The industry also debates the impact and viability of increasing the SL of reinforced concrete structures. Therefore, this article aimed to analyze a single reinforced concrete building designed for the 3 SL specified by ABNT NBR 15575 [1]. The study focused on the total consumption of steel and concrete. The structure's designed conditions of exposure were varied for each performance level, based on the 4 environmental exposure classes (EEC) of ABNT NBR 6118 [3] and ABNT NBR 12655 [11], totaling 12 situations. It was noted that the increased performance level increases consumption of materials, and the designs made for EEC IV consumed 12.3% and 16.2% more steel and concrete at the intermediate and superior performance levels respectively, when compared to the minimum performance level.

Keywords: brazilian performance standard, concrete structure, service life.

Resumo

O setor da construção civil ainda discute a consequência da Norma de Desempenho nas edificações habitacionais. Segundo a ABNT NBR 15575 [1], os sistemas que compõem edificações residenciais necessitam atingir os requisitos mínimos de desempenho. Dentre os sistemas, o estrutural deve atender a uma Vida Útil de Projeto (VUP) mínima de 50 anos, ou intermediária ou superior, correspondendo à 63 e 75 anos, respectivamente. É debatido no setor o impacto e a viabilidade do incremento da VUP nas estruturas de concreto armado. Diante disso, esse artigo objetivou analisar uma mesma edificação em concreto armado projetada para as 3 VUPs contempladas pela ABNT NBR 15575 [1]. O estudo concentrou-se no consumo total de aço e concreto. Para cada nível de desempenho, variaram-se as condições de exposição da estrutura para o dimensionamento, com base nas 4 classes de agressividade ambiental (CAA) da ABNT NBR 6118 [3] e ABNT NBR 12655 [11], totalizando 12 situações. Verificou-se que o incremento do nível de desempenho aumenta o consumo dos materiais, sendo que os projetos elaborados para a CAA IV tiveram um consumo de 12,3% e 16,2% de aço e concreto superior para os níveis intermediário e superior de desempenho, respectivamente, comparando com o nível mínimo de desempenho.

Palavras-chave: norma de desempenho, estruturas de concreto armado, vida útil de projeto.

^a Unisinis, itt Performance, São Leopoldo, RS, Brasil.

1. Introdução

As reações no setor da construção civil são notórias com a implementação da ABNT NBR 15575 [1]. A norma estabelece requisitos mínimos de desempenho aplicados nos sistemas que compõem as edificações habitacionais, visando atender requisitos em termos de habitabilidade, segurança e sustentabilidade [2]. Para cada requisito, a Norma define os níveis de desempenho mínimo, intermediário e superior, com consequências diretas na sua fase de uso. Dentre os conceitos incorporados está o de Vida Útil de Projeto (VUP), período mínimo que os sistemas devem seguir atendendo ao desempenho determinado em projeto. No caso das estruturas de concreto armado, a VUP que o sistema deve atender está relacionada ao nível de desempenho pretendido, apresentados na norma de desempenho [1].

Pelo fato da ABNT NBR 15575 não ser prescritiva, os requisitos de desempenho devem ser atendidos com base nas normas de projeto aplicadas à estrutura concebida. No caso das estruturas de concreto armado, adota-se a ABNT NBR 6118 [3], ABNT NBR 6120 [4], ABNT NBR 8681 [5], ABNT NBR 6123 [6], entre outras. Todavia, salvo a ABNT NBR 6123 [6], as demais normas apresentam requisitos para uma VUP que se pressupõe ser de 50 anos [7]. Logo, para que os níveis intermediário e superior sejam atingidos, deve ser feita uma consulta às normas estrangeiras ou, caso inexistam, aos estudos técnicos fundamentados, visando a adoção de critérios de projeto consistentes. Dessa forma, trabalhos como os de Bolina *et al.* [7], Bolina e Tutikian [8] e Bolina e Tutikian [9] servem de ponto de partida para análises mais refinadas, que visam implementar vidas úteis superiores à mínima, ainda não apresentadas por normas brasileiras.

Em termos de durabilidade, os parâmetros de projeto devem considerar os agentes externos do ambiente de inserção. Segundo Tutikian e Helene [10], a durabilidade das estruturas de concreto depende tanto de fatores extrínsecos, tais como a presença de sais, maresias, chuvas ácidas, quanto intrínsecos, entre eles o

tipo de cimento, relação água/cimento, adições e aditivos. Conforme apresentado pela ABNT NBR 12655 [11] e, se atendidos os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6118 [3], a durabilidade das estruturas é diretamente dependente das características do concreto e seu ambiente de inserção. Com correlações entre a característica da estrutura e concreto empregado, a ABNT NBR 6118 [3] recomenda a adoção de determinados requisitos para se atender uma durabilidade mínima prescrita. Segundo Bolina e Tutikian [8], subentende-se que as recomendações desta norma sejam para VUP de 50 anos. Essa suposição se fundamenta na ABNT NBR 8681 [5], que propõe fatores de majoração para a combinação dos carregamentos admitidos para o período de 50 anos. Logo, para projetos que visem um nível de desempenho acima do mínimo, uma análise dos parâmetros de projeto praticados pela ABNT NBR 6118 [3] deve ser feita.

