

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Proposta de diretriz para uso de espaçadores em lajes maciças de concreto armado, visando a obtenção do cobrimento especificado pela limitação da deformação plástica da armadura durante a execução.

Ana Paula Maran

Porto Alegre
2020

ANA PAULA MARAN

**PROPOSTA DE DIRETRIZ PARA USO DE ESPAÇADORES EM LAJES
MACIÇAS DE CONCRETO ARMADO, VISANDO A OBTENÇÃO DO
COBRIMENTO ESPECIFICADO PELA LIMITAÇÃO DA
DEFORMAÇÃO PLÁSTICA DA ARMADURA DURANTE A
EXECUÇÃO.**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Doutor em Engenharia

Prof. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Dr. pela USP
Orientadora

Prof. João Ricardo Masuero
Dr. pela UFRGS
Orientador

Porto Alegre
2020

ANA PAULA MARAN

Proposta de diretriz para uso de espaçadores em lajes maciças de concreto armado, visando a obtenção do cobrimento especificado pela limitação da deformação plástica da armadura durante a execução.

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, Construção Civil e Infraestrutura, e aprovada em sua forma final pelos professores Orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 30 de março de 2020

Prof. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Dra. pela USP
Orientadora

Prof. João Ricardo Masuero
Dr. pela UFRGS
Orientador

Prof. Dra. Angela Borges Masuero
Coordenadora do PPGCI/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Angela Borges Masuero (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Jairo José de Oliveira Andrade (PUCRS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Ricardo Leopoldo e Silva França (USP)
Dr. pela Universidade de São Paulo

Dedico este trabalho aos meus maiores incentivadores,
minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, Paulo, Leda e Vinícius, por todo apoio e carinho ao longo desta e de todas as trajetórias que já percorri.

Agradeço ao meu marido Filipe Gimenez Ramos pela paciência, amor e companheirismo. Obrigada pelo apoio e pelo auxílio na parte experimental deste trabalho. Apesar da distância sempre caminhamos juntos.

Agradeço aos professores orientadores que possibilitaram a realização deste trabalho, em especial à Professora Denise Dal Molin, pelas ideias, pela serenidade transmitida e pelos esclarecimentos. Ao Professor João Masuero, por sempre ser tão solícito, por indagar, ajudar e elucidar diversas questões que surgiram ao longo deste trabalho, e por aguentar todos os agendamentos e reuniões ao longo do último ano de tese. Sou grata por aprender observando ao longo desses anos, como a boa docência é resultado de amor e dedicação ao que se faz. Os dois são meus maiores exemplos como profissionais.

Agradeço à Maria Fernanda Fávero Menna Barreto, que conheci no mestrado e virou amiga, comadre e irmã de alma, por todas as horas ao meu lado. Obrigada por todos os momentos que passamos juntas, estudando, trabalhando, viajando ou fazendo nada, sempre lado a lado. Nossa dupla nunca acabará.

Agradeço à Professora Angela Masuero, por todo o carinho e atenção dedicados a todos os alunos e por manter o espírito de união entre todos. A toda equipe NORIE (vamos time!), funcionários, bolsistas, alunos de mestrado e doutorado, por todos os momentos que vivemos juntos.

Aos colegas de pós-graduação que compartilharam tantas experiências, anseios e alegrias, em especial aos queridos Márlon, Daniel, Vanessa, Natalia, Fábio, Caroline, Laís e Fernanda e a todos que participam da salinha de materiais. Aos laboratoristas, meu agradecimento pela ajuda e pela amizade.

Às bilus (Cari, Ari e Gabi, ainda não citadas) que conheci no mestrado e levo no meu coração sempre.

Agradeço ao meu querido amigo Peito (Luís Felipe) que acompanhou os dias de ensaios experimentais e me ajudou de toda a forma possível, sempre com muita alegria e

companheirismo. Junto a ele, agradeço todos da equipe do escritório Proten por me acolherem em momentos de dúvida.

À minha família porto-alegrense que me ofereceu abrigo durante esses anos de idas e vindas, fazendo com que me sentisse em casa. Dona Gema, Emília e Eduarda, muito obrigada.

À oportunidade única que tive de fazer parte do NORIE, que me recebeu de portas abertas e me fez descobrir uma carreira. Quem passa pelo NORIE leva consigo a importância da convivência com os colegas e do contato com professores tão prestativos. Sou muito grata pela experiência que me permitiu enxergar diferentes vertentes da engenharia e da pesquisa e de conhecer pessoas tão especiais.

Agradeço à CAPES e ao CNPq pelo fomento a esta pesquisa e à banca examinadora pelas contribuições com este trabalho.

Por fim, agradeço a todos aqueles que contribuíram, de forma direta ou indireta, para que mais esta etapa fosse concluída. Toda a minha gratidão, muito obrigada!

*“Tu vens, tu vens
Eu já escuto os teus sinais”
Alceu Valença*

RESUMO

MARAN, A. P. Proposta de diretriz para uso de espaçadores em lajes maciças de concreto armado, visando a obtenção do cobrimento especificado pela limitação da deformação plástica da armadura durante a execução. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

A durabilidade das estruturas em concreto armado é fundamental para o desempenho da edificação. Como forma de assegurar a vida útil, a espessura de cobrimento é fator determinante ao retardar ou impedir o ingresso de agentes agressivos presentes no ambiente para o interior do elemento estrutural e conseqüentemente que as armaduras sejam atingidas. Considerando as diretrizes das normas brasileiras de projeto e execução de estruturas de concreto armado, nota-se uma lacuna de especificações para a garantia de espessura de cobrimento. Diversos trabalhos apontam quão ineficazes são os procedimentos usualmente adotados para a obtenção do cobrimento antes e após o lançamento do concreto na estrutura, destacando os resultados insatisfatórios para as lajes maciças. Em estudos preliminares, alguns fatores mostraram-se fundamentais para o alcance da espessura requerida quando relacionado à deformação plástica da armadura, como por exemplo, a configuração da malha, incluindo o diâmetro e a amarração das barras de aço, assim como a distribuição de espaçadores e a carga aplicada durante a execução. Através de simulações computacionais com validação experimental, as deformações plásticas das armaduras durante a execução foram verificadas como forma de estimar a perda de cobrimento durante a montagem do elemento estrutural. Resultados apontam que independentemente da composição, malhas formadas por barras de diâmetro 5,0 mm possuem deformações plásticas excessivas, tendo a possibilidade de uso somente para abertura 10 cm e com todas as interseções amarradas. Malhas com diâmetro 6,3 mm precisam de cuidado em especificações com aberturas maiores de malha.

Palavras-chave: cobrimento; deformação plástica; espaçadores plásticos; distribuição de espaçadores.

ABSTRACT

MARAN, A. P. Proposta de diretriz para uso de espaçadores em lajes maciças de concreto armado, visando a obtenção do cobrimento especificado pela limitação da deformação plástica da armadura durante a execução. 2020. Thesis (Doctor of Science in Civil Engineering) – Postgraduate Program in Civil Engineering: Construction and Infrastructure, Engineering School, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

The durability of reinforced concrete structures is fundamental to the performance of the building. As a way to ensure the service life, the cover thickness is a determining factor in slowing down or preventing the ingress of aggressive agents present in the environment, into the structural element, and consequently that the reinforcement be reached by them. Considering the Brazilian standards for the design and execution of reinforced concrete structures, there is a gap in specifications to ensure cover thickness. Several works pointed out how ineffective are the procedures usually employed obtain the desired cover before and after the concreting of the structure, highlighting the unsatisfactory results for solid slabs. In preliminary studies, some factors showed to be fundamental in achieving the required cover thickness when related to the reinforcement plastic deformation, such as the mesh configuration, including the diameter and tying of the steel bars, as well as the spacer distribution and the load applied during execution. Through computational simulations, validated, the plastic deformations of the reinforcement, during the execution, were verified as a way to estimate the reduction of the concrete cover during the assembly of the structural element. Results show that regardless of the composition, meshes with a diameter of 5.0 mm have excessive plastic deformation, and their use is limited to mesh opening up to 10 cm and with all intersections tied. Meshes with a 6.3 mm diameter need care in specifications with larger mesh openings.

Key-words: concrete cover; plastic deformation; plastic spacers; spacer distribution.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	OBJETIVOS	25
1.1.1	Objetivo Geral.....	25
1.1.2	Objetivos Específicos	25
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	26
1.3	DELIMITAÇÕES	27
2	DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS	28
2.1	AGRESSIVIDADE AMBIENTAL	30
3	COBRIMENTO DA ARMADURA	37
3.1	ESPECIFICAÇÕES NORMATIVAS	41
3.2	ESPAÇADORES	56
3.2.1	Tipos de espaçadores	57
3.3	FATORES INFLUENTES NA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA DAS BARRAS.....	60
3.3.1	Montagem e configuração da armadura.....	60
3.3.2	Posicionamento do espaçador	64
3.3.3	Distribuição de espaçadores.....	66
3.4	OUTROS FATORES.....	70
4	ESTUDO PRELIMINAR PARA PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO.....	77
4.1	CARACTERÍSTICAS DA OBRA	77
4.2	INTERVENÇÕES EM OBRA	81
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
5	SIMULAÇÃO DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA DA ARMADURA FRENTE À APLICAÇÃO DE CARGA DE EXECUÇÃO	94
5.1	PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	95
5.1.1	Configurações de malha de armadura.....	96
5.1.2	Afastamento entre Espaçadores	100
5.1.3	Cargas estimadas.....	105
5.2	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E AFERIÇÃO.....	106
5.2.1	Rótulas Plásticas	108
5.2.2	Amarração da Malha.....	116
5.2.3	Modelagem da malha.....	118

5.3	SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL	124
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	129
6.1	SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL E AFERIÇÃO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	129
6.2	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	135
6.2.1	Definição dos níveis de controle para deformação plástica das armaduras.....	135
6.2.2	Mapeamento do comportamento das malhas de armadura.....	138
6.2.2.1	Malhas compostas por diâmetro 5,0 mm	139
6.2.2.2	Malhas compostas por diâmetro 6,3 mm	147
6.2.2.3	Malhas compostas por diâmetro 8,0 mm	153
6.2.3	Panorama geral de cobertura e controle rigoroso de execução.....	158
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	166
7.1	CONCLUSÕES	166
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	168
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	169
	APÊNDICE A:	177
	APÊNDICE B:	181
	APÊNDICE C:	184
	APÊNDICE D:	187

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Contextualização da pesquisa	24
Figura 2: Espessura de cobrimento de armadura: (a) apoios de armadura para obtenção de cobrimento; (b) espessura de cobrimento em vigas; (c) posicionamento de espaçadores em lajes.	38
Figura 3: Efeito da espessura de cobrimento: (a) cobrimento especificado; (b) redução da espessura (redução da durabilidade); (c) aumento da espessura (redução da capacidade estrutural).....	40
Figura 4: Especificações normativas de espessura de cobrimento com tolerâncias de execução.	56
Figura 5: Espaçadores cimentícios (a) posicionamento na fôrma; (b) espaçador cimentício. .	58
Figura 6: Espaçadores plásticos: (a) circular; (b) pontual; (c) pontual com fixação; (d) centopeia.	59
Figura 7: Tráfego de operários e equipamentos durante a execução de lajes maciças: (a) execução de nivelamento do concreto; (b) e (c) lançamento do concreto fresco; (d) operário próximo ao espaçador durante a execução; (e) movimentação de mangote para lançamento do concreto; (f) fluxo de operários	63
Figura 8: Uso inadequado de espaçadores (a) espaçador multiapoio amarrado de forma inadequada na armadura do pilar; (b) espaçador multiapoio disposto de forma contrária no fundo da viga	65
Figura 9: Elementos estruturais com falha no uso do espaçador: (a) fôrma de viga sem espaçadores; (b) área da malha de laje sem espaçadores; (c) fôrma de viga sem espaçadores laterais.....	66
Figura 10: Especificação de distribuição de espaçadores por norma: (a) distribuição de espaçadores para malha composta por barras individuais; (b) distribuição de espaçadores para malhas compostas por barras soldadas	68
Figura 11: Influência do desnivelamento das fôrmas na espessura de cobrimento: (a) falha de nivelamento das chapas da fôrma; (b) abaulamento das chapas	71
Figura 12: Espaçadores com má qualidade comercializados	74
Figura 13: Esmagamento de espaçador: (a) esmagamento do espaçador cadeirinha; (b) esmagamento do espaçador multiapoio.....	74
Figura 14: Desempenho do espaçador quanto à fixação: (a) espaçador deslocado; (b) espaçador tombado; (c) espaçador deslocado.....	75

Figura 15: Influência da instalação de eletrodutos na espessura de cobrimento (a) instalação de caixas de passagem de eletrodutos (b) desenho esquemático da influência da instalação no cobrimento	76
Figura 16: Modelo de configuração das lajes onde foi proposta a intervenção de distribuição de espaçadores	78
Figura 17: Posicionamento da armadura nas lajes.....	78
Figura 18: Espaçador contínuo utilizado na obra	79
Figura 19: Padrão de distribuição de espaçador multiapoio adotado na obra	81
Figura 20: Intervenções realizadas na obra	81
Figura 21: Intervenções propostas em cada pavimento.....	82
Figura 22: Lajes com distribuição do espaçador pontual.	82
Figura 23: Padrão de amarração observado em obra durante levantamento em campo (a) amarração em nós diagonais da malha; (b) amarração no perímetro da malha; (c) distância de amarração (80 cm); (d) desenho esquemático para amarração da malha de armadura	83
Figura 24: Amarração proposta pela prerrogativa normativa: (a) distância de amarração de 30 cm; (b) padrão de amarração em diagonais	84
Figura 25: Distribuição de espaçadores contínuos em malha 10x10 cm: a) 40 cm; b) 60 cm.	84
Figura 26: Distribuição de espaçadores pontuais em malha 10x10 cm:(a) 30 cm;(b) 60 cm;(c) 100cm	85
Figura 27: Intervenção de distribuição de espaçadores pontuais: (a) 30 cm; (b) 60 cm; (c) 100 cm	86
Figura 28: Pacômetro digital	86
Figura 29: Influência do espaçamento dos espaçadores do tipo pontual no cobrimento obtido.	90
Figura 30: Influência do tipo de espaçador e do padrão de distribuição no cobrimento obtido.	93
Figura 31: Fluxograma programa experimental	94
Figura 32: Parâmetros de simulação do experimento.....	96
Figura 33: Malhas de armadura para simulação computacional	97
Figura 34: Etapas de amarração: (a) malha a ser amarrada; (b) pontos de amarração em todo perímetro; (c) formação de diagonais de amarração com distância máxima de 50 cm.....	98
Figura 35: Amarração das barras para as malhas de simulação	99

Figura 36: Distribuição de espaçadores alinhados para malha 10x15: a) máximo de 40 cm; b) máximo de 60 cm; c) máximo de 75 cm; d) máximo de 100 cm, com amarração a cada 50 cm	101
Figura 37: Etapas de distribuição de espaçadores em padrão escalonado total: (a) colocação de espaçadores no afastamento desejado na primeira barra; (b) formação de diagonais; (c) padrão de distribuição escalonado total.....	102
Figura 38: Distribuição de espaçadores para malha 10x15: a) máximo de 40 cm; b) máximo de 60 cm; c) máximo de 75 cm; d) máximo de 100 cm, com amarração a cada 50 cm.....	103
Figura 39: Distribuição de espaçadores: a) máximo de 40 cm; b) máximo de 60 cm; c) máximo de 75 cm; d) máximo de 100 cm, com distribuição alternada.....	104
Figura 40: Aplicação de carregamento em função da mão de obra: (a) um operário próximo do espaçador; (b) dois operários próximos do espaçador.....	106
Figura 41: Fluxograma de processamento da simulação computacional	107
Figura 42: Comportamento da seção em regime elástico e de plastificação; (a) regime elástico; (b) plastificação inicial; (c) plastificação quase total	108
Figura 43: Divisão da seção da barra de armadura para análise de comportamento.....	110
Figura 44: Relação momento/curvatura para barra de aço diâmetro 6,3 mm.....	111
Figura 45: Refinamento da barra e aplicação de rótulas plásticas.....	112
Figura 46: Aparato para ensaio de deslocamento de barra de aço: (a) Aparato suspenso por suporte de elevação; (b) Vista superior do aparato; (c) Vista frontal do aparato.	113
Figura 47: Etapas de edição para amarração de malha no software SAP2000: (a) juntas das barras após desconexão dos nós; (b) edição das juntas para simulação de barras amarradas e independentes	117
Figura 48: Simulação da malha quanto à amarração	118
Figura 49: Restrição dos vínculos aplicados na malha de simulação.....	119
Figura 50: Refinamento da malha em torno do espaçador de interesse.	119
Figura 51: Análise de contato com a fôrma.....	120
Figura 52: Pontos de medição de deformação e rótulas plásticas ativadas	121
Figura 53: Comparação de comportamento de malha 20x20 cm, diâmetro 5,0 mm, padrão de distribuição escalonado total a cada 100 cm para diferentes amarrações: (a) malha totalmente amarrada; (b) malha parcialmente amarrada	122
Figura 54: Malha 20x20 cm, parcialmente amarrada, Ø 5 mm, com carga correspondente a dois operários.	123
Figura 55: Configurações para simulação experimental	124

Figura 56: Espaçadores confeccionados para simulação experimental (30 ± 1 mm).....	126
Figura 57: Distribuição de espaçadores: (a) distribuição 100 cm escalonado total; (b) distribuição 60 cm escalonado total; (c) distribuição 60 cm escalonado intercalado; (d) distribuição 60 cm alinhado.....	127
Figura 58: Carga de ensaio: (a) extensão de aplicação de carga; (b) aplicação com plataforma auxiliar.....	128
Figura 59: Relação entre deformação plástica e variáveis controladas de simulação experimental	132
Figura 60: Curvatura de barra gerada pela aplicação de carga (a) afastamento entre espaçadores de 40 cm; (b) afastamento entre espaçadores de 100 cm	142
Figura 61: Comparação de ativação de rótulas plásticas entre malhas com diferentes diâmetros: (a) malha com barras de aço com diâmetro 8,0 mm; (b) malha com barras de aço com diâmetro 5,0 mm.....	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação entre classe de agressividade com características do concreto	31
Tabela 2: Especificações de cobrimento NBR 6118	41
Tabela 3: Coeficientes de variação para espessura de cobrimento.....	43
Tabela 4: Especificação de espessura de cobrimento EHE 08	45
Tabela 5: Especificação de espessura de cobrimento DIN 1045-1	46
Tabela 6: Especificação de espessura de cobrimento AS 3600.....	47
Tabela 7: Especificação de espessura de cobrimento NZ 3101-1	48
Tabela 8: Especificação de espessura de cobrimento ACI 318.....	48
Tabela 9: Recomendações para concreto armado ou protendido para vida útil de 50 anos BS 8500-1.....	49
Tabela 10: Especificação de espessura de cobrimento para requisitos de durabilidade IS 45650	
Tabela 11: Especificação de espessura de cobrimento para requisitos de resistência ao fogo IS 456	51
Tabela 12: Especificação de espessura de cobrimento UNIT 1050	52
Tabela 13: Especificação de espessura de cobrimento UNIT 1050	52
Tabela 14: Especificação de espessura de cobrimento CBH 87.....	52
Tabela 15: Especificação de espessura de cobrimento E 060	53
Tabela 16: Comparativo de especificações de cobrimentos para lajes maciças em diferentes normas	54
Tabela 17: Distribuição de espaçadores	67
Tabela 18: Características da obra para estudo preliminar.....	77
Tabela 19: Consumo de espaçadores e distância média em relação a especificação SINAPI .	87
Tabela 20: Cobrimentos medidos para padrão de distribuição de espaçadores pontuais escalonados a cada 60 cm para comparação diferentes amarrações de armadura.....	88
Tabela 21: Cobrimentos medidos com diferentes distribuições de espaçadores do tipo pontual.	89
Tabela 22: Análise de variância (ANOVA) para distribuição de espaçador pontual a cada 30 cm, 60 cm e 100 cm.....	90
Tabela 23: Cobrimentos medidos com diferentes distribuições de espaçadores do tipo contínuo.	91