No que tange aos carregamentos admitidos no projeto estrutural, as cargas permanentes não se alteram no decorrer da vida útil, não sofrendo alterações com a VUP pretendida [12]. Porém, as cargas acidentais, ou de utilização, variam ao longo da sua vida útil, devendo ser analisadas para níveis de desempenho superiores ao mínimo. Pelo fato de serem cargas que apresentam variabilidade com ao decorrer do tempo, a ABNT NBR 8681 [5] preconiza valores característicos que possuem uma probabilidade de ocorrência de 25 a 35% para um período de 50 anos, não havendo qualquer consideração para tempos de retorno de 63 e 75 anos a estas ações [7].

Já no caso da ação do vento, conforme a ABNT NBR 6123 [6], faz-se necessário utilizar as isopletas propostas na definição das velocidades do vento de cada região. Os valores praticados nas isopletas são para rajadas de vento de 3 segundos, com probabilidade de 63% de acontecer uma vez em 50 anos. Ao se projetar uma estrutura para níveis de desempenho superiores ao mínimo, deve-se utilizar equações específicas para determinação da velocidade básica do vento, demonstrados no anexo B daquela norma.

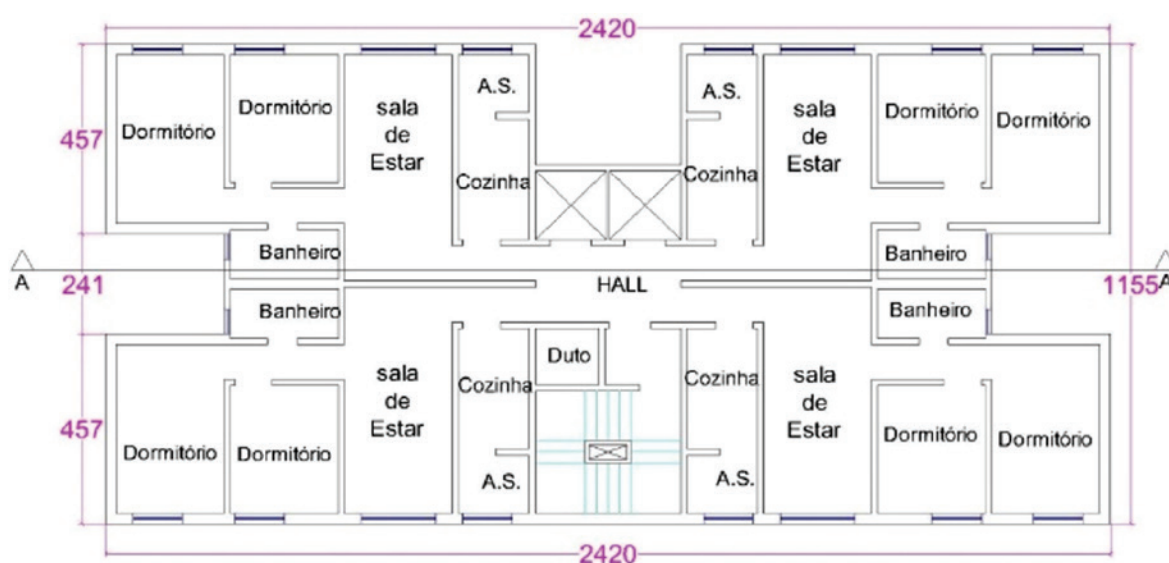


Figura 1
Vista em planta do projeto arquitetônico do pavimento tipo

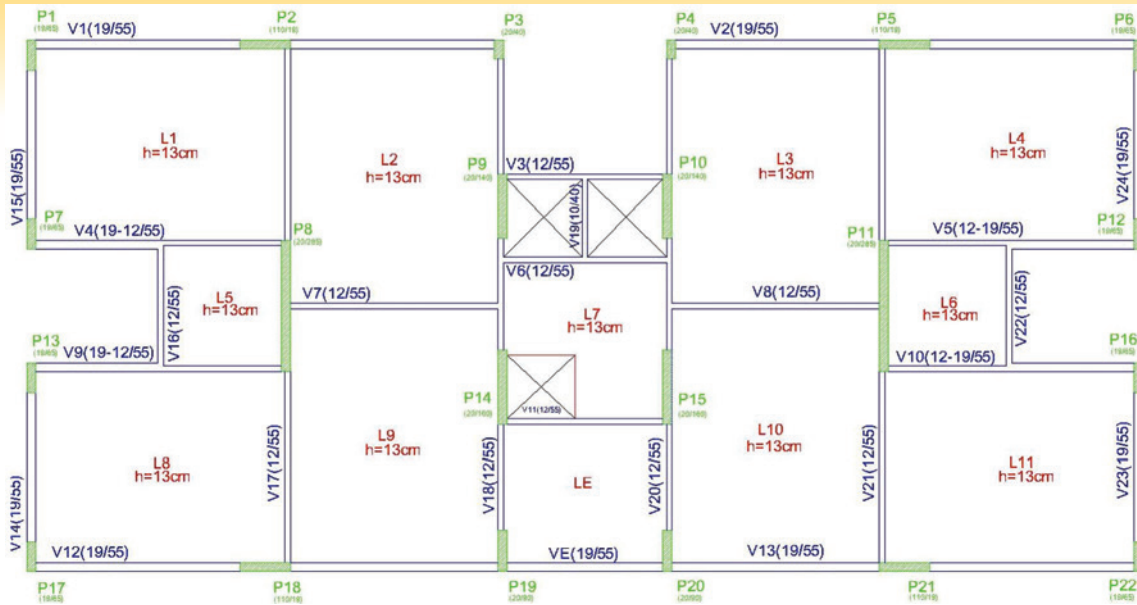


Figura 2
Vista em planta das fôrmas do pavimento tipo

Do exposto, nota-se que o sistema normativo brasileiro aplicado no projeto estrutural ainda não consegue esgotar as necessidades da ABNT NBR 15575 [1] para uma VUP superior a 50 anos. No que tange aos custos, em torno de 40% do total de recursos da indústria e 35% do volume de trabalho da construção civil se concentra para o reparo e restauração das estruturas, visando acrescer sua vida útil [13, 14]. Todavia, a nível de projeto estrutural, não se sabe qual é o incremento de custo para níveis de desempenho superiores ao mínimo, ou seja, para incremento da VUP. Logo, o presente artigo visa dimensionar uma mesma estrutura, de uma mesma edificação hipotética, para os 3 níveis de desempenho apresentados em norma, utilizando as 4 classes de agressividade ambiental da ABNT NBR 6118 [3], totalizando 12 projetos, a fim de verificar o incremento de materiais na composição do sistema. A influência do impacto do nível de desempenho no quantitativo do projeto das estruturas de concreto armado se fundamentou na análise do volume de concreto e consumo total do aço das armaduras.