Tabela 24: Análise de variância para distribuição de espaçadores contínuos de 40 cm e 60 cm.	92
Tabela 25: Análise de variância (ANOVA) para comparação entre espaçador pontual e contínuo com mesma distribuição (60 cm).	92
Tabela 26: Valores de média, desvio-padrão e coeficiente de variação para espaçadores diferentes com mesma distribuição	93
Tabela 27: Propriedades das Rótulas Plásticas através de estimativa calculada	112
Tabela 28: Deformações de ensaio experimental de aferição	114
Tabela 29: Aferição entre deformações experimentais e computacionais com uso de rótulas plásticas originais de análise	115
Tabela 30: Aferição entre deformações experimentais e computacionais com uso de rótulas plásticas alteradas	115
Tabela 31: Propriedades das Rótulas Plásticas através de aferição.....	116
Tabela 32: Propriedades de simulação computacional.....	118
Tabela 33: Tensão de Escoamento das barras utilizadas nos ensaios experimentais	125
Tabela 34: Máxima deformação permanente (em mm) apontada em malhas simuladas experimentalmente.....	130
Tabela 35: Análise de variância (ANOVA) para comparação entre variáveis de malha de armadura com barras de diâmetro 5,0 mm em simulação experimental	131
Tabela 36: Comparação entre deformações permanentes em simulações experimentais de Maran (2015) e os realizados nesta tese	132
Tabela 37: Comparativo de deformações plásticas (mm) para simulação experimental e computacional.....	133
Tabela 38: Comparativo de deformações plásticas (mm) para simulação experimental e computacional (continuação).....	134
Tabela 39: Níveis de controle para tolerância de deformação plástica da armadura	137
Tabela 40: Deformações plásticas (mm) para malhas Ø 5,0 mm com amarração total e carga tipo 1	140
Tabela 41: Comparativo entre deformações plásticas para diferentes diâmetros, malhas totalmente amarradas e carregamento do tipo 1	143
Tabela 42: Deformações plásticas (mm) para malha 10x10 cm com Ø 5,0 mm, amarração total e carga 2, para análise de configuração com $\Delta_a \leq 2,0$ mm em padrão escalonado total	144

Tabela 43: Deformações plásticas (mm) para malhas 10x15 cm com Ø 5,0 mm, amarração total e carga 2, em padrão escalonado total, para análise de configurações com $2,0 < \Delta a \leq 4,0$ mm	145
Tabela 44: Deformações permanentes (mm) para malhas Ø 6,3 mm, com amarração total e carga 1.....	148
Tabela 45: Deformações plásticas (mm) para malhas com Ø 6,3 mm, amarração total e carga 2, para análise de composições com $\Delta a \leq 2,0$ mm em padrão escalonado intercalado.....	150
Tabela 46: Deformações permanentes (mm) para malhas Ø 6,3 mm, com amarração parcial e carga 1.....	151
Tabela 47: Deformações plásticas (mm) para malhas com Ø 6,3 mm, abertura 15x15, amarração total e carga 2, para análise de composições com $2,0 \leq \Delta a \leq 4,0$ mm em padrão escalonado intercalado	152
Tabela 48: Deformações permanentes (mm) para malhas Ø 8,0 mm, com amarração total e carga 1.....	154
Tabela 49: Deformações permanentes (mm) para malha 20x20 com barras Ø 8,0 mm, com amarração parcial e carga 1	155
Tabela 50: Deformações permanentes (mm) para malhas com Ø 8,0 mm, com amarração parcial e carga 2.....	156

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação de agressividade ambiental normativa	30
Quadro 2: Indicação de normas para classes de agressividade ambiental.....	33
Quadro 3: Proposição de classificação de agressividade ambiental.....	36
Quadro 4: Análise qualitativa em relação ao nível de controle de execução de cobrimento ...	43
Quadro 5: Uso de espaçadores no Vale do Taquari.....	65
Quadro 6: Classificação dos espaçadores.....	73
Quadro 7: Panorama de uso de espaçadores e composição de malha para $\Delta_a \leq 2,0$ mm.....	159
Quadro 8: Panorama de uso de espaçadores e composição de malha para $2,0 < \Delta_a \leq 4,0$ mm	159
Quadro 9: Panorama de uso de espaçadores e composição de malha para $4,0 < \Delta_a \leq 9,0$ mm	160
Quadro 10: Panorama simplificado para uso de espaçadores e composição de malha, considerando níveis de controle de deformação plástica.....	162
Quadro 11: Etapas de controle de execução com foco no cobrimento de armadura.....	165

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – *American Concrete Intitute* (Instituto Americano de Concreto)

ANOVA – Análise de variância

AS – *Australian Standard* (Norma Australiana)

BS – *British Standard* (Norma Britânica)

CBH – Norma Boliviana

CEB – *Comité Euto-Internacional du Béton* (Comitê Euro-Internacional do Concreto)

CEN – *European Committee dor Standardization* (Comitê Europeu de Normalização)

CV – Coeficiente de Variação

DIN – *Deutsches Institut für Normung* (Instituto Alemão para Normalização)

EHE – *Instrucción Española del Hormigón Estructural* (Instrução Espanhola de Concreto)

IS – *Indian Standard* (Norma Indiana)

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

NZS – *New Zeland Stardard* (Norma Neozelandesa)

SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UNIT – Norma Uruguaia

1 INTRODUÇÃO

A durabilidade das edificações de concreto armado está diretamente relacionada, dentre outros fatores, ao cobrimento de armadura. A principal função do cobrimento é criar uma barreira de proteção das barras de aço, evitando a ação direta do ambiente agressivo ao servir como proteção mecânica, química e física. Dentro dessa premissa, atingir um cobrimento adequado auxilia na obtenção da vida útil, pois evita a deterioração e consequente corrosão das armaduras em longo prazo (CLARK *et al.*, 2007; BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014; MEDEIROS *et al.*, 2017; GUZMÁN e GÁLVEZ, 2017; CUI e ALIPOUR, 2018; DEVI, 2018).

Os esforços para desenvolvimento de modelos probabilísticos de previsão de vida útil, com objetivo de verificar o desempenho da edificação por meio de análise de confiabilidade de diferentes aspectos (ANDRADE, 2001; NOORTWIJK e FRANGOPOL, 2004; LORENSINI, 2006; POSSAN, 2010), além da indicação normativa de vida útil mínima das estruturas (ABNT NBR 15575, 2013), já são considerados um grande avanço para o estudo de durabilidade.

Apesar dessa evolução, o cobrimento de armadura, que é ponto essencial, continua negligenciado na concepção de projeto e, principalmente, na execução dos elementos estruturais. A especificação da espessura de cobrimento e a durabilidade são associadas por diversas normas, como NBR 6118 (ABNT, 2014), DIN 1045-1 (2008), EHE-08 (2008), BS 8500-1 (2006), UNIT 1050 (2005), CBH 87 (1987). Todavia, a maioria dos códigos não indica diretrizes para a execução de estruturas com foco no cobrimento de armadura, como quantidade e distribuição dos espaçadores.

Com a falta de exigência normativa, valores insatisfatórios de cobrimento são recorrentes. Diversas pesquisas apontam que o cobrimento de armadura especificado em projeto, mesmo considerando as tolerâncias normativas, não é alcançado após a execução do elemento estrutural (MARAN *et al.* 2015; PALM, 2017; MENNA BARRETO *et al.* 2018; OLIVEIRA, 2018, entre outros).

Campos (2013), em vistoria de oito obras com estrutura convencional em concreto armado na cidade de Porto Alegre/RS, descreve que em um panorama geral, 44% dos valores antes da concretagem encontravam-se abaixo do valor de cobrimento nominal, sendo esse percentual acrescido para 50% após a concretagem. As lajes correspondem ao elemento estrutural mais prejudicado no período de tempo compreendido entre a finalização da montagem das fôrmas e

lançamento do concreto, tendo 66% de valores abaixo do cobrimento nominal de projeto após a concretagem. Ainda, diversas empresas apresentam o cobrimento em projeto em desacordo com a norma, considerando todas as reduções possíveis já na especificação, e assim, não permitindo nenhuma tolerância de execução.

Em nove obras analisadas por Silva (2012) em Porto Alegre/RS, 46% dos valores de cobrimento de armadura das medições não atenderam o valor de cobrimento estabelecido no projeto estrutural. Neste estudo, as lajes também apresentam valores críticos, onde todos os casos medidos no meio dos vãos tiveram os valores de cobrimento inferiores ao indicado em projeto.

Weber (2014) verificou, em dez obras localizadas no Vale do Taquari/RS, que durante a medição do cobrimento nas fôrmas 50% dos valores não atendiam a espessura projetada e após o lançamento do concreto esse percentual ascendeu para 60%. O autor relaciona esse resultado ao deslocamento da armadura, que pode ocorrer devido à pressão exercida pelo concreto quando inserido na fôrma, somado à circulação dos operários antes e durante a concretagem sobre a armadura, destacando ainda a falta de espaçadores.

Palm (2017) também evidencia que em análise de diferentes pavimentos em obra localizada em Porto Alegre/RS, os cobrimentos médios encontrados após a concretagem dos elementos são inferiores aos cobrimentos medidos antes da concretagem, reforçando a importância de parâmetros de tolerância de execução em norma. Sem interferência na colocação dos espaçadores, nem metade das medições atingem o intervalo entre o cobrimento nominal em projeto e o cobrimento mínimo. Nestes casos, 37% das situações com diâmetro 5,0 mm e 25% com diâmetro 6,3 mm estão fora das especificações de norma, inclusive no intervalo entre o cobrimento mínimo e a tolerância de execução de 10 mm, mostrando grande dificuldade para obtenção dos valores propostos.

Menna Barreto *et al.* (2018), em levantamento de cobrimento em 9 obras nas cidades de Porto Alegre/RS e Cuiabá/MT, mostram que todas as obras possuíam problemas na obtenção de cobrimento. Para lajes, a probabilidade de ocorrência de medidas insatisfatórias, encontradas abaixo do cobrimento mínimo de norma, varia entre 39% a 89%. Para vigas, especialmente no fundo, a probabilidade de valores não condizentes com a norma varia de 55% a 100%. A variabilidade para esses elementos pode ser associada aos diferentes diâmetros de armadura ou ao maior tráfego de operários. Por fim, as medições das quatro faces dos pilares apresentaram

espessuras de cobrimento abaixo do normalizado entre 17% a 40%, sendo relacionadas ao possível desalinhamento entre ligação de armaduras para diferentes pavimentos.

Em análise de diferentes pavimentos de uma mesma obra em Porto Alegre/RS, Oliveira (2018) ressalta os resultados insatisfatórios de cobrimento quando a medição das espessuras é realizada em obra sem nenhuma intervenção de pesquisa. Para este caso, 66% dos cobrimentos mensurados estão dentro da tolerância de execução de 10 mm, e somente 37% ficam de acordo quando considerada a tolerância de 5 mm. Após intervenção nas distribuições de espaçadores, os resultados satisfatórios de cobrimento considerados para uma tolerância de execução de 10 mm sobem para 92%, quando utilizado um espaçamento entre espaçadores de 60 cm, considerando análise geral de malhas com diâmetro 6,3 e 8,0 mm.

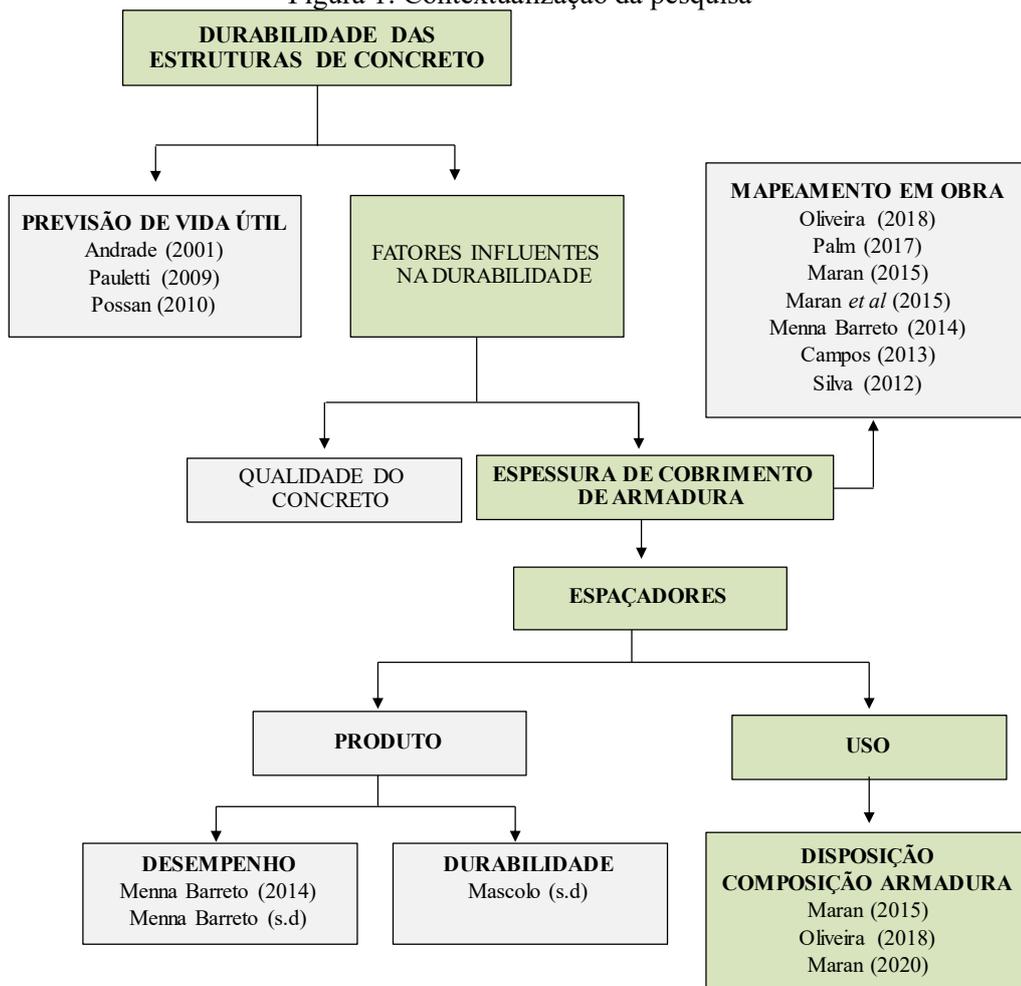
Nenhuma das pesquisas descritas anteriormente (SILVA, 2012; CAMPOS, 2013; WEBER, 2014; PALM, 2017; OLIVEIRA, 2018; MENNA BARRETO *et al.* 2018) encontrou no canteiro de obra um plano de uso e distribuição dos espaçadores, independentemente de a empresa possuir certificação de qualidade ou alegar possuir controle rigoroso de execução. Essa realidade presente na execução, onde os cobrimentos mínimos não são alcançados, pode estar associada à falta de diretriz de uso dos espaçadores em normas de projeto e de execução, uma vez que não há menção de forma de distribuição dos espaçadores ou relação entre diâmetro de armadura e espaçamento entre os espaçadores.

Nota-se que apesar de trabalhos como o de Palm (2017) e Oliveira (2018) buscarem o controle durante o processo de montagem das armaduras e aplicação dos espaçadores, os resultados para cobrimento mínimo não são totalmente satisfatórios. Esse fenômeno pode ser decorrente do processo utilizado na execução das lajes maciças, permitindo, por exemplo, o tráfego de operários e equipamentos sobre a malha.

Para atingir um cobrimento adequado devem-se considerar as técnicas construtivas, o controle de execução e as prescrições normativas. Além disso, avaliar os diversos fatores que intervêm na espessura de cobrimento final, como por exemplo, o afastamento da malha, o diâmetro das barras da armadura, a carga acidental correspondente à execução e a distribuição dos espaçadores (MARAN, 2015). Todos esses pontos atuam diretamente na deformação plástica das barras de aço e, conseqüentemente, afetam a espessura de cobrimento durante o processo de montagem e execução das lajes maciças.

Dentro da linha de pesquisa relacionada à durabilidade e ao desempenho da estrutura destacam-se os estudos com foco na previsão de vida útil, no comportamento dos materiais quanto à penetração de agentes agressivos e na melhoria de técnicas construtivas, desenvolvidos pelo Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE). O presente trabalho está contextualizado dentro deste tema, como mostra a Figura 1.

Figura 1: Contextualização da pesquisa



(Fonte: elaborado pela autora, 2020)

Seguindo a linha de pesquisa de desempenho das edificações com foco na durabilidade das estruturas, este trabalho busca discutir as determinações normativas e as lacunas de recomendação em relação aos espaçadores para execução de elementos estruturais. Também visa prever configurações de montagem de armadura com foco na obtenção de cobertura mínimo normativo, por meio de análise de deformação plástica das armaduras durante a execução de lajes maciças.

Desde a proposição deste tema, através da dissertação de mestrado intitulada “Análise da influência da distribuição de espaçadores na garantia da espessura de cobertura especificada

em lajes de concreto armado” (MARAN, 2015), poucos trabalhos foram encontrados dentro desta linha de pesquisa. Como mostra o relatório de busca no Apêndice A, as publicações relacionadas ao cobrimento de armadura ou à espessura de cobrimento têm abordagem principal na durabilidade, com análise para diferentes fatores de degradação como a carbonatação e a penetração de íons cloreto. Também se destaca a associação do cobrimento de armadura com a corrosão e com a resistência a altas temperaturas.

Trabalhos com análise de diferentes distribuições de espaçadores, incluindo a composição de armadura, com foco no cobrimento mínimo não foram encontrados. Fica assim justificada a necessidade de estudos relacionados à proposta de distribuição de espaçadores, considerando também a composição das armaduras, identificando quais fatores têm influência na obtenção de cobrimento de armadura na execução das estruturas.

Desta forma, discutir sobre etapas construtivas que têm relação direta com perda de cobrimento e afetam a tolerância de execução, além de entender como as decisões de projeto podem influenciar na obtenção de cobrimento em função das deformações plásticas possíveis também é primordial para o estudo de durabilidade das estruturas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é contribuir com uma diretriz para uso dos espaçadores em lajes maciças de concreto armado para obtenção da espessura de cobrimento através da análise de deformação plástica da armadura frente à carga de execução.

1.1.2 Objetivos Específicos

Em decorrência do objetivo principal da pesquisa, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) identificar fatores que possam influenciar a obtenção de cobrimento durante a execução de lajes maciças com foco nas deformações plásticas das armaduras;
- b) propor diretrizes iniciais para montagem de armadura e para distribuição de espaçadores em função de levantamentos preliminares em obra, considerando situações exequíveis;

- c) validar o processo de simulação computacional para definição de deformações plásticas, sob diferentes cenários de composição de armadura e distribuição de espaçadores, através de ensaios experimentais;
- d) indicar níveis de controle com foco na deformação plástica da armadura, com associação às tolerâncias de execução normativas, considerando demais sistemas que influenciam na perda de cobrimento;
- e) mapear conjuntos críticos de configuração de armadura e disposição de cargas para obtenção do cobrimento mínimo, com determinação de critérios de aceitação para tolerâncias de execução.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente tese possui estrutura dividida em 7 capítulos, conforme sequência a seguir.

No primeiro capítulo é apresentada uma introdução do trabalho, contemplando contextualização, a importância do tema e a justificativa pela lacuna de pesquisa, além de definir os objetivos deste trabalho e suas delimitações.

A revisão da literatura, no Capítulo 2, apresenta conceitos sobre a durabilidade da estrutura, relacionados ao cobrimento de armadura. Também se faz um apanhado das recomendações dispostas em normas internacionais para classificação da agressividade ambiental.

O capítulo 3 expõe o que é considerado cobrimento e associa a orientação de espessura de cobrimento na norma brasileira e em normas internacionais com outras variáveis e as tolerâncias de execução permitidas. São apresentados também neste capítulo os fatores que interferem na obtenção de cobrimento durante a execução da estrutura, com foco na deformação plástica, com a apresentação de dados de outros trabalhos.

No capítulo 4 é apresentado um estudo piloto de distribuições de espaçadores, comparando diferentes configurações. Outras variáveis são apontadas, como a influência da amarração das barras e do padrão de distribuição, servindo como embasamento para a definição da metodologia e permitindo um levantamento dos pontos de maior dificuldade *in loco* para a montagem de lajes.

No capítulo 5 estão descritos os métodos de simulação executados neste trabalho. São apresentados os parâmetros de simulação definidos a partir de estudos complementares dentro

desta linha de pesquisa, junto com o estudo preliminar proposto no Capítulo 4. As simulações computacionais buscam avaliar a deformação plástica das armaduras frente ao carregamento de execução e analisar a influência da perda de cobertura com as tolerâncias de execução. A fim de validar as simulações computacionais, também são propostas simulações experimentais para análise de deformação plástica e tolerâncias de simulação.

O capítulo 6 mostra os resultados de aferição entre simulação computacional e experimental realizadas sob mesmas configurações de malha, como diâmetros, distribuição de espaçadores e espessura de cobertura. Os dados de análise computacional também são disponibilizados como forma de averiguar o comportamento de diferentes malhas de armadura frente à mesma situação de carga. Neste capítulo é apresentado o mapeamento de deformação plástica das malhas, associadas aos critérios de controle de execução. A indicação de uso dos espaçadores perante as deformações é apontada neste capítulo.

O capítulo 7 apresenta as considerações finais desta tese, incluindo associação entre o panorama de configuração de malha de armadura e execução observada durante os trabalhos complementares com o mesmo foco. Junto às considerações finais, identificaram-se possíveis trabalhos futuros dentro deste tema. Por fim, as referências bibliográficas citadas ao longo do texto constam no final deste documento.

1.3 DELIMITAÇÕES

O presente trabalho delimita-se à análise de deformação plástica em malhas de armadura para lajes maciças moldadas *in loco*. As armaduras sob análise são positivas junto à face inferior, em função da durabilidade, e as barras são de mesmo diâmetro nas duas direções da malha, utilizando aço convencional CA-50 e CA-60. A análise de deformação plástica desconsidera a ineficiência das fôrmas e de espaçadores, sem possível desnivelamento ou deslocamento frente à aplicação de carga.