As variáveis incorporadas em cada projeto foram: espessura de cobertura das armaduras e resistência à compressão do concreto, no caso dos parâmetros de durabilidade; e a magnitude das ações variáveis – incluindo o vento – e seus respectivos coeficientes de ponderação, no caso dos parâmetros de segurança e dimensionamento estrutural.

2. Programa experimental

Na sequência foram apresentados os critérios e parâmetros adotados nos 12 projetos estruturais desenvolvidos.

2.1 Projeto-base

O objeto de estudo é um projeto arquitetônico de uma edificação residencial, contendo nove pavimentos. Do total, 8 pavimentos são tipo e um pavimento é o térreo. Cada pavimento tipo tem área de 255,62 m², para 4 unidades individuais com dois dormitórios, sala, cozinha, área de serviço e banheiro, conforme a Figura 1. No térreo encontram-se as áreas de vivência, circulação e espaços comerciais, contendo a mesma área dos demais pavimentos. A estrutura em concreto armado é composta de lajes maciças, vigas retangulares com vãos de dois a seis metros, com pé-direito de 2,95 m entre pavimentos. O posicionamento dos pilares foi analisado e definido de modo que contribuíssem na rigidez da edificação. Sobre as vigas, foram admitidas as cargas oriundas de paredes de alvenaria, com função de vedação, de espessura de 19 cm e 14 cm para paredes externas e internas, respectivamente. A estrutura foi calculada com o auxílio de programa computacional comercial de simulação estrutural,

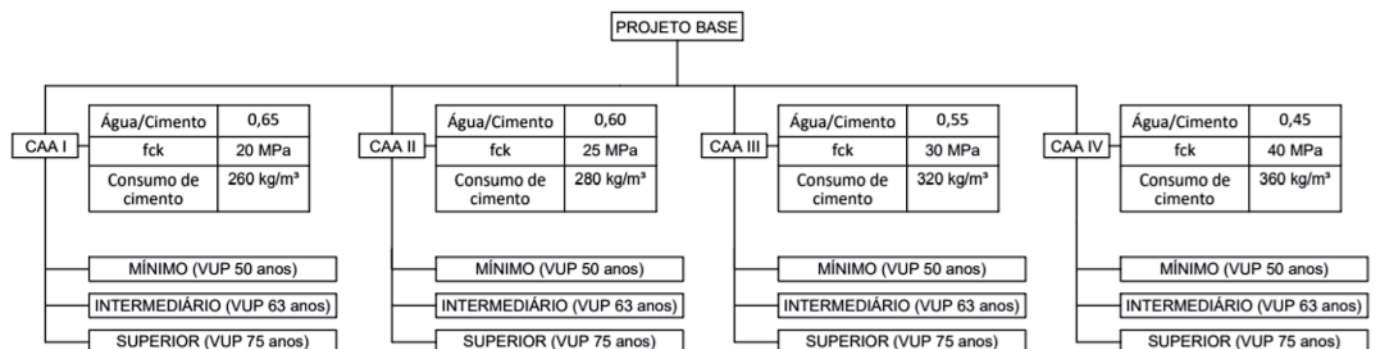


Figura 3
Fluxograma de projeto

Tabela 1

Valores de cargas verticais propostas para uma vida útil mínima, intermediária e superior de durabilidade para edificações residenciais

Tipo	Descrição	Carga (kN/m ²)		
		VUP (anos)		
		50	63	75
Edifícios residenciais	Dormitórios, sala, copa, cozinha e banheiro	1,50	1,55	1,57
	Despensa, área de serviço e lavanderia	2,00	2,05	2,09
Escadas	Com acesso ao público	3,00	3,08	3,10
	Sem acesso ao público	2,50	2,26	2,61
Terraços	Sem acesso ao público	2,00	2,06	2,09
	Com acesso ao público	3,00	3,08	3,13
	Inacessível às pessoas	0,50	0,51	0,52

o Eberick® versão 10, sendo possível extrair o quantitativo de materiais de cada projeto.

No dimensionamento dos elementos estruturais, buscou-se o grau de aproveitamento próximo aos 100%. Para as armaduras principais, foi adotado aço tipo CA-50 ao passo que, para os estribos, foi empregado aço tipo CA-60. Os 12 projetos estruturais foram elaborados sobre uma mesma concepção arquitetônica, mantendo-se o posicionamento dos elementos estruturais e as áreas de utilização pré-definidas, conforme Figura 2. Os modelos de cálculo foram mantidos inalterados.

2.2 Procedimento

Para cumprir com o propósito do trabalho, o projeto-base foi dimensionado para cada uma das quatro classes de agressividade ambiental (CAA) definidas pelas ABNT NBR 6118 [3] e ABNT NBR 12655 [11]. As variáveis de projeto foram a resistência à compressão, o cobrimento das armaduras e a magnitude das cargas de uso e vento. Para uma mesma CAA, realizou-se o dimensionamento para cada um dos três níveis de desempenho praticado pela ABNT NBR 15575 [1], sendo eles o mínimo, intermediário e superior. O fluxograma da Figura 3 evidencia o procedimento empregado.

2.3 Carregamentos admitidos

Considerando que não haja alterações na edificação, admitiu-se que o peso próprio da estrutura não se altera ao longo do tempo, sendo constante. Para as cargas de uso, tomou-se como base Bo-

Tabela 2

Velocidade básica do vento para todas as VUP

VUP (anos)	Velocidade básica do vento (v ₀)		
	50	63	75
S1	1,00	1,00	1,00
S2	0,95	0,95	0,95
S3	1,00	1,04	1,06
v ₀ (m/s)	45,00	46,80	47,70

lina e Tutikian [8], que determinaram os coeficientes de majoração das cargas acidentais de uma edificação quando a vida útil pretendida é de 63 e 75 anos, ou seja, o nível intermediário e superior de desempenho. A Tabela 1 evidencia os valores das ações variáveis para cada VUP praticadas pela ABNT NBR 15575 [1].

A definição da velocidade básica do vento admitida nos projetos foi feita com base na ABNT NBR 6123 [6]. Para o fator topográfico S1, adotou-se uma edificação com relevo plano, onde o fator é igual a 1. Para o fator S2, que considera a rugosidade do terreno e dimensões da edificação, o empreendimento foi avaliado como classe B, pois apresentou maior e menor dimensão frontal de incidência do vento entre 20 m e 50 m, e categoria V, referente a terrenos cobertos por obstáculos numerosos grandes, altos e pouco espaçados, com o fator igual a 0,95. Já o fator estatístico S3, tomando-se como base que o uso da edificação é residencial, foi admitido como sendo igual a 1. Para períodos superiores a 50 anos, a ABNT NBR 6123 [6] apresenta no anexo B um método estatístico que propõe correções do fator S3 de acordo com o período de retorno da rajada de vento

Tabela 3

Parâmetros de dimensionamento estrutural à durabilidade para uma VUP de 50, 63 e 75 anos

CAA	VUP (anos)	I			II			III			IV		
		50	63	75	50	63	75	50	63	75	50	63	75
Laje	C	20	25	30	25	35	40	35	45	50	45	55	65
	CR	C20	C25	C30	C20	C35	C40	C30	C40	C40	C40	C50	C50
	AC	0,65	0,60	0,60	0,60	0,50	0,50	0,55	0,45	0,40	0,45	0,40	0,40
	CC	260	280	280	280	300	340	320	340	360	360	360	380
Viga/Pilar	C	25	30	35	30	40	45	40	50	55	50	60	70
	CS	C20	C25	C30	C25	C35	C40	C30	C40	C40	C40	C50	C50
	WC	0,65	0,60	0,60	0,60	0,50	0,5	0,55	0,45	0,40	0,45	0,40	0,35
	CC	260	280	280	280	300	340	320	340	360	360	360	380
Elementos em contato com o solo	C	30	30	40	30	40	45	40	50	55	50	60	70
	CS	C20	C25	C30	C25	C35	C40	C30	C40	C40	C40	C50	C50
	WC	0,65	0,60	0,60	0,60	0,50	0,45	0,55	0,45	0,40	0,45	0,35	0,35
	CC	260	280	280	280	300	340	320	340	360	360	360	380

C = cobrimento (mm); CR = classe de resistência do concreto; AC = relação água / cimento; CC = consumo de cimento (kg/m³)