2 DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS

Nas primeiras décadas de 1900, a principal característica controlada em estruturas de concreto armado era a resistência média à compressão, sendo o único parâmetro das especificações de projeto (MEDEIROS, ANDRADE, HELENE, 2008). Segundo Helene (1997), no início das construções em concreto armado, a experiência dos profissionais na área e o bom senso predominavam nas decisões construtivas, sendo assim, a durabilidade acabava como uma característica subjetiva. Com o crescimento do número de estruturas com manifestações patológicas em função do envelhecimento precoce, a durabilidade também se tornou uma preocupação.

Atualmente, a durabilidade é critério importante nas especificações de projeto, materiais e métodos construtivos, estando presente nas normas de projeto de estruturas de concreto armado NBR 6118 (ABNT, 2014) e de desempenho em edificações habitacionais NBR 15575 (ABNT, 2013). No entanto, a durabilidade não é um atributo geral ou uma classificação, mas sim um resultado alcançado por meio da combinação das propriedades e especificação do concreto junto com o ambiente de serviço (MATHER, 2004).

A durabilidade é definida como a capacidade da estrutura em resistir às influências ambientais previstas e definidas no projeto, conservando sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante a vida útil (ABNT NBR 6118, 2014). A NBR 15575 (ABNT, 2013) coloca que a durabilidade se extingue quando o produto deixa de atender às funções que lhe foram atribuídas, independente se for a partir de degradação que conduz a um estado insatisfatório de desempenho ou a partir de obsolescência funcional.

A ação das condições climáticas influencia no comportamento das estruturas ao longo do tempo. A complexidade de modelagem e previsão de meios de degradação, considerando diferentes tipos de ambiente, resulta em valores com graus de incerteza e, assim, influencia na dificuldade de atender ao requisito de durabilidade nas edificações (RIBEIRO, 2014).

Tang *et al.* (2015) apontam que os principais problemas de durabilidade no concreto incluem reação álcali-agregado, ataque por sulfatos, corrosão de armaduras e ação de gelo e degelo, esta última não sendo comum em obras correntes do Brasil, e sendo a corrosão o principal meio de degradação do concreto armado. Segundo Zhang e Su (2020), através de comparação entre modelo analítico e numérico, com ensaios não destrutivos, o cobrimento da armadura protege de forma diferente as barras de aço de meio e as barras de canto do elemento estrutural,

considerando à corrosão de armadura com comportamento não uniforme e associando a abertura de fissura frente ao carregamento.

A proteção das barras de aço é proporcionada pela alcalinidade do concreto, formando uma película passivadora. Esta barreira depende da espessura de cobrimento e da qualidade do concreto (ACI 201, 2008).

Aguiar (2006) assinala como principais causas da baixa durabilidade de estruturas já executadas a falta de conhecimento dos envolvidos na construção em relação aos processos de degradação, o uso de materiais inadequados, assim como a falta de pesquisas sobre a influência de novos materiais no comportamento dos concretos. Como última possível causa, o autor aponta a falta de conhecimento dos responsáveis pela manutenção e conservação das estruturas. Apesar das indicações do autor, também cabe ressaltar que a negligência das etapas de execução também interfere na durabilidade final da estrutura, como a disposição inadequada de espaçadores ou o aparecimento de falhas de concretagem, por exemplo.

Zein-Alabideen (2001) descreve que diversos casos de estruturas com corrosão foram reportados na Arábia Saudita desde 1975. Os códigos europeus, asiáticos e americanos eram utilizados nas especificações de projeto e execução. Entretanto, no final dos anos setenta, a indústria começou a perceber as consequências do uso de códigos internacionais que não contemplavam as situações locais, como clima quente, efeitos de cloreto e sulfato e problemas de concreto usinado sem controle.

Para garantir a durabilidade da edificação, considerando a corrosão das armaduras, é necessário seguir uma estratégia que considere todos os possíveis mecanismos de degradação, adotando medidas em função da agressividade. Esta estratégia de durabilidade é dada através dos seguintes pontos: seleção de fôrmas estruturais adequadas, qualidade do concreto, adoção de espessura de cobrimento que garanta a proteção da armadura, controle de valor máximo de abertura das fissuras, definição de proteções superficiais em caso de ambientes mais agressivos e emprego de medidas de proteção das armaduras frente à corrosão (EHE 08, 2008). Junto a essas medidas, definir um plano de inspeção e manutenção preventiva também agrega no resultado de durabilidade das edificações (MEDEIROS, ANDRADE e HELENE, 2008; BARBOSA, 2009).

Para Rostam (2005), um projeto baseado na garantia de vida útil da estrutura é idealizado por meio do conhecimento de fatores que determinam o envelhecimento e a deterioração das

estruturas, ou seja, através de dados científicos e modelos matemáticos referentes à agressividade do ambiente e resistência dos materiais. A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) busca prescrever medidas mínimas para prevenção ao envelhecimento e à degradação das estruturas, considerando os mecanismos principais de deterioração relativos ao concreto e à armadura, através das classes de agressividade ambiental.

2.1 AGRESSIVIDADE AMBIENTAL

A agressividade ambiental está associada às ações físicas e químicas que atuam nas estruturas de concreto, independente das ações mecânicas, variações volumétricas de origem térmica e/ou hidráulica, entre outras (ABNT NBR 6118, 2014).

A eficiência do cobrimento depende, além da espessura, da constituição do concreto, da atmosfera que envolve a estrutura, da natureza da sollicitação mecânica a que estará sujeito, da qualidade das técnicas construtivas empregadas e do teor de cloretos, entre outros. Com tantos pontos dependentes, é necessária a associação destes itens na especificação de cobrimento (DAL MOLIN, 1988).

O estabelecimento das classes ambientais quanto à presença de agentes agressivos ocorreu na atualização da norma (ABNT NBR 6118) em 2003, marcando um grande avanço nas especificações de projeto, conforme diretrizes já estabelecidas em normas internacionais. As atualizações seguintes da norma, em 2007 e 2014, mantiveram a mesma classificação, conforme apresenta o Quadro 1. A especificação da agressividade ambiental deve ser considerada desde o projeto da estrutura, sendo requisito básico para a durabilidade da edificação.

Quadro 1: Classificação de agressividade ambiental normativa

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

^{a)} Pode-se admitir um microclima com classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).
^{b)} Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuvas em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.
^{c)} Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas

(Fonte: ABNT NBR 6118, 2014).

As edificações inseridas em ambientes rurais apresentam risco de deterioração insignificante devido à falta de fontes poluidoras e afastamento de ambiente marinho. Entretanto, estruturas presentes em ambientes industriais e/ou marinhos possuem velocidade de deterioração rápida. Quando expostas a uma atmosfera com umidade relativa alta, a probabilidade de degradação das estruturas também é maior.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) coloca que ensaios comprobatórios de desempenho da durabilidade frente à classificação de agressividade devem estabelecer os parâmetros mínimos a serem atendidos na construção de estruturas em concreto armado. Na falta destes, correlaciona-se a relação água/cimento e a resistência à compressão, permitindo que sejam adotados os requisitos mínimos da Tabela 1.

Tabela 1: Relação entre classe de agressividade com características do concreto

Concreto ^a	Tipo ^{b,c}	Classe de agressividade do ambiente			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

(Fonte: ABNT NBR 6118, 2014).

Conforme Tanesi, Da Silva e Gomes (2012), apesar da inserção da classificação, a agressividade ambiental apresentada na norma é bastante subjetiva. Não são apresentados parâmetros dos tipos de ambiente para especificação do projetista, tais como teor de cloretos, teor de sulfatos, entre outros.

Considerar somente estruturas em função do macro-ambiente não é suficiente para garantir a durabilidade em projeto de concreto armado. É preciso incluir outros fatores ambientais detalhados em torno da estrutura, meso-ambiente, e também aqueles em contato próximo do elemento estrutural, denominado micro-ambiente (ZEIN-ALABIDEEN, 2001).

A construção de pavilhão industrial em zona rural, por exemplo, é considerada como ambiente mais agressivo, sendo pertencente à classe III ou IV. Sendo assim, é coerente associar a agressividade em função do uso da edificação.

Pela NBR 6118 (ABNT, 2014), o responsável pelo projeto estrutural tem a opção de considerar classificação mais agressiva em relação ao tabelado caso possua dados relativos ao ambiente em que a estrutura será construída.

Um elemento estrutural pode estar submetido a uma ou várias classes específicas de agressividade. A ACI 318 (2019) divide os ambientes em função da ação de gelo e degelo (Classe F), da presença de sulfatos na água ou no solo (Classe S), de elementos estruturais com necessidade de baixa permeabilidade (Classe P) e construções que devam apresentar proteção à corrosão (Classe C).

A EN 206-1 (2005) classifica a agressividade ambiental separando as edificações inseridas em ambientes sem risco a ataques (X0), com risco de corrosão por carbonatação (XC), com risco de corrosão por íons cloretos (XD), com risco de corrosão por íons cloretos em ambiente marinho (XS), com ação de gelo e degelo (XF), e por fim, ambientes com risco de ataque químico (XA). Esta classificação também é atribuída para a BS 8500-1 (2006) e DIN 1045-1 (2008).

Outra normativa internacional, a EHE 08 (2008), define classes gerais de exposição, sendo exclusivamente relacionadas a processos de corrosão de armadura (I a IV). Além das classes gerais, são estabelecidas classes específicas de exposição referentes a outros processos de deterioração do concreto, como classe H para ações de gelo e degelo, classe F para presença de sais e classe E para elementos com risco de erosão. Nos casos de estrutura exposta ao ataque químico (classe Q), a agressividade é classificada em diferentes critérios.

A regulamentação australiana AS 3600 (2009), a norma indiana IS 456 (2000) e a norma neozelandesa NZS 3101-1 (2006) possuem classificação ambiental semelhante à NBR 6118 (ABNT, 2014), embora com maior número de classes.

Salienta-se a especificação de agressividade da NZS 3101-1 (2006), que traz mapas indicativos da classificação de exposição para melhor identificação da presença dos agentes agressivos. Além disso, a norma recomenda que para estruturas expostas em condições úmidas ou salinas, solo agressivo ou água subterrânea e ambiente industrial, as especificações de medidas apropriadas para garantir a durabilidade devem estar destacadas em projeto.

A norma uruguaia UNIT 1050 (2005) e a norma boliviana CBH 87 (1987) trazem recomendações mais simples, tendo somente três classes de agressividade ambiental. O resumo das especificações quanto à agressividade ambiental está disposto no Quadro 2.

Quadro 2: Indicação de normas para classes de agressividade ambiental

NORMA EUROPEIA EN 206-1:2013			
CA	Exemplos de inserção da estrutura	CA	Exemplos de inserção da estrutura
XO	Concreto simples, em todas as exposições exceto ataque químico e ciclos de gelo e degelo. Concreto armado com condição de exposição muito seca.	XS2	Estruturas permanentemente submersa em água marinha
XC1	Concreto permanentemente submerso ou dentro de edificações	XS3	Área de respingos e maré e névoa salina
XC2	Concreto submetido à ação duradoura das águas (fundações)	XF1	Estruturas de concreto verticais expostas à ação da chuva e congelamento
XC3	Concreto externo, porém, ao abrigo das chuvas, concreto interno com umidade do ar moderada ou alta	XF2	Superfícies de concreto ou estradas de concreto sujeitas ao congelamento e agentes de degelo
XC4	Concreto exposto a ciclos de molhagem e secagem	XF3	Estruturas de concreto horizontais expostas à ação da chuva e congelamento
XD1	Concretos expostos a cloretos no ar	XF4	Estruturas submetidas à zona de névoa salina, estradas e pontes sujeitas à ação de degelo
XD2	Concreto exposto a águas industriais contendo cloretos	XA1	Ambiente levemente agressivo quimicamente
XD3	Ciclos de molhagem e secagem ou expostos a névoas contendo cloretos	XA2	Ambiente moderadamente agressivo quimicamente
XS1	Estruturas próximas à zona de névoa salina	XA3	Ambiente altamente agressivo quimicamente
ACI 318:2019			
CA	Exemplos de inserção da estrutura	CA	Exemplos de inserção da estrutura
F0	Concreto não exposto às condições de gelo e degelo	-	Água (SO ₄), no solo, (SO ₄) na água, ppm (% em massa)
F1	Concreto exposto a ciclos de gelo e degelo e ocasionalmente exposto à umidade	S0	SO ₄ <0,10 SO ₄ <150
F2	Concreto exposto a ciclos de gelo e degelo e constantemente exposto à umidade	S1	0,10<SO ₄ <0,20 150<SO ₄ <1500 água oceânica
F3	Concreto exposto a ciclos de gelo e degelo e constantemente exposto à umidade e a produtos químicos de degelo	S2	0,20<SO ₄ <2,00 1500<SO ₄ <10000
C0	Concreto seco ou protegido da umidade	S3	SO ₄ >2,00 SO ₄ >10000
C1	Concreto exposto à umidade, mas não a fontes externas de cloretos	P0	Estruturas em contato com a água onde não se faz necessária baixa permeabilidade
C2	Concreto exposto à umidade e fonte externa de cloretos de químicos de degelo, sal, águas marinhas, névoa salina, respingos de maré	P1	Estruturas em contato com a água onde se faz necessária baixa permeabilidade
NORMA ESPANHOLA EHE 08:2008			
CA	Exemplos de inserção da estrutura	CA	Exemplos de inserção da estrutura
I	Não agressiva: elementos protegidos de intempéries	Qa	Ataque químico: Presença de substâncias químicas capazes de alterar o concreto em velocidade lenta
IIa	Umidade alta: elementos internos com umidade relativa > 65%; elementos externos sem cloretos e expostos à chuva (media anual > 600mm)	Qb	Ataque químico: Elementos em contato com água do mar; ambientes com presença de substâncias químicas capazes de alterar o concreto em velocidade média
IIb	Umidade média: elementos externos sem cloretos e submetidos à chuva com precipitação média anual < 600 mm	Qc	Ataque químico: Ambientes com presença de substâncias químicas capazes de alterar o concreto em velocidade alta
IIIa	Elementos estruturais marinhos, acima do nível de maré alta; Elementos externos próximos à costa (menos que 5 km)	H	Gelo e degelo: Contato frequente com água/umidade relativa no inverno > 75% probabilidade anual > 50% de alcançar ao menos uma vez temperaturas abaixo de -5°C

continua

Quadro 2: Indicação de normas para classes de agressividade ambiental (continuação)

NORMA ESPANHOLA EHE 08:2008			
CA	Exemplos de inserção da estrutura	CA	Exemplos de inserção da estrutura
IIIb	Elementos estruturais marinhos submersos permanentemente	F	Sais: Elementos destinados ao tráfego de veículos ou pedestres em áreas com mais de 5 nevascas/ano ou valor médio de temperatura abaixo 0°C (meses inverno)
IIIc	Elementos estruturais localizados em zonas de respingos	E	Erosão: Elementos submetidos a desgaste superficial; Estruturas hidráulicas (nível piezométrico abaixo de pressão de vapor de água)
IV	Elementos não impermeabilizados em contato com água (contendo cloreto) não relacionados a ambientes marinhos; Superfícies não impermeabilizadas expostas a sais de degelo		
NORMA AUSTRALIANA AS 3600:2009			
CA	Exemplos de inserção da estrutura	CA	Exemplos de inserção da estrutura
A1	Estruturas internas, estruturas nas zonas de clima árido e em zonas não industriais, imersas em solo não agressivo	B1	Estruturas sujeitas a ciclos de molhagem e secagem, em zona não estrutural e clima tropical, ou ainda, em zonas industriais de qualquer zona climática e estruturas próximas à costa marinha (1 a 50km de distância)
A2	Estruturas em zonas não industriais e de clima temperado	B2	Estruturas permanentemente submersas, estruturas afastadas em até 1km da costa marinha
C	Estruturas em zonas de respingos ou névoa salina		-
NORMA NEOZELANDESANZS 3101-1:2006			
CA	Exemplos de inserção da estrutura	CA	Exemplos de inserção da estrutura
A1	Superfície em contato com o solo protegido por uma membrana e elementos internos totalmente fechados dentro de um edifício.	C	Elementos com respingos de maré
A2	Elementos em contato com solo não agressivo e elementos internos	X1	Elementos em ambiente químico levemente agressivo
B1	Elementos sujeitos a ciclos de molhagem repetidos, em perímetro costeiro e em contato com a água	X2	Elementos em ambiente químico moderadamente agressivo
B2	Elementos em fachada costeira, sob pressão e em contato de água doce ou permanentemente submersos em água do mar	X3	Elementos em ambiente químico altamente agressivo
U	Elementos em exposição ambiental não citada		-
NORMA INDIANA IS 456:2000			
CA	Exemplos de inserção da estrutura		
Suave	Concretos protegidos das ações climáticas e agentes deletérios, exceto os presentes na zona costeira		
Moderada	Concretos expostos à ação da chuva e condensação, em contato com solo não agressivo e lençóis freáticos, permanentemente submersos e protegidos das ações da névoa salina		
Severa	Estruturas expostas a condições severas de chuva, ciclos de molhagem e secagem ou ciclos de gelo e degelo e condições extremas de condensação. Estruturas submersas em água oceânica.		
Muito severa	Concretos em contato ou submersos em solos agressivos, fumaças corrosivas, expostos à ação de névoa salina ou severas condições de gelo		
Extrema	Estruturas expostas a zonas de marés ou químicos agressivos		

continua

Quadro 2: Indicação de normas para classes de agressividade ambiental (continuação)

NORMA URUGUAIA UNIT 1050:2005	
CA	Exemplos de inserção da estrutura
Classe I	Estruturas no interior dos edifícios ou em ambientes externos de baixa umidade: não excedendo 60 % da umidade relativa por mais de 90 dias/ano.
Classe II	Estruturas externas em ambientes não agressivos, ou em contato com águas não agressivas ou em contato com solo.
Classe III	Estruturas em atmosfera agressiva industrial ou marinha, ou em contato com solos com substâncias agressivas ou com água salina ou ligeiramente ácida.
NORMA BOLIVIANA CBH 87: 1987	
CA	Exemplos de inserção da estrutura
Não severa	Estruturas no interior dos edifícios ou em ambientes externos de baixa umidade: não excedendo 60 % da umidade relativa por mais de 3 meses/ano.
Moderada	Estruturas internas com umidade elevada, em contato com água corrente e intempéries em atmosfera rural ou urbana, sem fortes concentrações de gases agressivos
Severa	Estruturas expostas a líquidos que contenham pequenas quantidades de ácidos, águas salinas ou muito oxigenadas. Em contato com solos corrosivos ou em atmosfera corrosiva, industrial ou marinha.

(Fonte: Pacheco, 2016 – adaptado)

A importância do estudo das substâncias presentes na atmosfera para a definição das características dos materiais e técnicas construtivas é ratificada através de alguns estudos. Migliavacca *et al.* (2009) assinalam a presença de sais marinhos e parcela de cloreto em avaliação da precipitação da chuva em Porto Alegre/RS e região metropolitana, podendo ser relacionados às atividades industriais na cidade. Os valores de pH da água da chuva apresentaram uma grande variação dentro de uma mesma área urbana, com registros entre 4,75 e 7,45.

Em função dos resultados encontrados por Migliavacca *et al.* (2009) e de indicações de normas internacionais com maior detalhamento, percebe-se a necessidade de diretrizes mais aprofundadas para definir o ambiente em função da presença dos agentes agressivos, além de um melhor entendimento por parte dos projetistas durante as especificações necessárias.

As classes apresentadas na NBR 6118 (ABNT, 2014) são determinadas a partir da experiência e não são baseados na modelagem de mecanismos de deterioração. O estudo mais aprofundado da exposição pode definir a classe de agressividade através do percentual de substâncias deletérias, distância da edificação da beira mar e condições de vento e topografia, por exemplo (NZS 3101, 2006; BORBA JUNIOR, 2011; CAMPOS, 2016).

Como proposição de uma nova classificação da agressividade ambiental no Brasil, Tanesi, Da Silva e Gomes (2012) indicam o Quadro 3, baseado na combinação das classes especificadas na NBR 6118 (ABNT, 2014) e no Eurocode EN 206 (2005).

Quadro 3: Proposição de classificação de agressividade ambiental

Agressividade	Tipo de exposição	Subclasses ¹
I	Risco insignificante de corrosão	1. Rural ² 2. Submerso ² 3. Ambientes internos com baixa umidade relativa
CB	Corrosão devido à carbonatação	1. Seco (Áreas internas com baixa umidade) ou permanentemente submerso 2. Úmido, raramente seco (superfície em contato constante com água, fundações) 3. Moderadamente úmido (áreas internas com umidade relativa alta e áreas externas protegidas da chuva) 4. Ciclos de molhagem e secagem
CAM	Corrosão devido a cloretos	1. Exposto a névoa salina, mas sem contato com água do mar (estrutura costeira) ³ 2. Permanentemente submersas (Estruturas marinhas) ³ 3. Zonas de repingos e maré (Estruturas marinhas) ⁴
AQ ⁵	Ataque químico	1. Levemente agressivo 2. Moderadamente agressivo ³ 3. Altamente agressivo ⁴
AND	Exposição especial não pertencente em outras classes	1. Álcali-sílica 2. Álcali carbonato 3. Concreto massa
¹ Limites especificados definidos para cada subclasse ² Classe de agressividade I da NBR 6118/2003 ³ Classe de agressividade III da NBR 6118/2003 ⁴ Classe de agressividade IV da NBR 6118/2003 ⁵ Limites específicos para SO ⁴²⁻ , Mg ²⁺ , NH ⁴⁺ , CO ₂ , pH deve ser especificado para cada subclasse		

(Fonte: Tanesi, Da Silva e Gomes, 2012)

A durabilidade da estrutura, além de ser relacionada à classe de agressividade, também é dada em função da execução correta do elemento (ABNT NBR 14931, 2004), com lançamento e adensamento adequados, com a qualidade do concreto (ABNT NBR 12655, 2015) e com o cobrimento de armadura (ABNT NBR 6118, 2014).

3 COBRIMENTO DA ARMADURA

O cobrimento de armadura exerce impacto na previsão de vida útil das estruturas, pois quanto maior a espessura maior o tempo necessário para penetração dos agentes agressivos até o contato com a armadura. Entretanto, por não ser um fator bem controlado durante o desenvolvimento de uma obra, a variabilidade influencia na qualidade das estruturas de forma negativa (DAL MOLIN *et al.* 2016). Uma redução do cobrimento para metade do seu valor é traduzida em um período de proteção da armadura reduzido para um quarto do previsto (TUTTI, 1982).

Ensaio experimentais comprovam que com o aumento da espessura de cobrimento, o aparecimento de fissuras se manifesta mais tardiamente e o progresso da corrosão é mais lento, visto que os agentes agressivos externos demandam mais tempo para chegar à armadura (MENESES *et al.* 2016; YALCINER, EREN, SENSOY, 2012; CUI e ALIPOUR, 2018; OTIENO, IKOTUN e BALLIM, 2019).

Para uma estrutura de concreto armado em meio externo e protegida da chuva, um cobrimento de 30 mm compreende em 135 anos de proteção à armadura, enquanto um cobrimento de 10 mm garante a durabilidade somente para 10 anos, dependendo da qualidade de concreto empregado (CONCRETE SOCIETY, 1994¹, *apud* SHAW, 2008).

A norma alemã DIN 1045-1 (2008) destaca que o cobrimento mínimo de concreto, além de ser essencial na proteção da armadura contra a corrosão, também deve auxiliar na transferência de tensões entre armadura e matriz de concreto e garantir resistência suficiente ao fogo, associando esta última característica à norma DIN 4102 (1998).

Um cobrimento adequado proporciona proteção ao aço quando a estrutura é exposta a altas temperaturas (KHALAF e HUANG, 2019; DANICA, 2015; EN 1992-1, 2004), reduzindo as perdas de resistência à tração do aço (ÜNLÜGLU, TOPÇU, YALAMAN, 2007). Awoyera, Arum e Akinwumi (2014), em teste de vigas com variação de temperatura entre 30°C e 700°C, constataram uma perda na resistência média do aço em 62% para elementos com cobrimento de 10 mm, enquanto que para corpos de prova com 25 mm de cobrimento, a perda chega a 47%. Desta forma, quanto maior a espessura de cobrimento maior a resistência residual da armadura após o fogo.

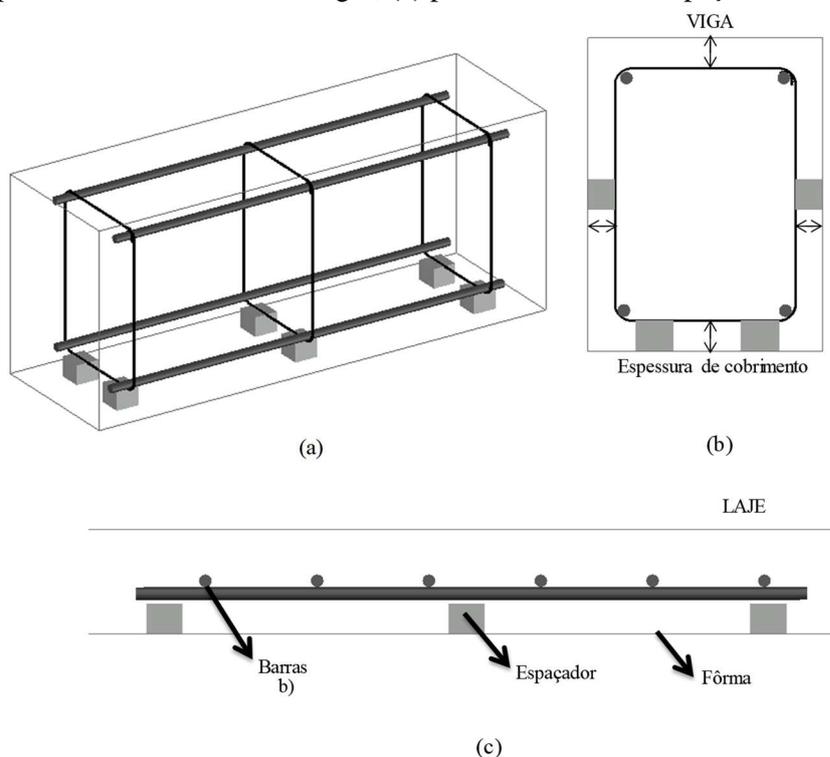
¹ CONCRETE SOCIETY. Spacers for reinforcement, CONCRETE Magazine. v. 28, p. 27-30, 1994.

Além da norma alemã DIN 1045-1 (2008) relacionar o cobrimento com a resistência ao fogo, a norma indiana IS 456 (2000) também faz indicação da espessura de cobrimento associada ao tempo de resistência do elemento estrutural exposto a altas temperaturas.

No Brasil, a NBR 15575 (ABNT, 2013) indica que o desempenho à segurança estrutural em situação de incêndio deve ser guiado pelo cumprimento das normas NBR 14432 (ABNT, 2001) e NBR 15200 (ABNT, 2012). Esta última recomenda espessuras de cobrimento nominal para armadura longitudinal do elemento em relação à face do concreto exposta ao fogo. O intervalo de tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) depende da carga térmica, posição e área da seção do elemento estrutural, tendo a estimativa mais complexa.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) define que o cobrimento nominal de um elemento estrutural é considerado como a distância entre a superfície externa da armadura e a superfície de concreto mais próxima (Figura 2).

Figura 2: Espessura de cobrimento de armadura: (a) apoios de armadura para obtenção de cobrimento; (b) espessura de cobrimento em vigas; (c) posicionamento de espaçadores em lajes.



(Fonte: elaborado pela autora, 2018).

No Brasil, o cobrimento em função da durabilidade é baseado na espessura mínima de proteção das barras, enquanto o cobrimento especificado em projeto é o cobrimento nominal (c_{nom}), ou seja, o cobrimento mínimo ($c_{mín}$) acrescido de uma tolerância de execução (Δc).

O cobrimento mínimo disposto em normativas deve ser cumprido em qualquer ponto da estrutura (EHE 08, 2008; ABNT NBR 6118, 2014; AS 3600, 2009; BS 8500-1, 2006; EN 1992-1, 2004; DIN 1045-1, 2008). Segundo a EN 1992-1 (2004), o cobrimento nominal é o valor utilizado nos cálculos estruturais para a determinação da altura útil do elemento.

O cobrimento nominal deve ser especificado para a armadura mais próxima da superfície da fôrma, incluindo os estribos. A distância propiciada pelos espaçadores entre os estribos, ou barras de armadura (caso não existam estribos) e a fôrma deve possuir a mesma dimensão que o cobrimento nominal indicado em projeto. A espessura de cobrimento não deve ser inferior ao diâmetro da barra de armadura, assim como especificam diversas normas (EHE 08, 2008; AS 3600, 2009; ABNT NBR 6118, 2014; BS 8500-1, 2006) para que possa ocorrer a transmissão de tensões entre as barras de aço e a matriz de concreto e vice e versa. As indicações também consideram a dimensão máxima dos agregados, de forma a garantir o envolvimento sem falhas da armadura pela matriz de concreto durante a concretagem.

A norma australiana AS 3600 (2009) coloca que os projetistas devem especificar cobrimentos apropriados para garantir que o concreto possa ter lançamento e adensamento adequados, para o total envolvimento da armadura. A indicação de um cobrimento correspondente deve considerar o tamanho e a forma do elemento, a configuração da armadura e as características do concreto.

Apesar dos benefícios que o cobrimento proporciona ao concreto armado, Mota *et al.* (2012) colocam que uma espessura excessiva se torna antieconômica. Além da durabilidade, o cobrimento também permite a transmissão de tensões entre concreto/armadura e um controle de abertura de fissuras (MARSH, 2003; BS 8500-1, 2006).

O cobrimento mínimo é escolhido para garantir a vida útil de projeto em relação às premissas correspondentes à despassivação do aço e à possibilidade de início de corrosão da armadura (ROSTAM, 2005). No entanto, apontar um limite mínimo absoluto dificulta planos de inspeção, pois é impraticável verificar o cobrimento mínimo em toda a estrutura (MONTEIRO *et al.*, 2015).

O cobrimento de armadura possui características variáveis ao longo do tempo, sendo que logo após a compactação e durante o período de cura a camada é altamente alcalina, com pH de aproximadamente 12,6. Após a interrupção da cura, inicia-se o processo de envelhecimento, podendo ocasionar a despassivação das armaduras. Devido às consequências que o cobrimento

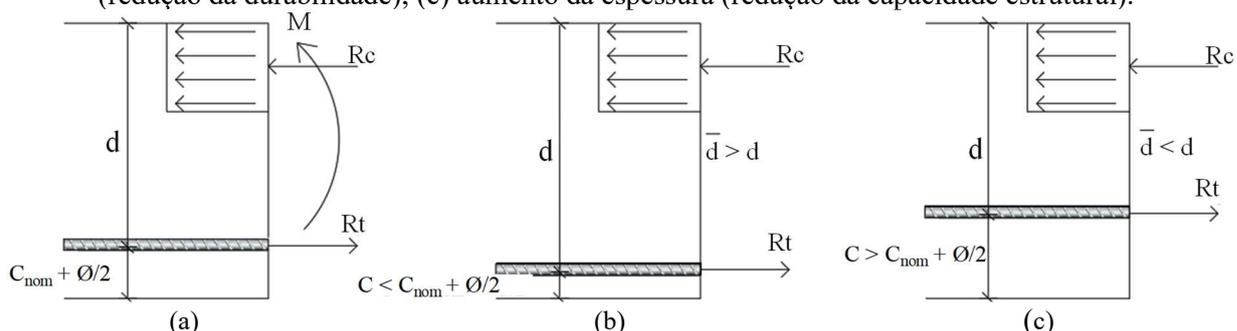
impróprio causa nas armaduras, é imperativo que seja projetado e executado adequadamente, a fim de garantir o desempenho requerido (MEDEIROS, ANDRADE e HELENE, 2008).

A proteção fornecida pelo cobrimento é dada em função de múltiplos fatores, conforme cita Vaquero (2007), e assim a formação da barreira de proteção ideal necessita de diversos cuidados. Deve-se atentar para a composição do cimento, relação água/cimento e processo de produção do elemento estrutural, como lançamento, adensamento e cura, uma vez que a qualidade adequada do concreto é fator preponderante no cobrimento. O autor aponta o cuidado com outros materiais, como o diâmetro máximo do agregado e o diâmetro da armadura principal, para evitar o aparecimento de ninhos de concretagem.

O aumento da espessura de cobrimento, através de erro de execução, pode interferir no funcionamento da estrutura. Benedetti (2013) mostra que o acréscimo de 20 mm na espessura especificada de cobrimento em uma laje gera uma redução de 36,81% no coeficiente de segurança médio. Cabe ressaltar que esse resultado é dependente da espessura da peça, como exemplo, peças em balanço são mais críticas e tem maior possibilidade de erro.

Como mostra a Figura 3, quando o cobrimento é aumentado, o posicionamento da armadura diminui a altura útil e, conseqüentemente o braço de alavanca entre a resultante de tração na armadura e a resultante de compressão no concreto, influenciando diretamente na capacidade de carga da laje e conseqüente perda de funcionamento estrutural.

Figura 3: Efeito da espessura de cobrimento: (a) cobrimento especificado; (b) redução da espessura (redução da durabilidade); (c) aumento da espessura (redução da capacidade estrutural).



(Fonte: elaborado pela autora, 2018).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) admite uma tolerância de execução que é considerada somente nos seus efeitos críticos sobre a durabilidade da estrutura, reduzindo o cobrimento nominal. Entretanto, esse valor deveria ser considerado também para espessuras acima da especificação, devido à perda de capacidade portante da estrutura em função da altura útil das seções (d). Esta situação torna-se mais crítica em elementos com seções reduzidas, como as lajes.

Para lajes em balanço, a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) preconiza um coeficiente extra de majoração das ações (γ_n) que é tanto maior quanto mais fina é a laje, ou seja, é dependente da altura da peça. Esse coeficiente é dado em função de recuperar a segurança, uma vez que o elemento pode ter maior probabilidade de ruína, considerado para as armaduras negativas, junto à face superior, o efeito de variação do cobrimento para mais, decorrente do processo de execução da estrutura, usualmente com tráfego de operários e equipamentos sobre a armadura. Essa condição também poderia ser replicada para casos de cobrimento excessivo. Algumas normas internacionais indicam uma tolerância de cobrimento nominal ou mínimo para mais, como é o caso da NZ 3101 (2006) e da IS 456 (2000).

3.1 ESPECIFICAÇÕES NORMATIVAS

No Brasil, a prescrição dos cobrimentos é indicada na norma de projeto de estruturas de concreto armado, a NBR 6118 (ABNT, 2014). Os cobrimentos mínimo e nominal são referentes à superfície da armadura mais externa, em geral a face externa do estribo. O cobrimento nominal para concreto armado, segundo a norma, sempre deve ser maior ou igual ao diâmetro da barra de armadura.

A dimensão máxima característica do agregado graúdo utilizado no concreto não pode superar em 20% a espessura nominal do cobrimento, em função do envolvimento da massa de concreto nas barras de armadura.

A prescrição do cobrimento nominal em projetos de concreto armado o elemento estrutural e a classe de agressividade ambiental, conforme Tabela 2.

Tabela 2: Especificações de cobrimento NBR 6118

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos em contato com o solo ^d	30		40	50

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas condições de cobrimento nominal, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter $C_{nom} \geq 45$ mm.

(Fonte: ABNT NBR 6118, 2014, modificado).

A relação entre espessura de cobrimento e componente estrutural não é recorrente em normas internacionais. A norma de desempenho das edificações NBR 15575 (ABNT, 2013), ao indicar

a vida útil, específica de forma geral as estruturas, não individualizando os elementos. Entende-se que a estrutura deve ter performance como um todo, e para isso, a espessura e a qualidade do cobrimento não devem diferir entre as partes da edificação, quando expostas ao mesmo ambiente.

O cobrimento mínimo da armadura é considerado o menor valor que deve ser respeitado ao longo de todo o elemento, sendo constituído como um critério de aceitação normativo. Para que o cobrimento mínimo (c_{min}) seja alcançado, o projeto e a execução devem considerar o cobrimento nominal (c_{nom}) tabelado em norma e indicado em projeto estrutural. O cobrimento nominal é considerado como sendo o cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução (Δc) com valor maior ou igual a 10 mm em obras correntes (item 7.4.7.3 ABNT NBR 6118, 2014).

A última atualização da norma, em 2014, admite que para concretos de classe de resistência superior ao mínimo exigido em função da classe de agressividade (Tabela 1), a especificação do cobrimento nominal pode ser reduzida em 5 mm. Embora não indicado na norma, entende-se que a maior proteção vem do material de cobrimento ser mais eficiente, em relação com a qualidade ou controle dos procedimentos de execução, e portanto a redução de 5 mm ocorre no C_{min} e não no Δc .

Quando houver um controle adequado de qualidade e limites rígidos de tolerância da variabilidade das medidas durante a execução, pode ser adotado o valor Δc igual a 5 mm. A exigência de controle rigoroso deve ser explicitada nos desenhos de projeto, admitindo, assim, a redução do cobrimento nominal prescrito na Tabela 2 em 5 mm (ABNT NBR 6118, 2014). Apesar desta condição, a norma não detalha requisitos que servem como embasamento para definir este controle rigoroso de execução, sendo totalmente subjetivo ao responsável da execução e, desta forma, esta consideração é bastante usual em projetos.

Destaca-se que a norma permite duas reduções para o cobrimento nominal de forma independente, ficando subentendido que as reduções possam ser realizadas de forma combinada, simultaneamente. Além disso, não há exigência de indicação das decisões do projetista para a especificação do cobrimento nominal e reduções ou tolerâncias adotadas, sendo este, um parâmetro de verificação importante na medição de cobrimentos mínimos em obra.

Helene (2014) coloca que muitos projetistas fazem uso da possibilidade de reduzir 5,0 mm em nome de um pensamento de economia da obra. Porém, o autor afirma que uma redução de 5,0

mm em um cobrimento original de 30 mm, significa reduzir em 15 anos a vida útil do projeto de uma estrutura.

Em trabalho de previsão de vida útil através de método probabilístico, Andrade (2001) descreve que o valor de cobrimento é variável em função do controle de execução. A definição de faixas de coeficiente de variação (CV) da espessura de cobrimento é importante, como forma de categorizar níveis de controle de qualidade. O autor propôs classificar a variabilidade da espessura de cobrimento de acordo com o controle de execução (Tabela 3).

Tabela 3: Coeficientes de variação para espessura de cobrimento

Nível de controle	CV da espessura de cobrimento
Baixo	0,55
Alto	0,15

(Fonte: Andrade, 2001).

Devido à inexistência de estudos que direcionam os limites entre os níveis de controle de execução para o cobrimento, Andrade (2001) indica a classificação do Quadro 4.

Quadro 4: Análise qualitativa em relação ao nível de controle de execução de cobrimento

Nível de controle	Características qualitativas
Baixo	<ul style="list-style-type: none"> • Inexistência de um plano de distribuição de espaçadores em relação à área e/ou ao volume dos elementos estruturais; • emprego de espaçadores inadequados (espessura variável, traço diferente); • excesso de movimentação das fôrmas no momento da montagem, podendo levar a um deslocamento dos espaçadores; • escoramento inadequado ou insuficiente; • concreto lançado inadequadamente (altura excessiva).
Alto	<ul style="list-style-type: none"> • Existência de um plano adequado de distribuição dos espaçadores; • emprego de espaçadores adequados; • controle rigoroso do lançamento do concreto nas formas.

(Fonte: Andrade, 2001).

As características qualitativas apontadas acima demonstram fatores que interferem na obtenção de cobrimento projetado durante a execução. No Brasil não há nenhuma diretriz normativa que oriente a respeito do uso ou da qualidade dos espaçadores utilizados durante a montagem das armaduras e concretagem do elemento estrutural, deixando uma lacuna na qualidade de execução e uma falha na durabilidade das estruturas.

Algumas etapas para garantia de controle de execução são imprescindíveis. A norma europeia de execução de estruturas de concreto, ENV 13670 (2009), aponta que a supervisão e a inspeção devem garantir que os trabalhos sejam concluídos de acordo com as especificações de projeto. Para as armaduras, o controle de execução engloba as seguintes conferências:

- a) diâmetro e espaçamento entre barras;
- b) espessura de revestimento;
- c) barras de aço sem contaminação por óleo, graxa ou outra substância deletéria;
- d) amarração e posicionamento das barras;
- e) afastamento suficiente para lançamento e adensamento de concreto.

Durante a pesquisa bibliográfica, algumas normas internacionais apontam diretrizes para que a execução seja considerada controlada. Entretanto, nenhuma destas normas (ENV 13670, 2009; EHE 08, 2008; E 060, 2009) apresenta limitações quantitativas de controle para diferentes sistemas, como armaduras e fôrmas. Os trabalhos complementares a este (PALM, 2017 e OLIVEIRA, 2018), que se dispuseram a mensurar cobrimentos em obra, também apontam a dificuldade do alcance do revestimento mínimo mesmo com o máximo cuidado no controle de execução. Oliveira (2018) relata que para a distância de 60 cm entre espaçadores com padrão alinhado de distribuição, somente 65% das medições para lajes com armadura 6,3 mm nas duas direções estão de acordo com a espessura de revestimento indicada com tolerância de 5,0 mm. Esse valor decai para 20 % para medições após a concretagem.

Com propósito de verificar as indicações e comparar as semelhanças com as orientações nacionais, um levantamento de normas estrangeiras é realizado a seguir. Em normas internacionais também ocorre a permissão de tolerância de execução junto ao revestimento mínimo. Em alguns códigos, o revestimento apontado é o revestimento mínimo, enquanto outras normalizações possuem especificação similar à da NBR 6118 (ABNT, 2014), tabelando o revestimento nominal.

Para garantir os valores mínimos de revestimento, a norma espanhola EHE 08 (2008) coloca que a prescrição deverá ser dada em um valor nominal de revestimento, sendo este o valor preconizado nos desenhos/detalhamentos e que servirá de embasamento para a definição dos espaçadores. O revestimento nominal é definido como o revestimento mínimo acrescido de uma tolerância de execução.