Table 4

Comparison of material consumption for slabs

	CAA	I			II			III			IV		
		VUP (anos)	50	63	75	50	63	75	50	63	75	50	63
Consumo de aço (kg)	CA50	8570	8216	9950	8570	10196	11589	10259	11592	12660	11529	12259	14027
	CA60	817	1119	47	817	30	45	29	404	44	413	642	39
	Total	9387	9335	9997	9387	10227	11633	10337	11996	12704	11942	12900	14066
Variação do consumo (%)		0	-1	6,5	0	8,9	23,9	0	16,0	22,9	0	8,0	17,8
Classe do concreto		C20	C25	C30	C25	C35	C40	C35	C40	C40	C40	C50	C50
Volume concreto (m ³)		279	279,1	278,6	279	278,2	277,7	277	277,2	276,9	277,6	318,7	337,6
Variação do consumo (%)		0	0	-0,2	0	-0,3	-0,5	0	0,1	0,0	0	14,8	21,6
Consumo de aço (kgf/m ³)		33,6	33,4	35,9	33,6	36,8	41,9	37,1	43,3	45,9	43	40,5	41,7

de 3 segundos, alterando, conseqüentemente, a velocidade básica do vento extraída das isopletras, que é válida para um tempo de retorno de 50 anos. Para VUP de 63 anos e 75 anos, aplicando a norma, foi possível obter o fator S3 como, respectivamente, 1,04 e 1,06. Diante do exposto, adotando a velocidade básica do vento de 45 m/s (Região V), conforme demonstrado nas isopletras da norma, a Tabela 2 apresenta as devidas correções de projeto para os níveis de desempenho intermediário e superior.

2.4 Parâmetros de durabilidade

Para a definição dos parâmetros de durabilidade para idades superiores a 50 anos, utilizou-se o trabalho de Bolina e Tutikian [8], onde foram adotados modelos teóricos de previsão de vida útil ajustados pelos parâmetros da ABNT NBR 6118 [3] e em normas estrangeiras para a extrapolação da vida útil de 63 e 75 anos, conforme a Tabela 3. Cabe destacar que, para efeito dos projetos estruturais deste artigo, somente a espessura de cobrimento das armaduras e a classe do concreto foram influentes.

3. Resultados e discussões

3.1 Lajes

A Tabela 4 apresenta, para as quatro classes de agressividade ambiental da ABNT NBR 6118 [3], a comparação de consumo de aço e concreto para as lajes, entre os diferentes níveis de desempenho. O aumento da espessura de cobrimento das armaduras, necessá-

rio para incremento do nível de desempenho da peça, não resultou no redimensionamento da sua geometria, salvo para a CAA IV. Devido às áreas das lajes serem superiores às das vigas e pilares, esses elementos, quando houve necessidade de redimensionando, apresentou elevação considerável do consumo de concreto, chegando a mais de 20% para o desempenho superior na CAA IV. Quando há estabilização do consumo de concreto, as cargas geradas pelo acréscimo do seu peso próprio não se alteraram e não houve influência no consumo de aço. Portanto, conservou-se a mesma espessura inicial do elemento (13 cm). Uma laje com desempenho superior para CAA III tem diminuição de cerca de 15,8% da sua altura útil, quando comparada com o desempenho mínimo, influenciando no acréscimo da área de aço necessária. Lajes são peças submetidas a momentos fletores, tendo no corpo rígido fibras longitudinais sob ação de tensões de tração e compressão com magnitudes variando conforme as circunstâncias do carregamento e do elemento. Devido a baixa resistência à tração do concreto, o acréscimo da resistência à compressão do material, a fim de respeitar o parâmetro de durabilidade, não influiu consideravelmente no enrijecimento da peça nas fibras tracionadas. Devido à sua esbeltez e ao tipo de esforço submetido, as lajes foram sensíveis às alterações de carregamento. Logo, o acréscimo de carga conforme a VUP, acentuado pela aproximação da armadura em relação à linha neutra devido ao aumento da espessura de cobrimento, ocasionou o aumento da área de aço nas peças. Para a CAA III, o acréscimo de VUP para 63 anos alterou o consumo de aço em 16,0%. Comparando as condições menos severas com as mais severas, CAA I e VUP 50 anos com a CAA IV e VUP 75 anos, o

Tabela 5

Comparativo de consumo de materiais nas vigas

	CAA	I			II			III			IV		
		VUP (anos)	50	63	75	50	63	75	50	63	75	50	63
Consumo de aço (kg)	CA50	8217	8358	8368	8111	8001	8262	7878	8355	8522	8038	8738	9510
	CA60	1508	1503	1660	1505	1829	1878	1979	1863	1949	1841	2143	2389
	Total	9725	9862	10028	9616	9830	10140	9857	10218	10471	9879	10881	11899
Variação do consumo (%)		0	1,4	3,1	0	2,2	5,4	0	3,7	6,2	0	10,1	20,4
Classe do concreto		C20	C25	C30	C25	C40	C40	C40	C40	C40	C40	C50	C50
Volume concreto (m ³)		148,1	148,1	154,9	148,1	157,9	164,8	159,7	168,3	174,6	165,5	179,5	197
Variação do consumo (%)		0	0	4,6	0	6,6	11,3	0	5,4	9,3	0	8,5	19,0
Consumo de aço (kgf/m ³)		65,7	66,6	64,7	64,9	62,2	61,5	58,3	60,7	60	59,7	60,6	60,4