A margem de tolerância de revestimento é dada em função do nível de controle de execução (Δc), sendo em 0 mm para elementos pré-fabricados com controle intenso de execução, 5 mm para elementos *in loco* com nível intenso de controle de execução e 10 mm em casos restantes.

Os valores de cobrimento especificados pela EHE 08 (2008), dispostos na Tabela 4, estão associados às classes de exposição da estrutura em relação ao ambiente, ao tipo de cimento, à resistência característica do concreto e à vida útil requerida.

Tabela 4: Especificação de espessura de cobrimento EHE 08

Classe de exposição	Tipo de cimento	Resistência característica (MPa)	Vida útil de projeto (anos)	
			50	100
			Cobrimento mínimo (mm)	
I	Qualquer	$f_{ck} \geq 25$	15	25
II a	CEM I	$25 \leq f_{ck} < 40$	15	25
		$f_{ck} \geq 40$	10	20
	Outros tipos de cimento ou emprego de adições	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	30
		$f_{ck} \geq 40$	15	25
II b	CEM I	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	30
		$f_{ck} \geq 40$	15	25
	Outros tipos de cimento ou emprego de adições	$25 \leq f_{ck} < 40$	25	35
		$f_{ck} \geq 40$	20	30
III a	CEM III/A, CEM III/B, CEM IV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D ou concreto com adição de microssilica superior a 6% ou cinza volante superior a 20%	-	25	30
	Outros cimentos	-	45	65
III b	CEM III/A, CEM III/B, CEM IV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D ou concreto com adição de microssilica superior a 6% ou cinza volante superior a 20%	-	30	35
	Outros cimentos	-	40	*
IV	CEM III/A, CEM III/B, CEM IV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D ou concreto com adição de microssilica superior a 6% ou cinza volante superior a 20%	-	35	40
	Outros cimentos	-	*	*
Qa	CEM III/A, CEM III/B, CEM IV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D ou concreto com adição de microssilica superior a 6% ou cinza volante superior a 20%	-	40	55
Qb, Qc	Qualquer	-	(1)	(1)
H	CEM III	$25 \leq f_{ck} < 40$	25	50
		$f_{ck} \geq 40$	15	25
	Outros cimentos	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	35
		$f_{ck} \geq 40$	10	20
F	CEM I I/A-D	$25 \leq f_{ck} < 40$	25	50
		$f_{ck} \geq 40$	15	35
	CEM III	$25 \leq f_{ck} < 40$	40	75
		$f_{ck} \geq 40$	20	40
	Outros cimentos ou emprego de adições	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	40
		$f_{ck} \geq 40$	10	20
E ⁽²⁾	Qualquer	$25 \leq f_{ck} < 40$	40	80
		$f_{ck} \geq 40$	20	35

*Situações que forcem cobrimentos excessivos, indesejáveis do ponto de vista da execução do elemento. Recomenda-se verificar o estado limite de durabilidade, com base nas características do concreto e as especificações técnicas do projeto.

(1) O projetista deverá fixar esses valores de cobrimento mínimo e, quando necessário, adicionais a fim de garantir proteção adequada do concreto e armadura contra a agressão química específica

(2) Valores correspondentes a condições moderadamente severas de abrasão. Para previsão de forte abrasão, será necessário realizar estudo detalhado.

(Fonte: EHE 08, 2008).

O controle rigoroso de execução é permitido somente para o construtor que possua um sistema de qualidade certificado conforme a UNE-EN ISO 9001 (EHE, 2008), tendo como requisitos, por exemplo, a necessidade de realizar inspeções para verificar se a montagem dos elementos, a amarração ou soldagem estão adequadas e se os comprimentos de ancoragem e sobreposições das barras correspondem ao projetado. Também há a indicação de conferência antes do lançamento do concreto quanto à geometria real da armadura e sua colocação, distribuição e dimensão dos espaçadores.

Caso o projetista estabeleça adoção de medidas especiais de proteção contra a corrosão das armaduras (proteção catódica, armaduras galvanizadas ou o uso de aditivos inibidores de corrosão) poderá substituir os cobrimentos mínimos indicados para as classes gerais III e IV, pelos cobrimentos indicados para a classe geral IIB, desde que sejam previstas medidas necessárias para assegurar a vida útil da estrutura especificada em projeto. Por fim, em elementos estruturais em contato com o solo, o cobrimento mínimo deve ser de 70 mm, exceto quando o solo foi preparado com uma camada de concreto (EHE 08, 2008).

A norma alemã, DIN 1045-1 (2008), indica o cobrimento mínimo em função das classes de agressividade ambiental, com tolerâncias de execução maiores em comparação às indicadas pela NBR 6118 (ABNT, 2014), variando entre 10 mm e 15 mm, conforme Tabela 5.

Tabela 5: Especificação de espessura de cobrimento DIN 1045-1

Classe de agressividade	Cobrimento mínimo (C_{min}) mm ^{a,b}		Tolerância (Δc) mm
	Concreto armado	Concreto protendido ^c	
XC1	10	20	10
XC2	20	30	
XC3	20	30	
XC4	25	35	
XD1	40	50	15
XD2			
XD3 ^d			
XS1	40	50	
XS2			
XS3			

^aOs valores podem ser reduzidos em 5 mm para componentes de concreto armado, cuja resistência do concreto é de pelo menos 2 classes de resistência superiores às exigidas pela norma, para as classes de exposição XC, XD ou XS. Para componentes da classe de exposição XC1, essa redução não é permitida.

^bSe o concreto *in loco* estiver conectado de forma não positiva a um elemento pré-moldado, os valores nas bordas voltadas para a junta podem ser reduzidos para 5 mm na peça acabada e para 10 mm no concreto moldado *in loco*.

^cO cobrimento mínimo do concreto refere-se às cordoalhas próximas a superfície de concreto

^dEm casos individuais, medidas especiais para proteção contra corrosão da armadura podem ser necessárias.

(Fonte: DIN 1045-1, 2008).

Apesar da normativa ainda permitir uma redução de 5 mm, quando um controle especial de execução for comprovado, esse ponto é inadmissível para elementos executados *in loco*, sendo somente consentido para estruturas de elementos pré-moldados.

Equivalente à NBR 6118 (ABNT, 2014), a norma alemã também permite a redução de cobertura em função do aumento da classe de resistência. Entretanto, a definição para esta tolerância é mais detalhada, somente sendo aplicada quando o concreto é duas classes de resistência superior ao mínimo, enquanto a norma brasileira não faz limitação em função das classes de agressividade.

Para a proteção contra corrosão, a norma australiana AS 3600 (2009) separa os cobrimentos mínimos em duas categorias, diferenciando-as em função do processo de controle dos sistemas, incluindo a supervisão. As indicações de cobertura mínimo, relacionadas também à classe de agressividade ambiental e à resistência característica, são mostradas na Tabela 6.

Tabela 6: Especificação de espessura de cobertura AS 3600

Execução dos elementos	Classe de agressividade	Cobrimento mínimo (mm)				
		Resistência Característica				
		20 MPa	25 MPa	32 MPa	40 MPa	≥ 50 MPa
Cobrimentos para fôrma e adensamento convencional	A1	20	20	20	20	20
	A2	(50)	30	25	20	20
	B1	-	(60)	40	30	25
	B2	-	-	(65)	45	35
	C1	-	-	-	(70)	50
	C2	-	-	-	-	65
Cobrimentos para adensamento intenso/ concreto autoadensável e procedimentos repetitivos	A1	20	20	20	20	20
	A2	(45)	30	20	20	20
	B1	-	(45)	30	25	20
	B2	-	-	(50)	35	25
	C1	-	-	-	(60)	45
	C2	-	-	-	-	60

(Fonte: AS 3600, 2009).

Para a exposição ambiental mais amena (A1), a espessura de cobertura não é alterada, independentemente da classe de resistência característica. O cobrimento indicado para elementos convencionais, como lajes, vigas e pilares, é dado com a permissão de redução em 5 mm e o aumento em 10 mm do valor tabelado, porém não são apresentadas outras especificações.

A norma neozelandesa NZS 3101-1 (2006) correlaciona as classes de exposição, o tipo de cimento e a resistência característica do concreto com a vida útil da edificação para a especificação de cobertura mínimo (Tabela 7). Como a norma indica o cobrimento mínimo,

a tolerância de execução é dada somente para valores acima do tabelado. Sendo assim, para lajes, paredes, vigas e pilares é indicado um acréscimo 10 mm, e para outros elementos estruturais o aumento do cobrimento pode chegar a 25 mm. Também é indicado, em classes de agressividade X1, X2 e X3, com agentes químicos, o cobrimento mínimo de 50 mm, independentemente do tipo de cimento ou da resistência à compressão do concreto.

Tabela 7: Especificação de espessura de cobrimento NZ 3101-1

Vida útil	Classe	Tipo de cimento	Resistência a compressão (MPa)							
			20	25	30	35	40	45	50	60-100
			Cobrimento mínimo (mm)							
50 anos	A1	GP, GB, HE	25	25	20	20	20	20	20	20
	A2	GP, GB, HE	40	35	30	30	25	25	25	20
	B1	GP, GB, HE	50	40	35	35	30	30	30	25
	B2	GP, GB, HE	-	-	45	40	35	30	30	25
	C ⁽¹⁾	30 % FA	-	-	-	-	60	60	60	55
	C	65 % GBS	-	-	-	-	-	50	50	50
100 anos	C	8% MS	-	-	-	-	-	60	50	50
	A1	GP, GB, HE	-	35	30	30	30	30	30	25
	A2	GP, GB, HE	-	50	40	40	35	35	35	30
	B1	GP, GB, HE	-	55	50	45	40	40	35	30
	B2	GP, GB, HE	-	-	65	55	50	45	40	35
	C	30 % FA	-	-	-	-	-	70	60	60
C	65 % GBS	-	-	-	-	-	60	50	50	
C	8% MS	-	-	-	-	-	-	50	50	

GP: Cimento de uso geral

HE: Cimento de alta resistência inicial

GBS: Cimento composto com escória de alto-forno

GB: Cimento de uso geral composto

FA: Cimento composto com cinza volante

MS: Cimento com resistência média a sulfatos

⁽¹⁾ Para a classe C, o consumo de cimento $\geq 350 \text{ kg/m}^3$ e a relação água/cimento não deve ultrapassar 0,45.

(Fonte: NZ 3101-1, 2006).

O código americano de estruturas em concreto, ACI 318 (2019), indica que para estruturas em concreto armado moldadas no local, a especificação de cobrimento deve ser ao menos a indicada na Tabela 8.

Tabela 8: Especificação de espessura de cobrimento ACI 318

Classe de agressividade	Elemento	Armadura	Cobrimento Especificado (mm)
Em contato permanente com o solo	Todos	Todas	75
Exposto ou em contato com o solo	Todos	Barras $\varnothing 20 \text{ mm}$ a $\varnothing 50 \text{ mm}$	50
		Barras $\leq \varnothing 16 \text{ mm}$	40
Não exposto ou sem contato com o solo	Lajes, vigotas e paredes	$\varnothing 43 \text{ mm}$ e $\varnothing 50 \text{ mm}$	40
		Barras $\leq \varnothing 32 \text{ mm}$	20
	Vigas, pilares e cabos de tensão	Armadura principal, estribos, espirais e aros	40

(Fonte: ACI 318, 2019).

Para tolerâncias de cobrimento, a ACI 117 (2014) aponta a redução de 10 mm quando o elemento estrutural tiver espessura até 30,5 cm e 13 mm para elementos com espessuras

superiores. A redução de cobrimento não deve ultrapassar 1/3 do cobrimento especificado, ou seja, para um cobrimento de 20 mm não é permitida a tolerância de 10 mm de espessura.

A norma britânica BS 8500-1 (2006) indica cobrimentos nominais em função da vida útil, do tipo de cimento, da classe de agressividade e das características do concreto (Tabela 9).

Tabela 9: Recomendações para concreto armado ou protendido para vida útil de 50 anos BS 8500-1

C_{nom} (mm)	15+Δc	20+Δc	25+Δc	30+Δc	35+Δc	40+Δc	45+Δc	50+Δc	Tipo de cimento
Classe de agressividade	Classe de resistência								
	Relação água/cimento								
	Consumo de Cimento (kg/m³)								
XC1	C20/25 0,70 240	C20/25 0,70 240	C20/25 0,70 240	C20/25 0,70 240	C20/25 0,70 240	C20/25 0,70 240	C20/25 0,70 240	C20/25 0,70 240	Todos os tipos
XC2	-	-	C25/30 0,65 260	C25/30 0,65 260	C25/30 0,65 260	C25/30 0,65 260	C25/30 0,65 260	C25/30 0,65 260	Todos os tipos
XC3/4	-	C40/50 0,45 340	C30/37 0,55 300	C28/35 0,55 280	C25/30 0,65 260	C25/30 0,65 260	C25/30 0,65 260	C25/30 0,65 260	Todos os tipos
	-	-	C40/50 0,45 340	C30/37 0,55 300	C28/35 0,60 280	C25/30 0,65 260	C25/30 0,65 260	C25/30 0,65 260	IVB-V
XD1	-	-	C40/50 0,45 360	C32/40 0,55 320	C28/35 0,60 300	C28/35 0,60 300	C28/35 0,60 300	C28/35 0,60 300	Todos os tipos
XS1	-	-	-	C45/55 0,35 380	C35/45 0,45 360	C32/40 0,50 340	C32/40 0,50 340	C32/40 0,50 340	CEM I, IIA, IIB-S
	-	-	-	C40/50 0,35 380	C32/40 0,45 360	C28/35 0,50 340	C25/30 0,55 320	C25/30 0,55 320	IIB-V, IIIA
	-	-	-	C32/40 0,40 380	C25/30 0,50 340	C25/30 0,50 340	C25/30 0,55 320	C25/30 0,55 320	IIIB
	-	-	-	C32/40 0,40 380	C28/35 0,50 340	C25/30 0,50 340	C25/30 0,55 320	C25/30 0,55 320	IVB-V
XD2 ou XS2	-	-	-	C40/50 0,40 380	C32/40 0,50 340	C28/35 0,55 320	C28/35 0,55 320	C28/35 0,55 320	CEM I, IIA, IIB-S
	-	-	-	C35/45 0,40 380	C28/35 0,50 340	C25/30 0,55 320	C25/30 0,55 320	C25/30 0,55 320	IIB-V, IIIA
	-	-	-	C32/40 0,40 380	C25/30 0,50 340	C20/25 0,55 320	C20/25 0,55 320	C20/25 0,55 320	IIIB, IVB-V
XD3	-	-	-	-	-	C45/55 0,35 380	C40/50 0,40 380	C35/45 0,45 360	CEM I, IIA, IIB-S
	-	-	-	-	-	C35/45 0,40 380	C32/40 0,45 360	C28/35 0,50 340	IIB-V, IIIA
	-	-	-	-	-	C32/40 0,40 380	C28/35 0,45 360	C25/30 0,50 340	IIIB, IVB-V

Tabela 9: Recomendações para concreto armado ou protendido para vida útil de 50 anos BS 8500-1 (continuação)

Classe de agressividade	15+Δc	20+Δc	25+Δc	30+Δc	35+Δc	40+Δc	45+Δc	50+Δc	Tipo de cimento
XS3	-	-	-	-	-	-	C45/55 0,35 380	C40/50 0,40 380	CEM I, IIA, IIB-S
	-	-	-	-	-	C35/45 0,40 380	C32/40 0,45 360	C28/35 0,50 340	IIB-V, IIIA
	-	-	-	-	-	C32/40 0,40 380	C28/35 0,45 360	C25/30 0,40 340	IIIB, IVB-V

(-) Indica que um cobrimento maior é recomendado

CEM I: Cimento Portland Comum

CEM II: Cimento com adições (cinza volante, pozolana, calcário, escória)

CEM III: Cimento Alto forno

CEM IV: Cimento Pozolânico

A: Adição entre 6 a 20%

B: Adição entre 21 a 35%

C: Adição entre 36 a 65%

(Fonte: BS 8500-1, 2006).

A variável indicada no cobrimento nominal é definida em função da ENV 13670 (2009), que prescreve que quando a execução é submetida a um sistema de garantia de qualidade, no qual a fiscalização inclua medições de cobrimento, a tolerância fica na faixa entre 5 mm e 15 mm. Enquanto que para execuções onde possa ser assegurado um dispositivo de medição muito preciso e onde os elementos não conformes são rejeitados, como peças pré-fabricadas, a tolerância no projeto pode ser entre 0 mm e 10 mm.

A norma BS 8500-1 (2006) não especifica diretamente qual valor de tolerância de execução deva ser considerado para os diferentes níveis de controle de execução da ENV 13670 (2009), deixando sob responsabilidade do projetista apontar um valor entre 5 a 15 mm.

A norma indiana IS 456 (2000) coloca que a vida útil da estrutura pode ser prolongada através de cobrimento extra na barra de aço ou utilizando revestimentos que evitem ou reduzam a entrada de água, dióxido de carbono ou produtos químicos agressivos. Assim, as espessuras de cobrimento nominal são definidas através dos requisitos de durabilidade (Tabela 10).

Tabela 10: Especificação de espessura de cobrimento para requisitos de durabilidade IS 456

Classe de agressividade	Cobrimento Nominal (mm)
Suave	20
Moderada	30
Severa	45
Muito Severa	50
Extrema	75

1 Para armadura principal composta por barras com diâmetro acima de 12 mm e condição suave de exposição, o cobrimento nominal pode ser reduzido em 5mm.

2 A não ser especificado em projeto, o cobrimento executado não pode diferenciar-se do nominal mais de 10 mm.

4 Para condições de exposição 'severa' ou 'muito severa', pode ser realizada a redução de 5mm, desde que o concreto apresente resistência à compressão de 35MPa ou mais.

(Fonte: IS 456, 2000)

Apesar das recomendações propostas em tabela, há indicação que para barras longitudinais de pilares, o cobrimento nominal não deve ser inferior a 40 mm ou inferior ao diâmetro da barra de aço. Para pilares com dimensão de 20 cm ou menos, em que as barras longitudinais não ultrapassem 12 mm de diâmetro, um cobrimento nominal de 25 mm pode ser empregado. Por fim, para fundações do tipo sapata, a espessura mínima de proteção deve ser de 50 mm (IS 456, 2000).

Em função da durabilidade, a normativa indiana coloca como perspectiva geral a espessura de cobrimento, não distinguindo o cobrimento nominal em função dos elementos estruturais. Além disso, o maior valor de espessura de cobrimento indicada na norma é de 75 mm para ambientes extremamente agressivos enquanto a NBR 6118 (ABNT, 2014) aponta como maior valor indicado de espessura de cobrimento nominal em estruturas de concreto armado a espessura de 50 mm.

Para a preservação da edificação, a norma IS 456 (2000) destaca a importância do cobrimento nominal de armadura na resistência ao fogo, em conjunto com o tamanho do elemento e do tipo de agregado empregado (normal ou leve), conforme Tabela 11.

Tabela 11: Especificação de espessura de cobrimento para requisitos de resistência ao fogo IS 456

Resistência ao fogo (h)	Cobrimento Nominal (mm)						Pilares
	Vigas		Lajes		Elementos Nervurados		
	Apoiadas	Contínuas	Apoiadas	Contínuas	Apoiadas	Contínuas	
0,5	20	20	20	20	20	20	40
1,0	20	20	20	20	20	20	40
1,5	20	20	25	20	35	20	40
2,0	40	30	35	25	45	35	40
3,0	60	40	45	35	55	45	40
4,0	70	50	55	45	65	55	40

(Fonte: IS 456, 2000)

Nota-se que quanto maior a resistência ao fogo maior a espessura de cobrimento para elementos apoiados. Entretanto, para pilares, a espessura de cobrimento é a mesma, independente da resistência ao fogo requerida. Para vigas, tanto para apoiadas ou contínuas, a espessura de cobrimento nominal permanece inalterada para resistência ao fogo de até 1,5h.

A norma uruguaia (UNIT 1050, 2005) designa que o cobrimento de armadura para barras principais deve ser igual ou maior que o diâmetro nominal da respectiva barra, além de limitação máxima de 1,25 vezes o tamanho máximo do agregado. A recomendação da espessura de cobrimento é feita em relação às três classes de agressividade ambiental, como mostra a Tabela 12.

Tabela 12: Especificação de espessura de cobrimento UNIT 1050

Classe de agressividade	Espessura de cobrimento (mm)
Classe ambiental I	20
Classe ambiental II	30
Classe ambiental III	40

(Fonte: UNIT 1050, 2005).

É permitida a redução das espessuras de cobrimento indicadas acima em 5 mm para elementos protegidos, peças pré-fabricadas ou concretos com f_{ck} entre 25 MPa e menor que 40 MPa. A redução de 10 mm é fornecida quando o elemento estrutural possui concreto com resistência maior ou igual a 40 MPa. Essa diminuição de cobrimento é somente admitida caso as espessuras não sejam inferiores a 15 mm, 20 mm e 25 mm, para as classes I, II e III, respectivamente, como exposto na Tabela 13.

Tabela 13: Especificação de espessura de cobrimento UNIT 1050

Condições ambientais	Elementos em geral			Elementos protegidos; Elementos pré-fabricados		
	$f_{ck} < 25$	$25 \leq f_{ck} < 40$	$f_{ck} \geq 40$	$f_{ck} < 25$	$25 \leq f_{ck} < 40$	$f_{ck} \geq 40$
Classe I	20	15	15	15	15	15
Classe II	30	25	20	25	20	20
Classe III	40	35	30	35	30	25

(Fonte: UNIT 1050, 2005)

A norma boliviana CBH 87 (1987) indica as espessuras de cobrimento em função da classe de agressividade ambiental, conforme Tabela 14. Apesar de permitir algumas correções para o cobrimento em função das armaduras utilizadas, elemento ou classe de resistência, a norma coloca que as tolerâncias podem ser acumulativas, mas em nenhum caso o cobrimento resultante poderá ser inferior a 25 mm.

Tabela 14: Especificação de espessura de cobrimento CBH 87

Valores básicos de cobrimento (mm)			Tolerâncias (mm)			
Condições ambientais			Armaduras suscetíveis a corrosão	Lajes	Classe Resistência Concreto (MPa)	
Não Severa	Moderadamente Severa	Severa			C 12,5	C 40,0
					C 15,0	C 45,0
					C 17,5	C 50,0
15	25	35	± 10	-5	C 20,0	C 55,0
					+ 5	-5

(Fonte: CBH 87, 1987)

A norma considera armaduras suscetíveis à corrosão sendo aquelas compostas por diâmetros inferiores a 4,0 mm, aços temperados em qualquer diâmetro, ou aços trefilados a frio submetidos a uma tração permanente superior a 400 MPa. Em estruturas expostas a ambientes quimicamente agressivos ou com risco de incêndio, o cobrimento deve ser especificado pelo projetista, mas a norma não traz maiores detalhes.

A prescrição boliviana traz indicações de controle de execução através de uma tabela com etapas de controle. Os níveis de controle são classificados em Reduzido, Normal e Intenso e possuem relação direta com a periodicidade de visitas de inspeção de profissional habilitado.

Algumas operações de controle apontadas são referentes à verificação da qualidade de serviços como sistemas de fôrmas, dobra e emendas do aço e colocação de armaduras, além da produção, do lançamento e da cura do concreto (CBH, 1987). Entretanto, não há nenhuma indicação para a conferência de espessura de cobrimento ou posicionamento de espaçadores.

A norma peruana E 060 (2009), além da correspondência frente à classe de agressividade ambiental, indica o cobrimento mínimo em relação ao diâmetro das barras, conforme Tabela 15. Em ambientes corrosivos ou em outras condições severas de exposição, deve-se aumentar adequadamente a espessura de cobrimento de concreto, além de considerar a densidade e a porosidade do material (E060, 2009). Embora seja um ponto normativo, nenhuma outra recomendação para parâmetros desse aumento é colocada. A tolerância do cobrimento está associada à altura útil do elemento, então, é permitida uma redução de 10 mm para elementos com altura útil de até 200 mm.

Tabela 15: Especificação de espessura de cobrimento E 060

Exposição do concreto	Especificações	Espessura de cobrimento (mm)
Estruturas de concreto contra o solo ou exposta permanentemente	-	70
Estruturas de concreto em contato permanente com intempérie ou solo	Barras de aço com $\varnothing \geq 20$ mm	50
	Barras de aço com $\varnothing \leq 16$ mm Malhas eletrosoldadas	40
Estruturas de concreto não expostas a intempéries nem em contato com solo	Lajes, paredes e vigas: Barras de 40mm a 58 mm	40
	Lajes, paredes e vigas: Barras de $\varnothing \leq 35$ mm	20
	Vigas e pilares: Armadura principal, estribos e espirais (pilares redondos)	40
	Conchas e lajes dobradas: Barras de $\varnothing \geq 20$ mm	20
	Conchas e lajes dobradas: Barras de $\varnothing \leq 16$ mm	15
	Conchas e lajes dobradas: Malhas eletro soldadas	15

(Fonte: E 060, 2009).

De forma mais visual, Oliveira (2018) gerou uma comparação entre normas para indicação de cobrimento em situação padrão. O autor considerou o elemento estrutural sendo uma laje maciça sem revestimento e inserida em ambiente interno, com ação de agentes de carbonatação, para simular a maior ocorrência da cidade de Porto Alegre/RS. A resistência característica à

compressão foi de 35 MPa, com concreto fornecido por central dosadora, cobrimentos mínimos para uma vida útil de 50 anos e tolerâncias de execução mais indicada, sem o uso de reduções por controle de qualidade diferenciado. O comparativo entre as especificações de cobrimento está na Tabela 16.

Tabela 16: Comparativo de especificações de cobrimentos para lajes maciças em diferentes normas

Norma	Cobrimento (mm)		
	C_{nom} (mm)	Δc (mm)	C_{min} (mm)
NBR 6118	20	10	10
EN 1992-1	30	10	20
EHE 08	30	10	20
BS 8500	35	10	25
DIN 1045-1	35	15	20
CBH 87	30	3	27

(Fonte: Oliveira, 2018)

O autor interpreta os valores dentro das condições propostas acima, destacando que a norma brasileira permite o menor cobrimento mínimo dentre todas as analisadas. Ressalta-se que a NBR 6118 (ABNT, 2014) somente coloca na observação que o cobrimento mínimo deverá ser maior ou igual a 15 mm para partes superiores de lajes que recebam revestimento. Nos demais casos, a norma não faz nenhuma limitação quanto à aplicação de tolerâncias de execução em classes de agressividade mais brandas (Classe I), e assim a redução de cobrimento é bastante significativa, embora seja possível interpretar que a parte superior de lajes e vigas com revestimento de piso é uma das situações com menor agressividade para a armadura, de forma que os 15 mm seriam um valor mínimo para todos os casos.

Além disso, as reduções de cobrimento nominal quanto ao uso de classe de resistência superior exigida ou controle rigoroso não são detalhadas, e assim, a norma não esclarece se essas possibilidades podem ser utilizadas de forma conjunta ou não.

De um modo geral, a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) possui pontos semelhantes quanto à especificação de espessura de cobrimento nominal com orientações propostas em normas internacionais. Entretanto, considerar algumas diretrizes estrangeiras proporcionaria melhorias na concepção e produção das estruturas se incorporadas nas normas de projeto e execução no Brasil.

Normas internacionais (BS 8500-1, 2006; NZS 3101-1, 2006; EHE 08, 2008) pautam a especificação de cobrimento com a vida útil requerida. No Brasil, a norma de desempenho das edificações NBR 15575 (ABNT, 2013) entrou em vigor antes da atualização da norma de projeto de estruturas NBR 6118 (ABNT, 2014). Sabendo que o cobrimento tem ligação direta

com a durabilidade da estrutura, a importância de associar a especificação do cobrimento nominal com a vida útil solicitada é fundamental para obter edificações com maior desempenho.

Como já mencionado, a NBR 6118 (ABNT, 2014) permite a redução do cobrimento nominal quando a obra adotar um controle rigoroso de execução, e por muitas vezes o projetista pode associar essa tolerância sem conhecer a realidade de execução. Ademais, a norma de execução NBR 14931 (ABNT, 2004) não traz nenhum parâmetro para associar ações que seriam consideradas como um controle de execução para classificar as atividades.

Em pesquisas onde o cobrimento executado foi mensurado (SILVA, 2012; CAMPOS, 2013; WEBER, 2014; MARAN *et al.*, 2015; PALM, 2017; MENNA BARRETO *et al.*, 2018; GHIGGI, 2018) nenhuma obra apresentou valores condizentes com a espessura de projeto, e assim, deve-se atentar à fôrma e à conferência de execução das armaduras. Como exemplo, a EN 13670 (2009) e a EHE 08 (2008) apontam classes de inspeção em obra e relacionam o posicionamento da armadura, ou a espessura de cobrimento antes da concretagem, como fator relevante no controle de execução.

Quanto à tolerância de execução, a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) permite ainda a redução do cobrimento nominal em 5 mm quando a classe de resistência for acima da classe correlacionada à classe de agressividade, porém não traz nenhuma limitação, como a DIN 1045-1 (2008) assinala. Como exemplo, a norma alemã indica que o cobrimento pode ser alterado quando a resistência do concreto for maior em 2 classes para determinadas exposições (XC, XD ou XS), sendo vetada qualquer redução do cobrimento em função do aumento da classe de resistência para a agressividade classificada em XC1. Cabe ressaltar que a normativa alemã traz a maior tolerância de execução dentre todas as normas aqui apresentadas, indicando um valor de 15 mm.

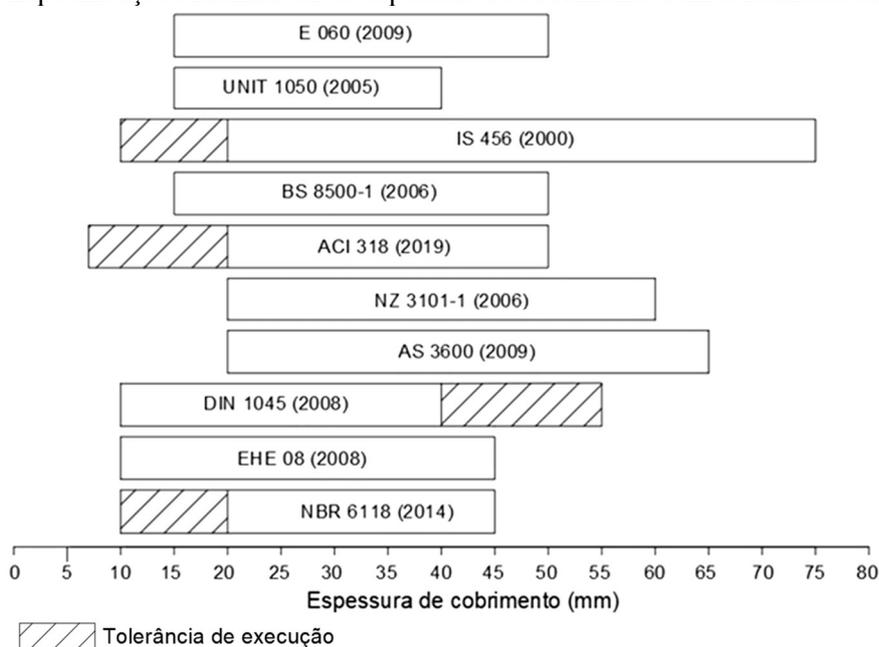
Ainda, normas como a UNIT 1050 (2005) e a CBH 87 (1987) trazem limitação quanto ao cobrimento mínimo, independentemente das permissões de redução do cobrimento nominal, assim, o menor valor permitido é de 15 mm, enquanto no Brasil, considerando as tolerâncias de execução, o cobrimento mínimo pode chegar a 10 mm.

Como destaque, a norma australiana AS 3600 (2009) permite uma redução de cobrimento somente de 5 mm e o aumento de 10 mm na espessura, tendo cobrimento mínimo de 15 mm, considerando as tolerâncias de execução.

A norma NZS 3101-1 (2006) traz como restrição somente o acréscimo de 10 mm do cobrimento mínimo tabelado, e assim, a espessura mínima é de 20 mm, sendo o dobro do valor mínimo permitido na NBR 6118 (ABNT, 2014).

Um resumo comparativo para as especificações normativas quanto à espessura de cobrimento é mostrado na Figura 4. As normas que não possuem indicação de tolerância de execução (UNIT 1050, 2005; BS 8500-1, 2006; NZ 3101-1, 2006; EHE 08, 2008; AS 3600, 2009; E 060, 2009) para mais ou para menos, representam limites mínimos tabelados, ou seja, apesar da permissão de redução, a espessura não pode ser inferior que o cobrimento indicado para a classe de agressividade mais branda nas normas.

Figura 4: Especificações normativas de espessura de cobrimento com tolerâncias de execução.



(Fonte: elaborado pela autora, 2020).

Quando as normativas possuem especificações mais diretas e não tão subjetivas, restringindo as condições de mudanças na espessura de cobrimento, a chance de cobrimentos inadequados é reduzida.

3.2 ESPAÇADORES

O uso de espaçadores é amplamente difundido por normativas que indicam sua aplicação como forma de posicionar corretamente a armadura e proporcionar o cobrimento. Antes da década de 60, a prática construtiva comum era a utilização de tijolos, pedras, pedaços de madeira e cerâmica ou qualquer material disponível para o afastamento das barras de aço em relação à superfície da fôrma (ALZYOUD, 2015).

Segundo Vaquero (2007), o emprego inicial desses dispositivos tinha foco em peças pré-fabricadas, onde as tolerâncias são mais rigorosas e era preciso evitar danos aos moldes para a reutilização das peças, sendo ampliado para peças estruturais moldadas *in loco*, para garantir a espessura de cobertura. Para o mesmo autor, a escolha dos espaçadores deve considerar alguns pontos para melhor desempenho em relação ao uso, como:

- a) o valor de cobertura nominal estabelecido em projeto;
- b) as cargas que o espaçador deverá suportar devido ao peso da armadura, as operações de colocação, a movimentação de operários e as cargas produzidas durante a concretagem do elemento;
- c) o diâmetro e finalidade da armadura (contenção, laje, viga ou pilar);
- d) o tipo de armadura: barras amarradas ou malhas soldadas;
- e) o tipo de fixação mais adequado: sem fixação, amarrado com arame ou espaçador com grampo;
- f) as circunstâncias externas que podem afetar o concreto como a pressão, a temperatura, possíveis ataques químicos, umidade, incêndio ou corrosão;
- g) o tipo de acabamento da superfície da peça estrutural;
- h) a facilidade de colocação, rendimento e custos dos espaçadores.

Os espaçadores são utilizados durante a fase de montagem do elemento e são distribuídos entre as barras de armadura mais próximas da superfície externa e a fôrma, possibilitando que as barras de aço permaneçam na posição de projeto durante a execução.

3.2.1 Tipos de espaçadores

A norma NBR 14931 (ABNT, 2004) coloca que para a montagem e execução das armaduras:

“É permitido o uso de espaçadores de concreto ou argamassa, desde que apresente relação água/cimento menor ou igual a 0,5, e espaçadores plásticos, ou metálicos com as partes em contato com a fôrma revestida com material plástico ou outro material similar. Não devem ser utilizados calços de aço cujo cobertura, depois de lançado o concreto, tenha espessura menor do que o especificado no projeto”.

Além desta especificação, podem ser utilizados outros tipos de espaçadores não descritos em norma, desde que não tenham partes metálicas expostas. O uso de materiais como tijolos e gesso assim como materiais metálicos são vetados pelas normas EHE 08 (2008) e UNIT 1050 (2005). Em qualquer caso, os espaçadores não devem conter amianto.

Os dispositivos não devem reduzir significativamente a durabilidade da estrutura e nem distorcer a aparência estética do concreto com interferência de cor, textura, perfil ou acabamento (BS 7973-2, 2001).

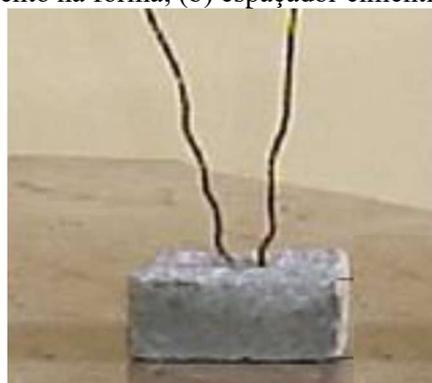
Os espaçadores comumente utilizados são feitos de materiais cimentícios ou plásticos e têm posicionamento direcionado para a lateral ou fundo da fôrma. A norma portuguesa LNEC E469 (2006) coloca que os espaçadores devem ser preferencialmente de argamassa, podendo ser utilizados espaçadores plásticos em elementos sujeitos às classes de exposição ambiental iniciais da norma EN 1992 (2004), apresentadas no Quadro 2.

Os espaçadores cimentícios (Figura 5) podem ser fabricados em concreto, argamassa ou material cimentício reforçado com fibra, podendo ser incorporado o uso de cinza volante, escória e sílica ativa para melhoria da durabilidade do espaçador (ALZYOUD, 2015).

Figura 5: Espaçadores cimentícios (a) posicionamento na fôrma; (b) espaçador cimentício.



(a)



(b)

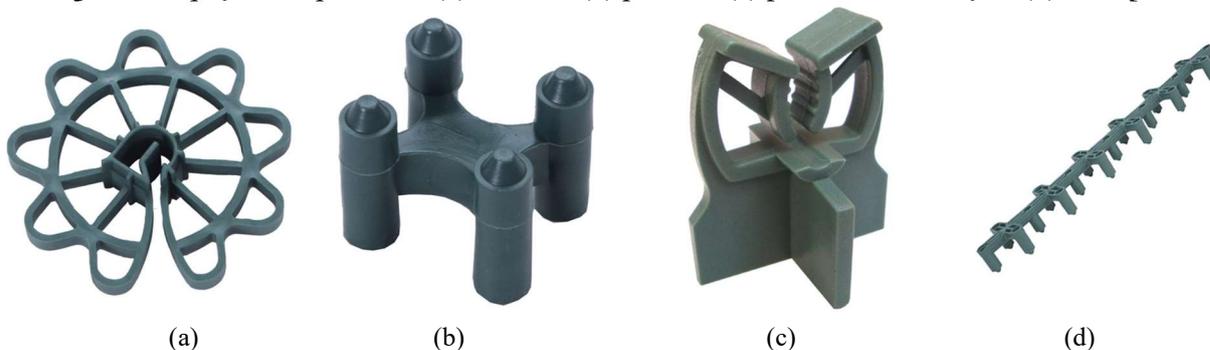
(Fonte: autora, 2017; Peixoto e Gomes, 2007)

Como vantagens, o espaçador cimentício possui coeficiente de expansão semelhante à matriz de concreto e capacidade de sustentar maiores cargas em função, caso as propriedades sejam semelhantes às do concreto (ROSTAM, 2005). A indústria de espaçadores do tipo cimentício indica que dispositivos fabricados com fibra ainda proporcionam alta resistência, estabilidade, são adequados para concretos impermeáveis e atendem os requisitos para resistência ao fogo (HALFEN, 2019). Para garantir um controle de qualidade, espaçadores cimentícios fabricados em canteiro de obra não são permitidos no Reino Unido (BSI 8110-1, 1997).

Os espaçadores plásticos podem ser fabricados a partir de polímeros como polipropileno, polietileno de alta densidade e poliestireno, através da transformação termoplástica de moldagem por injeção (PEIXOTO e GOMES, 2006).

Este tipo de distanciador tem como principal característica a versatilidade (SHAW, 2008), pois pode ser aplicado em qualquer face da armadura sem necessidade de amarração nas barras, como nas laterais das fôrmas (Figura 6a e Figura 6c), quando o mesmo possui um dispositivo de fixação. Para o fundo das fôrmas, os espaçadores podem prover apoio pontual da armadura, como o espaçador popularmente chamado de cadeirinha (Figura 6b) ou apoio contínuo, servindo de suporte para um maior número de barras, como o espaçador comercialmente nomeado de centopeia (Figura 6d).

Figura 6: Espaçadores plásticos: (a) circular; (b) pontual; (c) pontual com fixação; (d) centopeia.



(Fonte: Peri Plásticos, 2020).

A utilização deste tipo de espaçador gera tempo de aplicação menor no processo de montagem da armadura e custo final reduzido, uma vez que a produção não é realizada em canteiro de obra, diminuindo o uso da mão de obra (PEIXOTO e GOMES, 2006). Entretanto, os espaçadores plásticos possuem coeficiente de expansão térmica diferente do concreto, podem sofrer envelhecimento sob exposição ao sol e em ambiente marinho, além da possibilidade maior de deformação sob aplicação de carregamento (ALZYUOD, 2015).

Alzyoud, Wong e Buenfeld (2016) consideram que os espaçadores plásticos permitem com maior facilidade a passagem devido à maior porosidade entre espaçador/concreto, seguido dos espaçadores de argamassa e espaçadores de aço. Como exemplo, se um espaçador tem a capacidade de aumentar a difusividade por um fator de quatro, o efeito é similar ao reduzir o cobrimento pela metade, levando à corrosão em um quarto do tempo esperado.

3.3 FATORES INFLUENTES NA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA DAS BARRAS

O cobrimento válido deve ser considerado como o cobrimento mensurado após a concretagem do elemento estrutural, devido ao processo de execução da estrutura que acarreta em carregamento proveniente dos operários e equipamentos sobre as armaduras, sendo este valor relacionado ao cobrimento mínimo permitido na NBR 6118 (ABNT, 2014).

A garantia do cobrimento especificado em projeto na execução do elemento estrutural, considerando as tolerâncias normativas, é dependente de alguns fatores. A interferência de cada fator é descrita a seguir.

3.3.1 Montagem e configuração da armadura

a) Amarração das barras de armadura

No Brasil, a NBR 14931 (ABNT, 2004) indica que a montagem da armadura deve ser realizada através de amarração com arame recozido, e que a distância entre os pontos de amarração para malhas de lajes não deve ultrapassar 35 cm.

Com maior detalhamento, a BS 7973-2 (2000) recomenda que as barras no perímetro devem ser amarradas em todas as interseções, e para barras com diâmetros inferiores a 20 mm, armadura usual em lajes, interseções alternadas devem ser amarradas. Assim, há margem para interpretação que para uma malha com afastamento entre barras de 10 cm, os pontos de amarração deveriam ser espaçados até 20 cm, quando a armadura usual é aplicada.