Tabela 6
Comparativo de consumo de materiais nos pilares

CAA	VUP (anos)	I			II			III			IV		
		50	63	75	50	63	75	50	63	75	50	63	75
Consumo de aço (kg)	CA50	6730	6934	6253	6595	6026	6016	6027	6023	6013	6023	5938	5930
	CA60	3402	3240	3220	3429	3067	3002	3061	2920	2854	2917	2773	2650
	Total	10132	10174	9473	10024	9093	9018	9137	8943	8867	8939	8712	8580
Variação do consumo (%)		0	0,4	-6,5	0	-9,3	-10,0	0	-2,1	-3,0	0	-2,5	-4,0
Classe do concreto		C20	C25	C30	C25	C40	C40	C40	C40	C40	C40	C50	C50
Volume concreto (m³)		138,2	138,2	138,2	138,2	138,2	138,2	138,2	138,2	138,2	138,2	138,2	141,0
Variação do consumo (%)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,0
Consumo de aço (kgf/m³)		73,3	73,6	68,6	72,5	65,8	65,3	65,8	64,7	64,2	64,7	63,0	60,8

consumo de aço foi 50% superior na pior condição. Dessa maneira, a escolha do nível de desempenho de uma estrutura em concreto armado pode ser decisiva nos custos da estrutura.

Porém, quando se analisa a CAA I separadamente, nota-se que o aumento do consumo de aço não ocorreu de maneira proporcional. Considerando que o carregamento aumentou com a VUP, indiferente da CAA, e que o consumo de concreto não variou para as CAA I, CAA II e CAA III, a disparidade do acréscimo de consumo de aço se deu pela redução da altura útil da peça.

3.2 Vigas

A Tabela 5 apresenta a comparação de consumo de materiais para as vigas entre os diferentes níveis de desempenho e as CAA.

Com intuito de manter o espaçamento mínimo entre barras previsto pela ABNT NBR 6118 [3], os elementos necessitaram de redimensionamento, devido a variação das espessuras úteis. É visível que, conforme o acréscimo da VUP e CAA, os critérios se tornaram mais rigorosos e as peças necessitaram de um aumento no consumo de materiais. Comparando as condições mais favoráveis e menos favoráveis, ou seja, CAA I e VUP 50 anos e CAA IV e VUP 75 anos, as di-

ferenças atingiram 33,0% para o concreto. Evidenciou-se a maior sensibilidade das lajes em relação às vigas nas condições mais severas, mesmo que os dois elementos estejam expostos à tensão de flexão.

O aumento da dimensão da peça se deu na base da seção transversal, não alterando a rigidez da peça à flexão, como no aumento da altura útil. Todavia, somada ao acréscimo da resistência característica do concreto, a maior dimensão possibilitou um enrijecimento da peça. Ao final, a taxa de aço por metro cúbico foi inferior, conforme o aumento da VUP para as CAA I e II, enquanto que para a CAA III e IV a taxa de armadura aumentou.

Porém, a diminuição nas CAA I e II foi consequência do aumento do volume de concreto. Quando analisado somente o consumo de aço, o mesmo cresceu conforme o aumento da CAA e VUP, pois o peso próprio das lajes e vigas e a carga de uso também cresceram. Combinado com o deslocamento da armadura, diminuindo a altura útil, o consumo de aço chegou a acréscimo de até 20,4% para a CAA IV para VUP 75 anos.