Quando a armadura for composta por barras de 25 mm ou mais, as barras podem ser amarradas além das interseções, mas não excedendo 50 vezes o diâmetro da barra (BS 7973-2, 2000).

A EHE 08 (2008) também recomenda a amarração de todos os pontos no perímetro da malha de armadura de lajes. Além disso, as interseções das malhas compostas com barras de diâmetro inferior ou igual a 12 mm devem ser amarradas de forma alternada em padrão escalonado.

Ao comparar cobrimento entre malhas com configurações distintas de amarração, nota-se resultados significativos na espessura de cobrimento final executada. A malha mais rígida, com ligação entre barras a cada 15 cm, apresenta uma espessura de cobrimento mais próxima à indicada em projeto quando comparada com a malha com amarrações alternadas, a cada 30 cm. Sendo assim, esse fator torna-se influente para a garantia da espessura de cobrimento (MARAN *et al.*, 2015).

b) Diâmetros da malha de armadura

Os diâmetros das barras de aço também geram influência direta na obtenção do cobrimento (MENNA BARRETO *et al.*, 2014; MARAN, 2015). A NBR 6118 (ABNT, 2014) especifica que lajes armadas em duas direções têm outros mecanismos resistentes e assim os valores de diâmetro das armaduras positivas são reduzidos, ou seja, possuem área de seção de armadura menores em relação aos elementos estruturais lineares.

Campos Filho (2014) recomenda para a armadura positiva, colocada na face inferior da laje, o diâmetro mínimo de 4,2 mm. Entretanto, malhas formadas por barras de aço de menores diâmetros, como 4,2 mm e 5,0 mm, ao entrarem em contato com a carga correspondente aos operários, sofrem deformações plásticas elevadas, ultrapassando os limites de tolerância de execução propostos em norma para o cobrimento mínimo, independentemente de ser considerado controle rigoroso ou execução normal no projeto.

Como possível solução, é sugerido ou a utilização de passarelas para evitar a deformação da armadura frente ao carregamento (NR 18 e ABNT NBR 6118, 2014) e/ou a não utilização de diâmetros mais finos na montagem de lajes (MARAN, 2015).

O diâmetro de armadura possui influência na obtenção de cobrimento, pois diâmetros maiores resultam em maior rigidez do conjunto da malha e, conseqüentemente, as deformações permanentes ocasionadas sob a ação das cargas de execução não interferem no cobrimento mínimo executado (MARAN, 2015; OLIVEIRA, 2018).

Em levantamentos realizados em obras de Porto Alegre/RS, Palm (2017) e Oliveira (2018) corroboram que a perda de cobrimento após o lançamento do concreto é menor para malhas de armadura formadas por barras de aço de maiores diâmetros, como 8,0 e 10,0 mm.

c) Carga sobre armadura

Takata (2009), Palm (2017) e Oliveira (2018) colocam que a logística durante a montagem da armadura é negligenciada e o fluxo de trabalhadores sobre a armadura acaba interferindo no posicionamento das barras de aço.

Diversas normas apontam a importância de garantir o posicionamento da armadura indicado em projeto durante a montagem e concretagem da estrutura (NZ 3109, 1997; IS 456, 2000; UNIT 1050, 2005; BS 8500-1, 2006; EHE 08, 2008; ACI 318, 2014).

A norma regulamentadora NR 18 (2011), no item 18.8.4, orienta como obrigatória a disposição de pranchas de madeira para a circulação da mão de obra. Esta indicação pode estar relacionada para impedimento de possíveis acidentes dos operários com a armadura, como quedas, e/ou evitar o contato dos operários com o concreto fresco. Como esta é uma regulamentação direcionada para saúde e segurança do trabalhador, o uso das pranchas tem indicação para estarem apoiados sobre a armadura. Apesar de não ser o ideal para garantir o posicionamento da armadura, a carga seria distribuída uniformemente e as barras sofreriam menos deformação excessiva, especialmente se as pranchas estiverem apoiadas diretamente nas fôrmas.

O item 8.1.6.1 da NBR 14931 (ABNT, 2004) recomenda que antes e durante o lançamento do concreto devem estar dispostos, sobre a fôrma, caminhos e passarelas para evitar o possível deslocamento da armadura.

Caso as orientações da NR 18 ou da NBR 14931 (ABNT, 2004) fossem seguidas, o problema quanto à obtenção da espessura de cobertura estaria parcialmente resolvido, já que as armaduras sofreriam menos deformações plásticas e os espaçadores não seriam deslocados.

No entanto, o emprego de pranchas constituindo caminhos e passarelas para deslocamento de operários e equipamentos sem contato direto com as armaduras não é nem um pouco comum nas concretagens de lajes como constatado em diversos trabalhos de acompanhamento *in loco* da execução desses elementos estruturais.

Através da observação durante a concretagem das lajes foi possível analisar o tráfego de operários e equipamentos sobre a malha de armadura. Em análise inicial, na dissertação de mestrado, comparando as deformações plásticas geradas pela carga de operários, foi constatado que um operário caminhando sobre a armadura e depositando todo o peso através de um pé é mais crítico que a carga gerada por este mesmo operário parado sobre a malha, que resulta em maior distribuição de carga (MARAN, 2015).

A partir desta análise, buscou-se observar o fluxo de operários trafegando sobre a armadura e produzindo uma carga local, ou seja, a forma mais concentrada de aplicação para averiguar a situação mais crítica de carregamento, como mostra a Figura 7.

Figura 7: Tráfego de operários e equipamentos durante a execução de lajes maciças: (a) execução de nivelamento do concreto; (b) e (c) lançamento do concreto fresco; (d) operário próximo ao espaçador durante a execução; (e) movimentação de mangote para lançamento do concreto; (f) fluxo de operários



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

(Fonte: autora, 2018; Palm, 2017; Oliveira, 2018; Maran 2015).

Quando verificada a carga próxima ao espaçador, foi observado que geralmente a carga máxima de tráfego corresponde a dois operários caminhando bastante próximos entre si. Esta situação ocorre principalmente no manuseio do mangote da bomba durante o lançamento do concreto fresco na fôrma, como ilustrado na Figura 7 (c), (e) e (f). Esta situação acarreta em uma maior solicitação das armaduras e, conseqüentemente, em deformações plásticas mais elevadas nas barras.

Pela análise dos procedimentos usuais de concretagem, ilustrados na Figura 7, identifica-se duas situações para o mangote: na primeira, o equipamento esta horizontal e apoiado sobre um

número bastante grande de barras de armadura transversais, distribuindo seu peso sobre essas diversas barras e não constituindo carga relevante ou crítica para a deformação plástica da armadura; na segunda, o mangote tem sua extremidade elevada pelo operário, somando sua carga à do operário. Assim, o efeito do mangote pode ser considerado através do peso padrão considerado para um operário, que deve incluir seu peso corporal, os equipamentos e EPIs por ele utilizados, e uma parcela do peso do mangote correspondente à extremidade elevada do mesmo.

Em trabalho realizado para análise da influência do concreto fresco disposto sobre a malha, Maran (2015) indica que as cargas correspondentes ao lançamento do concreto foram consideradas insignificantes. Esse resultado foi obtido a partir de ensaio experimental, onde a simulação de concretagem mostrou que, ao adensar o concreto, a carga é transferida para as fôrmas e o concreto acaba servindo de apoio da armadura, gerando uma carga final igual a zero. Mesmo durante o lançamento, o concreto fresco tem um comportamento de fluido, contornando a armadura e não aplicando cargas significativas sobre a mesma.

Sajidh e Suhoothi (2017), em análise computacional para malha formada por diâmetro 10,0 mm e espaçamento entre barras de 20 cm, indicam que a disposição do concreto fresco sobre a armadura com distribuição de espaçadores alinhados a cada 80 cm gera uma deformação de 10,6 mm. Para espaçadores distribuídos de forma escalonada a cada 60 cm, a carga do concreto resulta em uma deformação de 9,3 mm. Entretanto os autores consideram que o volume de concreto da laje esteja somente apoiado sobre a barra de aço, não ponderando que grande parte da carga da massa de concreto seja amparada pelas fôrmas. Tal situação é irreal e os resultados obtidos pela simulação computacional são muito maiores que os constatados experimentalmente ou *in loco*, não podendo ser considerados como corretos.

3.3.2 Posicionamento do espaçador

Fazer uso de espaçadores sem nenhum critério pode resultar em escolha inadequada, como por exemplo, dispositivos destinados ao uso em fundo de fôrmas sendo empregados na lateral do elemento. A CRSI (2018) indica a possibilidade do uso de espaçadores contínuos (centopeia) nas laterais das fôrmas, desde que amarrados corretamente nas armaduras.

Weber (2014) destaca a desatenção quanto ao uso de espaçadores em levantamento em obras do Vale do Taquari, RS, como mostra o Quadro 5. Diversas obras sequer dispõem dos

dispositivos na montagem da armadura, enquanto outras utilizam espaçadores de forma equivocada, como é o caso do uso de espaçador circular em fundo de lajes.

Quadro 5: Uso de espaçadores no Vale do Taquari

Obra	Elemento Estrutural		
	Pilar	Viga	Laje
A	Circular (25 mm)	Sem uso de espaçador	Não medido
B1	Sem uso de espaçador	Sem uso de espaçador	Sem uso de espaçador
B2	Sem uso de espaçador	Não medido	Não medido
C1	Sem uso de espaçador	Centopéia (25 mm)	Não medido
C2	Não medido	Sem uso de espaçador	Não medido
C3	Centopéia (25 mm)	Centopéia (25 mm)	Não medido
D	Não medido	Circular (15 mm)	Circular (15 mm)
E	Circular (30 mm)	Circular (30 mm)	Não medido
F	Sem uso de espaçador	Sem uso de espaçador	Não medido
G	Sem uso de espaçador	Sem uso de espaçador	Sem uso de espaçador

(Fonte: Weber, 2014).

O autor relata que na obra D foram utilizados espaçadores de 15 mm, sendo o cobrimento nominal especificado em projeto de 20 mm, demonstrando uma falta de controle na compra e/ou no recebimento do material. Este erro quanto à diferença entre o cobrimento especificado em projeto e o espaçador utilizado em obra também é apontado por Palm (2017).

Sem embasamento normativo ocorre a falha de amarração e distribuição irregular (Figura 8a), assim como posicionamento contrário do dispositivo (Figura 8b). Desta forma, a durabilidade é afetada pela carência de exigência técnica e pela falta de orientações para determinar um controle de execução eficiente, como a indicação de responsável pela conferência antes da continuidade dos serviços de concretagem.

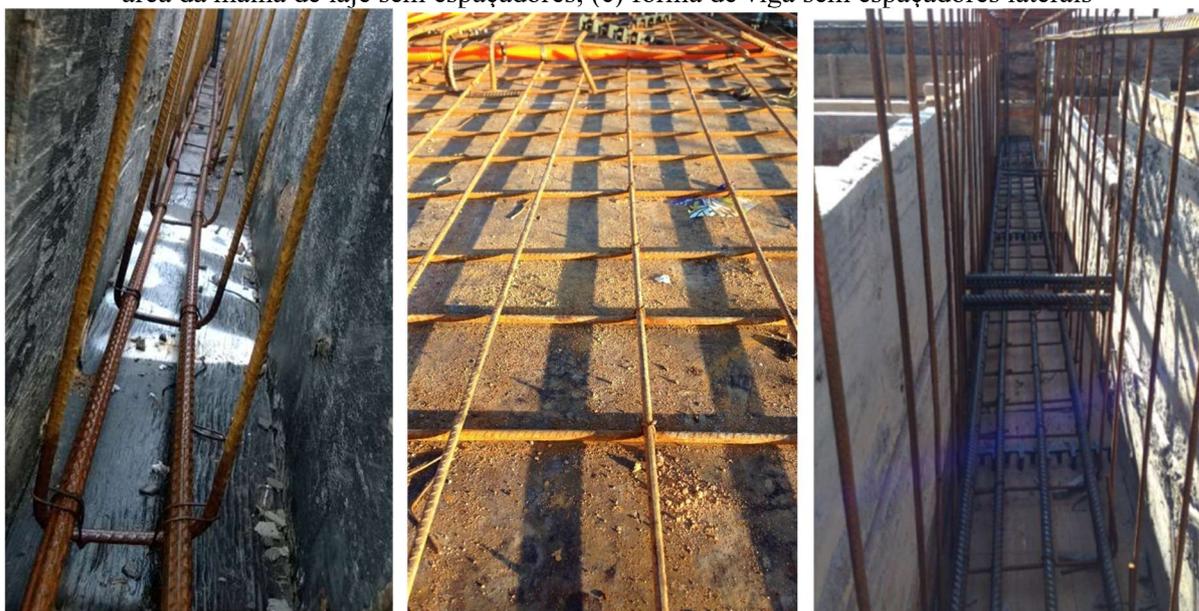
Figura 8: Uso inadequado de espaçadores (a) espaçador multiapoio amarrado de forma inadequada na armadura do pilar; (b) espaçador multiapoio disposto de forma contrária no fundo da viga



(Fonte: autoria própria, 2018).

A desatenção com o cobrimento é, também, confirmada por Freiburger (2015) em levantamento no interior do RS. Foi observado que algumas obras não utilizavam espaçadores nas vigas e outras empresas optaram por não utilizar o dispositivo em nenhum elemento estrutural. De alguma forma, todas as obras foram contra as prerrogativas normativas, ignorando o risco à durabilidade e ao desempenho da edificação. Esta falta de controle de execução é vista de forma recorrente em canteiro, onde a colocação de espaçadores é negligenciada, conforme Figura 9.

Figura 9: Elementos estruturais com falha no uso do espaçador: (a) fôrma de viga sem espaçadores; (b) área da malha de laje sem espaçadores; (c) fôrma de viga sem espaçadores laterais



(a)

(b)

(c)

(Fonte: autoria própria, 2018; Palm, 2017; Weber, 2014).

Para o funcionamento correto da estrutura, o posicionamento dos espaçadores é fator determinante. A grande parte das empresas não possui planejamento ou metodologia para a disposição de espaçador, sendo um dos pontos que ocasionam a variabilidade de cobrimento, que costuma ser significativamente alta (CAMPOS, 2013).

3.3.3 Distribuição de espaçadores

Em Porto Alegre/RS, Oliveira (2014) realizou o levantamento em 22 empresas para apurar o uso de espaçadores. Quanto à definição da disposição dos espaçadores em elementos estruturais, 63% das obras avaliadas indicaram o engenheiro como responsável, enquanto 17% tem o mestre de obra sob essa responsabilidade. Para o restante do levantamento, 17% das obras admitiram ter outro profissional como responsável, porém não houve a definição do cargo. Os 3% restantes têm o técnico de edificações como responsável da definição da distribuição dos espaçadores.

Nesta mesma pesquisa, a responsabilidade pela distribuição dos espaçadores foi atribuída ao ferreiro em 80%, ao mestre em 10% das obras e os 10% restantes atribuída ao auxiliar de produção. Ainda, a maioria das empresas entrevistadas afirma que faz a conferência da distribuição dos espaçadores antes da continuidade de execução do elemento estrutural. Cabe salientar que o trabalho realizado por Oliveira (2014) foi resultante de um questionário aplicado nas empresas.

Como indicação de responsabilidade, a CRSI RB4.1 (2016) aponta que a construtora deve fornecer o sistema que usa quanto aos espaçadores, incluindo a distribuição entre os dispositivos baseado na capacidade de carga dos espaçadores individuais, o peso da armadura a ser suportada, cargas de execução e a rigidez necessária do sistema. Embora apresente essas medidas, nenhum detalhamento quanto aos critérios preconizados na norma foi encontrado.

A NBR 14931 (ABNT, 2004) não faz menção ao posicionamento dos espaçadores no elemento estrutural, nem uma estimativa de uso por metro quadrado nas lajes, por exemplo. Entretanto, outras especificações normativas apontam o uso de espaçadores durante a montagem dos elementos estruturais.

A IS 456 (2000) indica que espaçadores e/ou apoios de armadura negativa devem ser posicionados com espaçamento máximo de 100 centímetros e espaçamento mais próximo quando se fizer necessário, não trazendo maiores dados.

Com um maior delineamento, a EHE 08 (2008) recomenda o uso de espaçadores em função do elemento estrutural e da armadura a ser apoiada. Como mostra a Tabela 17, o espaçamento máximo para armadura inferior de lajes é definido entre 50 vezes o diâmetro da armadura e 100 centímetros, enquanto para a armadura superior, os caranguejos devem ter espaçamento máximo de 50 cm.

Tabela 17: Distribuição de espaçadores

Elementos		Distância máxima
Elementos de superfície horizontal (placas, lajes, alicerces e lajes de fundação, etc.)	Armadura inferior	$50 \varnothing \leq 100 \text{ cm}$
	Armadura superior	$50 \varnothing \leq 50 \text{ cm}$
Paredes	Cada malha	$50 \varnothing \leq 50 \text{ cm}$
	Separação entre malhas	100 cm
Vigas ¹⁾		100 cm
Pilares ¹⁾		$100 \varnothing \leq 200 \text{ cm}$

¹⁾ Ser disposto, pelo menos, três planos de espaçadores por vão, no caso das vigas, e pela seção, no caso de pilares, acoplados aos aros ou estribos. \varnothing Diâmetro da armadura em que o espaçador será acoplado

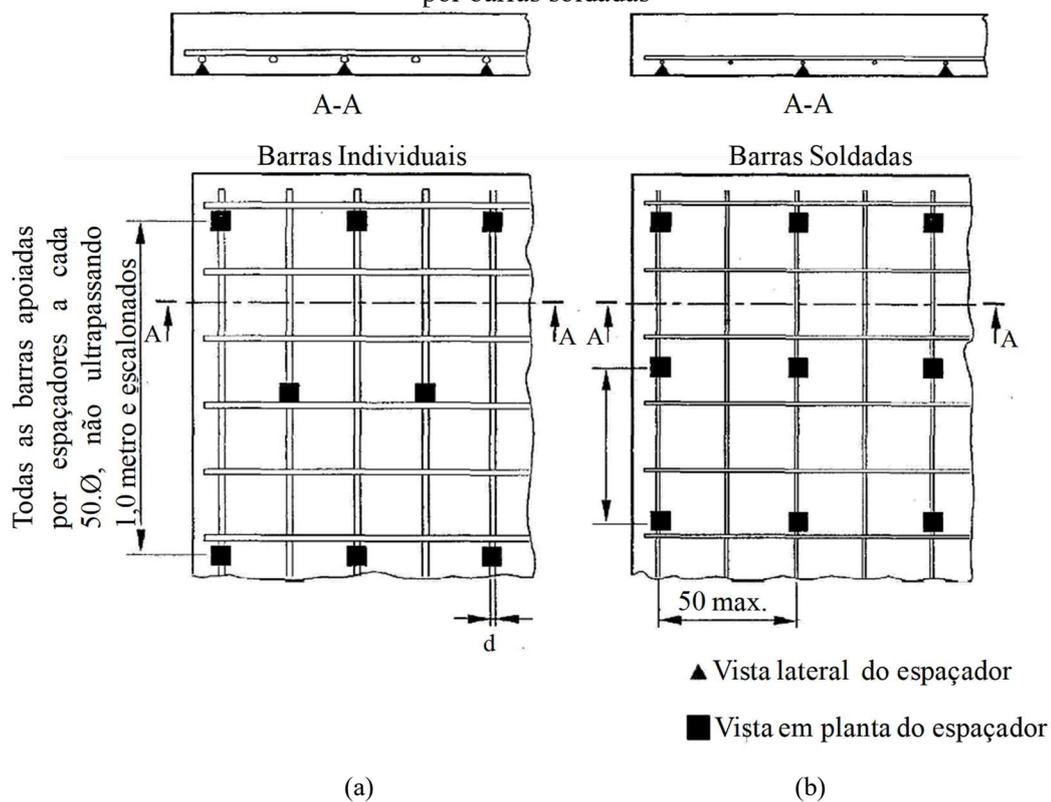
(Fonte: EHE 08, 2008).

Shaw (2008) relata que por muitos anos não houve orientação publicada sobre como obter o cobrimento no Reino Unido, sendo o posicionamento da armadura fator crucial para o desempenho da estrutura.

A norma britânica BS 7973-2 (2001) especifica a montagem das armaduras, as quais devem ser amarradas adequadamente para garantir o posicionamento especificado em projeto. As barras das malhas no perímetro de lajes devem ser amarradas em todas as interseções.

A norma também coloca que todas as barras de armadura mais próximas da face inferior devem ser suportadas por espaçadores onde a distribuição não exceda 50 vezes o diâmetro ou 100 cm, o menor deles, devendo ser escalonados como mostra a Figura 10.

Figura 10: Especificação de distribuição de espaçadores por norma: (a) distribuição de espaçadores para malha composta por barras individuais; (b) distribuição de espaçadores para malhas compostas por barras soldadas



(Fonte: BS 7973-2, 2001)

Ao escalonar a disposição dos espaçadores, reduz-se a criação de uma linha de fraqueza ao longo do cobrimento na direção de tração (ALZYOUD, 2015). A malha soldada deve ser suportada por espaçadores onde a distribuição não exceda 50 cm em duas direções perpendiculares.