3.1 Pilares

A Tabela 6 apresenta, para as quatro classes de agressividade

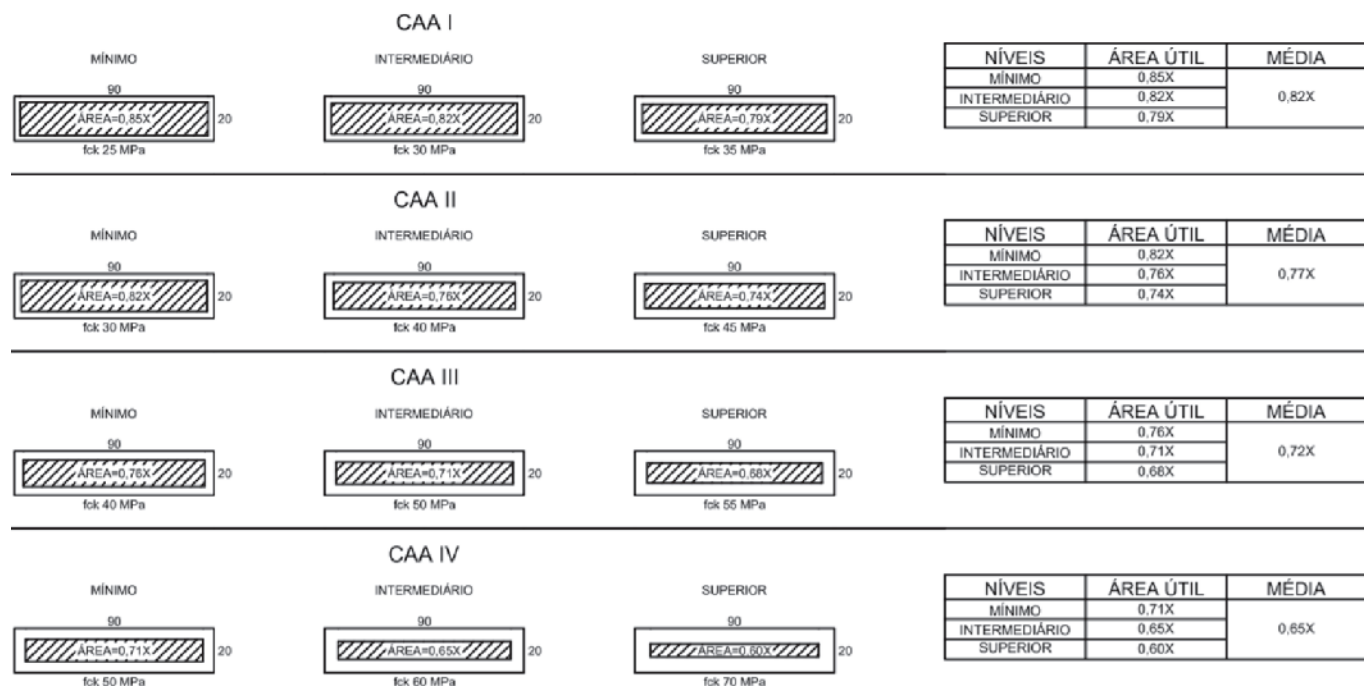


Figura 4
Comparações da influência dos parâmetros de durabilidade na área útil e resistência de um pilar

Tabela 7

Comparativo de consumos de materiais na estrutura

CAA	I			II			III			IV		
	VUP (anos)	50	63	75	50	63	75	50	63	75	50	63
Consumo de aço (kg)	29244	29371	29498	29027	29149	30792	29382	31157	32043	30760	32492	34545
Variação do consumo (%)	0	0,4	0,9	0	0,4	6,1	0	6,0	9,1	0	5,6	12,3
Volume de concreto (m ³)	565,4	565,4	571,7	565,4	574,3	580,6	574,9	583,7	589,7	581,3	631,4	675,6
Variação do consumo (%)	0	0	1,1	0	1,6	2,7	0	1,5	2,6	0	8,6	16,2

ambiental, a comparação de consumo de materiais para os pilares com diferentes níveis de desempenho.

Com o aumento da vida útil para os pilares, o cobrimento das armaduras, para uma mesma CAA, aumentou entre 10% a 33%. Foi possível observar que não houve variação de consumo de concreto, apenas da área de armaduras, evidenciando que não foi necessário o redimensionamento da seção, salvo para a CAA IV, onde foi necessário aumentar em 2,0% a área da seção do pilar, devido o aumento do cobrimento das armaduras, que atingiu 50 mm.

Essa estabilização no consumo de concreto foi viabilizada pelo acréscimo de resistência à compressão do concreto, devido aos parâmetros de durabilidade. Ainda que o cobrimento mínimo, outro critério, diminuiu a área útil da peça, o incremento da capacidade resistente dos pilares possibilitou uma redução da área de aço necessária, mesmo com o acréscimo das cargas para uma VUP de 63 e 75 anos, salvo para a CAA II, em que os parâmetros de durabilidade não atingiram um nível necessário para que o acréscimo de resistência do concreto fosse suficiente para resistir o aumento do carregamento. A Figura 4 evidencia a perda de área útil, em função de uma área total igual a X, juntamente com o acréscimo de resistência à compressão, de uma seção do pilar padrão do projeto com dimensões de 20x90 cm. Assim, para os níveis intermediário e superior, os parâmetros cobrimento e resistência mínimos acabaram por se equalizar, estabilizando o consumo de concreto. Porém, os parâmetros de durabilidade ocasionaram um maior consumo de cimento, logo maior impacto ambiental. Todavia, salienta-se que a energia gasta para produção do aço e seu impacto ambiental foram diminuídas pelo menor consumo do material.

Analisando pontos extremos, o caso de uma peça para VUP 50 anos na CAA I e outra com VUP 75 anos e CAA IV, o consumo de concreto aumentou 2,0%, enquanto o consumo de aço diminuiu 17,1%. Esse fato destacou que o aumento da resistência do concreto, ocasionado pela prescrição de durabilidade para alcance da vida útil, acabou por absorver o aumento das ações variáveis, resultando na diminuição da área de aço necessária.

3.2 Estrutura

A Tabela 7 apresenta a comparação de consumo total de materiais para a estrutura entre os diferentes níveis de desempenho e as CAA. Analisando a estrutura, se reforça o que já foi comentado: o aumento da disparidade do consumo de materiais conforme o aumento da CAA entre os níveis de desempenho. Enquanto para a CAA I, o aumento, para atingir o nível superior, de aço e do concreto se deu na ordem de 0,9% e 1,1%, respectivamente, para a CAA IV o acréscimo foi de 12,3% para o concreto e 16,2% para o aço. Dessa forma, quanto maior o nível de desempenho desejado, maior foram os custos

envolvidos na implementação da estrutura. Porém, deve-se analisar o custo benefício do sistema estrutural, visto que a VUP poderá ser acrescida em 50%, mantendo o consumo de materiais próximos a 15%, havendo a possibilidade de aumentar os períodos de manutenção do sistema, diminuindo os custos de uso da estrutura.

4. Conclusões

As principais conclusões obtidas foram:

- As normas brasileiras de projeto estrutural necessitam de uma compatibilização frente aos novos requisitos de desempenho da NBR 15575, sobretudo aplicados na VUP para níveis de desempenho intermediário e superior;
- O aumento do nível de desempenho estrutural provocou, em alguns casos, aumento das dimensões das peças, haja visto o incremento dos requisitos de durabilidade, sobretudo devido a espessura de cobrimento das armaduras;
- Em alguns casos, entretanto, notou-se a redução da área das armaduras empregadas no dimensionamento das seções. Isto decorreu pelo fato de que, apesar dos carregamentos atuantes incrementarem com o aumento do nível de desempenho pretendido, devido a necessidade de aumento da VUP, a resistência à compressão do concreto foi majorada para atender aos requisitos de durabilidade;
- Para VUP superiores à mínima, notou-se um aumento de até 16% do consumo de concreto. Além disso, teve-se a necessidade de trabalhar com concretos de até 50MPa de resistência à compressão, o que gerou um aumento global de custos;
- Quanto maior a CAA aplicada no projeto da estrutura, maior foi o impacto da escolha do nível do desempenho pretendido. No caso da CAA I, ao mudar o nível de desempenho mínimo para o superior, o consumo do aço aumentou em 0,9% e o volume de concreto em 1,1%. No caso da CAA IV, estes aumentos foram de, respectivamente, 12,3% e 16,2%;
- Com o aumento do nível de desempenho, as dimensões mínimas recomendadas pela NBR 6118 não puderam mais serem empregadas nos projetos estruturais, haja visto o aumento da espessura de cobrimento das armaduras. Para o estudo de estruturas com níveis de desempenho superiores ao mínimo, não se observou um grande incremento nas dimensões dos elementos estruturais.
- Cabe destacar que neste estudo não se levou em consideração os requisitos de segurança ao incêndio das estruturas de concreto armado, pois se tratam de exigências que não variam com a VU requerida, o que poderia alterar os resultados dos objetivos estabelecidos para este trabalho. Salienta-se que a análise das estruturas de concreto ao incêndio é obrigatória, devendo ser feita conforme NBR 15200.

5. Referências bibliográficas

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Edifícios habitacionais – desempenho Parte 1: requisitos gerais - NBR 15575, Rio de Janeiro, 2013.
- [2] LORENZI, L. S. Análise Crítica e Proposições de Avanço nas Metodologias de Ensaio Experimentais de Desempenho à Luz da ABNT NBR 15575 (2013) para Edificações Habitacionais de Interesse Social Térreas. 2013, Thesis (Doctorate) – Civil Engineering Graduate Program of Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 222 p.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto-Procedimento. - NBR 6118, Rio de Janeiro, 2014.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cargas para Cálculo de Estruturas de Edificações. – NBR 6120, Rio de Janeiro, 1980.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Ações e segurança nas estruturas. - NBR 8681, Rio de Janeiro, 2003.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Forças devidas ao vento em edificações. – NBR 6123, Rio de Janeiro, 1988.
- [7] BOLINA, F.; PERRONE, v.; TUTIKIAN, B. Discussão sobre as ações variáveis de projeto segundo os requisitos mínimo, intermediário e superior de desempenho da ABNT NBR 15575. *Revista concreto e construções*, 2015, V.79, p.65-78.
- [8] BOLINA, F.; TUTIKIAN, B. Especificação de parâmetros da estrutura de concreto armado segundo os preceitos de desempenho, durabilidade e segurança contra incêndio. *Revista concreto e construções*, 2015, V.79, p.24-38.
- [9] BOLINA, F.; TUTIKIAN, B. Especificação frente à durabilidade para atender nível superior de desempenho em elementos estruturais enterrados. *RIEM - Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 2016, V.9, n.2.
- [10] TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. In: *Ibracon. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia - Ed. Geraldo Isaia. 1ed. São Paulo: Ibracon, 2011, v.1, p.415-452.*
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Preparo, controle e recebimento – Procedimento. - NBR 12655, Rio de Janeiro, 2015.
- [12] DIAS, A.; MALITE, M.; MUNAIR, J. *Sistemas Estruturais*. Elsevier Brasil, 2015, 2ed.
- [13] GARCÍA-ALONSO, M. C.; ESCUDERO, M. L.; MIRANDA, J. M.; VEGA, M. I.; CAPILLA, F.; CORREIA, M. J.; SALTA, M.; BENNANI, A.; GONZÁLEZ, J.A. Corrosion behaviour of new stainless steels reinforcing bars embedded in concrete. *Cement and Concrete Research*, 37, p.1463–1471, 2007.
- [14] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: IBRACON, 2014.