Nota-se que a imagem representativa da norma britânica não atende a própria descrição, onde nem todas as barras estão apoiadas, somente atendendo ao critério quanto à armadura principal, inferior, da laje. Assim, mesmo existindo algumas recomendações prescritas em normas internacionais, a interpretação é subjetiva, podendo resultar em cobrimentos inadequados.

Apesar da associação entre espessura e qualidade de revestimento com a durabilidade da estrutura já estar consolidada na bibliografia, nota-se a negligência quanto à execução do elemento estrutural em função da ausência de metodologia para distribuição de espaçadores. Deste modo, alguns trabalhos têm sido realizados a fim de relacionar diferentes distribuições de espaçadores com a espessura de revestimento obtida.

Em pesquisa realizada por Maran *et al.* (2015), o controle de execução mostra-se eficiente na melhoria de revestimento. A amarração de armadura, assim como a distribuição de espaçadores mostram-se significativos, mas ambos os fatores trabalham de forma independente. Além disso, esses fatores mostram-se inversamente proporcionais ao revestimento, ou seja, quanto mais próximos os pontos de amarração ou distribuição de espaçadores, maior a espessura de revestimento médio e menor o valor mínimo obtido. Apesar destes fatores terem sido controlados, independente da configuração, pontos com espessura abaixo do revestimento mínimo normativo foram encontrados.

Em estudo de caso em Porto Alegre/RS, Palm (2017) aponta que sem interferência na montagem das armaduras, nem metade dos pontos medidos apresentam valores dentro do intervalo entre revestimento nominal e revestimento mínimo. Em malhas com controle de execução, tanto para amarração como para distribuição dos espaçadores, as armaduras compostas por barras de diâmetro 5,0 mm apresentaram 40% e 65% de valores fora de um intervalo considerado admissível em relação ao revestimento especificado e as tolerâncias de execução, para afastamento entre espaçadores de 60 cm e 80 cm, respectivamente. Além disso, em distribuições mais próximas, 20 cm e 40 cm, valores abaixo do mínimo especificado foram medidos. Para malhas com barras de 6,3 mm, a configuração mais crítica foi para a distribuição de espaçadores de 60 cm, onde 47,5% das medições mostram valores de revestimento inadequados. Neste caso, nas demais distribuições, 20 cm, 40 cm e 80 cm, também foram encontrados valores pontuais abaixo do mínimo especificado em norma, e assim, mesmo com o controle de execução, é difícil cumprir as especificações normativas com a tolerância proposta.

Ghiggi (2018), a partir de levantamento em obra na cidade de Guaporé/RS, coloca que 62% dos cobrimentos ficam abaixo do especificado em lajes quando não há nenhuma interferência de distribuição dos espaçadores, ou seja, o método empírico ou a simples ausência de método é utilizado em obra. Quando controladas, as lajes com cobrimento especificado de 20 mm e malha com 5,0 mm de diâmetro passam por melhorias. Ao atender a norma internacional que dispõe um afastamento de $50 \varnothing$, o afastamento de 25 cm atinge um cobrimento médio de 14,8 mm, mas ainda abaixo da tolerância permitida em norma. Ao apoiar todas as interseções, correspondente a um afastamento entre espaçadores de 20 cm, a média de cobrimento alcança 16,2 mm. Entretanto, mesmo com o cobrimento médio dentro da tolerância, alguns pontos apresentam cobrimento abaixo do valor mínimo.

Sendo assim, é perceptível que até mesmo com controle de execução para amarração de armadura e/ou distribuição de espaçadores ainda é difícil atingir as recomendações normativas com indicação de que o cobrimento mínimo deve ser garantido em qualquer ponto da estrutura.

3.4 OUTROS FATORES

Embora o foco deste trabalho seja a análise de fatores que influenciam a deformação plástica das armaduras para cargas de execução provenientes da mão de obra, cabe salientar a presença de outros pontos que também intervêm na garantia de cobrimento, conforme exemplificados nos itens a seguir:

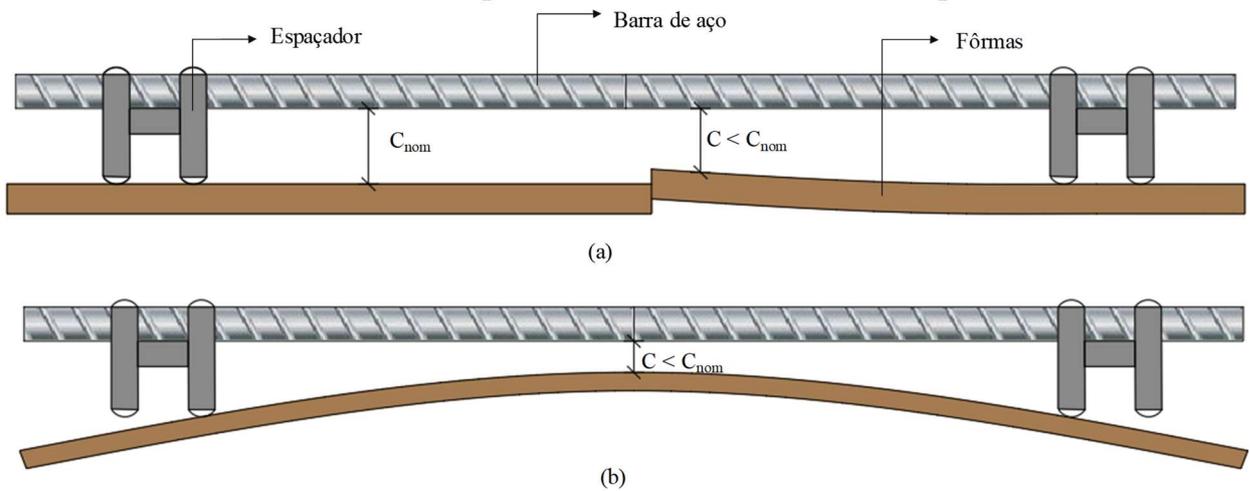
a) Fôrmas

Oliveira (2018) registra a influência do sistema de fôrmas, quanto à falta de planicidade, abaulamento das chapas, inconformidade de ligação entre chapas e trecho da faixa de reescoramento na obtenção de cobrimentos insatisfatórios.

A qualidade das chapas das fôrmas e o tipo de material empregado nas mesmas também podem modificar valores de cobrimento. Mesmo sendo adequadas em uma primeira utilização, as chapas podem sofrer danos progressivos ao longo de sua reutilização, comprometendo o cobrimento final executado.

O desnivelamento das fôrmas afeta diretamente a espessura de cobrimento antes mesmo da concretagem das lajes. Situações como a falha de nivelamento entre chapas das fôrmas (Figura 11 a) ou abaulamento da chapa (Figura 11 b) podem reduzir o cobrimento especificado em projeto.

Figura 11: Influência do desnivelamento das fôrmas na espessura de cobrimento: (a) falha de nivelamento das chapas da fôrma; (b) abaulamento das chapas



(Fonte: elaborado pela autora, 2020).

A NBR 14931 (ABNT, 2004) preconiza quanto ao nivelamento das fôrmas que “durante a concretagem de elementos estruturais de grande vão deve haver monitoramento e correção dos deslocamentos do sistema de fôrmas não previstos em projeto”.

A norma também dispõe de uma tolerância para o nivelamento das fôrmas, antes da concretagem, com relação às cotas de projeto. A tolerância estabelecida deve respeitar:

$$5\text{mm} \leq t \leq \ell/1000 \leq 10 \text{ mm}$$

Onde:

t: tolerância de nivelamento da fôrma, em milímetros;

ℓ: maior dimensão da fôrma, em metros.

Embora a tolerância das fôrmas dependa do vão do elemento estrutural, para a Figura 11a, a relação normativa seria dada para o vão entre os espaçadores, sendo este bem menor quando comparado ao vão total da laje. Entretanto, a tolerância mínima de desnivelamento normativa é imposta em 5,0 mm, seja por desalinhamento das bordas ou curvatura, e foi o valor considerado neste trabalho.

Avaliando a tolerância de execução usual de 10 mm para obras correntes na especificação de cobrimento, metade deste valor é consumido pela tolerância mínima de desnivelamento das fôrmas (5,0 mm). Os 5,0 mm restantes para tolerância de execução contemplariam as deformações plásticas das armaduras, cargas acidentais e o desempenho do espaçador quanto à deformabilidade.

b) Desempenho do Espaçador

Quando os espaçadores cimentícios são escolhidos, estes devem ter resistência, permeabilidade, higroscopicidade, expansão térmica, e demais propriedades, semelhantes às características do concreto estrutural no qual é empregado (EHE 08, 2008; EN 13670, 2009; UNIT 1050, 2005). A NZS 3109 (1997) sugere que este tipo de espaçador, além de ser compatível com a qualidade do concreto, deve possuir uma resistência à compressão mínima de 40 MPa.

Quando espaçadores plásticos são utilizados deve-se garantir a aderência entre o dispositivo e o concreto (UNIT 1050, 2005). Entretanto, a interligação entre espaçador plástico e o concreto pode sofrer fissuração quando exposta a altas temperaturas, o mesmo não ocorre com espaçadores de argamassa sob as mesmas condições, em decorrência das características semelhantes dos materiais, como o coeficiente de dilatação térmica (ADAMATTI, 2016).

Em sua percepção, Rostam (2005) reitera que os espaçadores plásticos por vezes não são compatíveis com o concreto, como por exemplo, o coeficiente de dilatação térmica, além de envelhecimento e perda de desempenho frente à exposição solar e ao ambiente marinho. O autor recomenda que em ambientes altamente agressivos, como ambientes marinhos, os espaçadores de argamassa são uma escolha mais adequada, pois poderiam ter as mesmas características do concreto estrutural do elemento.

A inserção dos espaçadores pode dar origem à passagem de água e íons cloreto, por exemplo, devido à interface espaçador/concreto apresentar maior porosidade, maior quantidade de água devido à exsudação e assim, maior relação água/aglomerante. Este fator poderia ser corrigido com a concepção de espaçadores plásticos com superfície de textura rugosa, para auxiliar na aderência e diminuir a porosidade na interface (MUSLIM, WONG e BUENFELD, 2018).

A norma EHE 08 (2008) coloca como alternativa para melhorar a aderência a recomendação que os espaçadores fabricados com material não cimentício apresentem furos, cuja seção total seja no mínimo equivalente a 25% da área total do espaçador.

Algumas normativas internacionais estabelecem controle de fabricação do espaçador de modo a auxiliar na obtenção do cobrimento projetado na execução da estrutura. Como exemplo, a norma britânica BS 7973-1 (2001) e o comitê euro-internacional CEB (1990) dispõem as categorias de espaçadores conforme a aplicação, como mostra o Quadro 6.

Quadro 6: Classificação dos espaçadores

Categoria	Armadura	Aplicação
Leve (L)	Armadura positiva / Estribos	Fornecer cobertura em elementos verticais à armadura mais próxima da superfície do concreto ou à armadura horizontal em pequenas seções não sujeitas a tráfego de pedestres. Não é adequado para barras com diâmetro maior que 16 mm.
Normal (N)	Armadura positiva / Estribos	Fornecer cobertura de armadura para diâmetro das barras ≤ 20 mm
Pesado (P)	Armadura positiva / Estribos	Fornecer cobertura de armadura para diâmetro das barras > 20 mm
Caranguejos (C)	Armadura negativa	Para suportar armaduras superiores de lajes, assim como separar as camadas de armadura

(Fonte: BS 7973-1, 2001).

A norma também coloca que a tolerância de produção na dimensão dos espaçadores que proporcionam o cobrimento deve ser ± 1 mm para cobrimentos de até 75 mm. As características dos espaçadores são definidas para não causar nenhum tipo de deterioração na armadura, não permitir a passagem de água, não causar desbastamento em caso de incêndio, ter resistência adequada e deflexão limitada. Além disso, outros requisitos de desempenho do dispositivo são dispostos, como: identificação do cobrimento, fixação, estabilidade e carregamento (BS 7973-1, 2001).

A CRSI (2018) destaca que os espaçadores não são destinados ao suporte de mangotes de bombas de concreto, pistas para equipamentos de transporte ou cargas semelhantes, a menos que sejam especificamente projetados para este fim.

Quanto à designação dos espaçadores no Brasil, somente a NBR 14931 (ABNT, 2004) faz menção quanto ao uso na montagem do elemento estrutural. Apesar da indicação, nenhuma outra recomendação é sugerida. Assim, a produção e o uso deste dispositivo são feitos de forma não controlada, influenciando diretamente no desempenho final da estrutura.

Como mostra a Figura 12, espaçadores com algum tipo de inconformidade são facilmente encontrados dentro de lotes comercializados. Por ser uma peça pequena, os espaçadores não conformes podem ser facilmente dispostos durante a montagem da armadura caso não ocorra uma inspeção prévia do material ou a exigência normativa para o requisito dimensional.

Figura 12: Espaçadores com má qualidade comercializados



(Fonte: Menna Barreto, S.D)

A comercialização de espaçadores de má qualidade, devido à falta de orientação normativa ou de órgão de fiscalização responsável para produção, pode afetar o cobrimento. Como exemplo da necessidade de requisitos de desempenho na fabricação de espaçadores, a Figura 13 mostra como o peso da armadura durante a montagem pode prejudicar o cobrimento, através do esmagamento do dispositivo.

Figura 13: Esmagamento de espaçador: (a) esmagamento do espaçador cadeirinha; (b) esmagamento do espaçador multiapoio

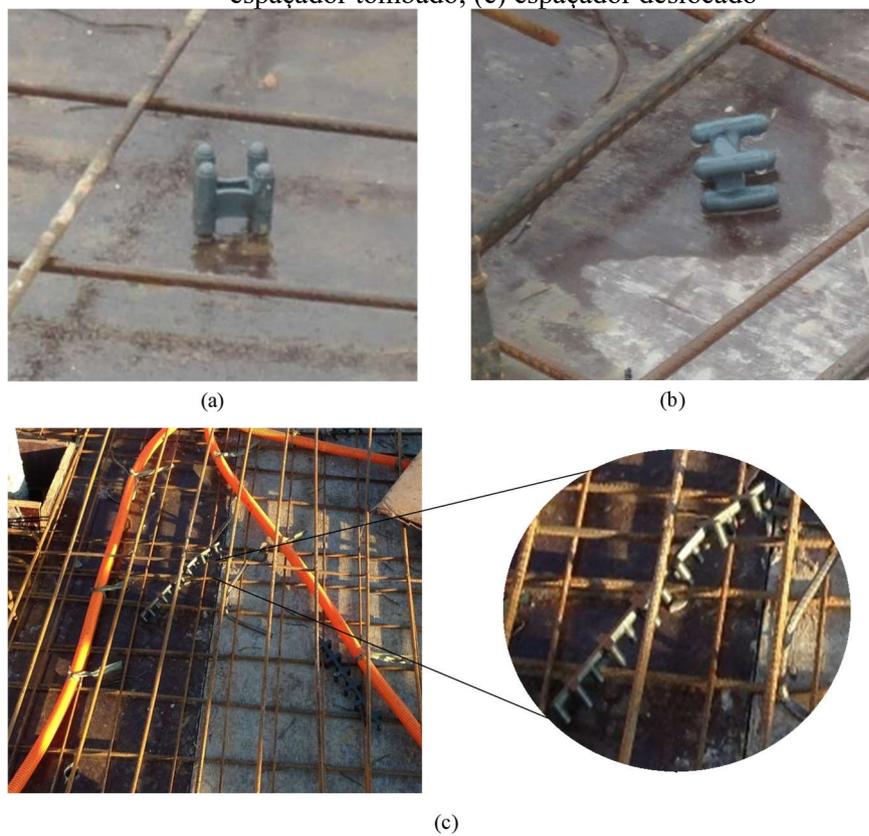


(Fonte: Menna Barreto, 2014; Oliveira, 2018).

Em estudo de caso, Takata (2009) aponta que durante a montagem da armadura, os espaçadores plásticos foram facilmente posicionados em vigas e pilares. Todavia, em lajes vários espaçadores estavam fora da posição devido ao tráfego de pessoas e equipamentos, provocando a disposição inadequada em relação à fôrma e resultando em um cobrimento ineficiente.

Isso ocorre devido à falta de dispositivos de fixação, sejam em espaçadores pontuais, como cadeirinha, ou espaçadores multiapoio, como centopéia, como pode ser visto na Figura 14.

Figura 14: Desempenho do espaçador quanto à fixação: (a) espaçador deslocado; (b) espaçador tombado; (c) espaçador deslocado



(Fonte: Menna Barreto, 2014; Palm, 2017)

Em estudo do comportamento de espaçadores plásticos, Menna Barreto (2014) avaliou diversos requisitos de desempenho, como verificações dimensionais, de identificação, de fixação, de estabilidade, de capacidade de carga e de aplicação.

Após a aplicação de uma metodologia de testes baseados em uma compilação de normas internacionais, a autora concluiu que nenhum modelo de espaçador se mostrou completamente satisfatório, dentre as 180 unidades testadas. Entretanto, todos os requisitos propostos puderam ser satisfeitos, e assim, é possível ter um dispositivo que atenda a todos os requisitos de desempenho especificados

c) Cargas acidentais

As cargas acidentais provenientes das cargas de execução são observadas em alguns trabalhos. Durante a montagem das armaduras negativas, Oliveira (2018) observou o empilhamento de materiais de elementos de andaimes fachadeiro sobre as malhas de armadura já posicionadas. Desta forma, a aplicação de cargas acidentais não previstas possivelmente resultam no aumento

de cobertura na face superior devido ao deslocamento das barras de armadura, e a altura útil nas bordas engastadas das lajes diminui.

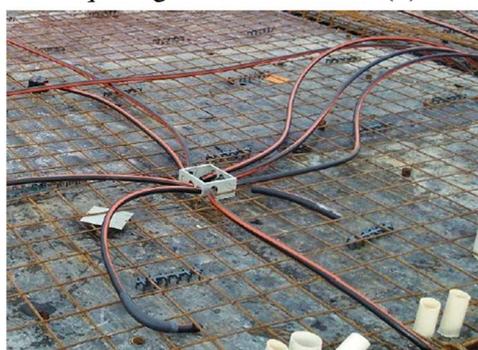
Palm (2017) destaca as cargas acidentais de execução provenientes do apoio dos mangotes para o lançamento do concreto bombeado, apontando uma possível redução de cobertura a partir desta carga acidental.

d) Processos construtivos

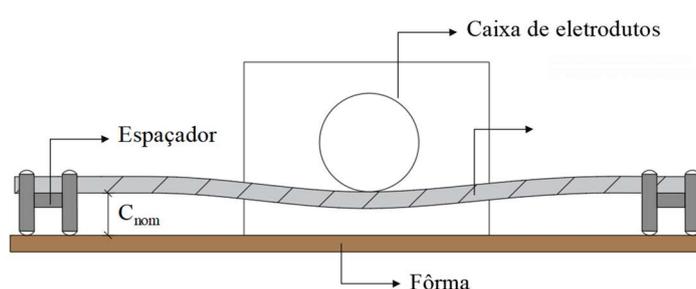
Oliveira (2018) traz, através de observação em obra, alguns erros referentes aos processos construtivos que podem prejudicar o cobertura executado. O autor afirma que as malhas de armadura são montadas em outro pavimento e transportadas para o pavimento de montagem posteriormente, destacando a carga acidental sobre as malhas já posicionadas. Porém este processo executivo também pode ocasionar a deformação das barras antes mesmo do posicionamento da armadura na fôrma.

Outro apontamento relacionado ao processo construtivo é a instalação dos eletrodutos nas caixas de luz. Devido à incompatibilidade entre a cota de entrada dos eletrodutos e o cobertura das lajes analisadas, os eletrodutos pressionam as armaduras contra as fôrmas, reduzindo os cobrimentos antes mesmo do lançamento do concreto, como mostra a Figura 15.

Figura 15: Influência da instalação de eletrodutos na espessura de cobertura (a) instalação de caixas de passagem de eletrodutos (b) desenho esquemático da influência da instalação no cobertura



(a)



(b)

(Fonte: Oliveira, 2018; elaborado pela autora, 2020).

Ressalta-se que somente o estudo de deformação plástica das barras durante a execução não abrange em totalidade dos efeitos relevantes sobre a não obtenção do cobertura especificado. Trabalhos para garantir a obtenção de um cobertura adequado quanto aos problemas relacionados ao desempenho do espaçador, sistema de fôrmas, cargas adicionais e processos construtivos são essenciais para o aprofundamento do conhecimento dentro destas variáveis.

4 ESTUDO PRELIMINAR PARA PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

O estudo preliminar foi realizado como parte desta tese a fim de verificar o comportamento da armadura para diferentes configurações na montagem, como distribuição de espaçadores e amarração da malha de armadura. A partir da comparação dos resultados de espessura de cobrimento com um controle executivo, definiu-se alguns parâmetros de simulação para este trabalho.

4.1 CARACTERÍSTICAS DA OBRA

O empreendimento escolhido é de um condomínio residencial, composto por três torres com apartamentos de 1 ou 2 dormitórios. A obra está localizada na cidade de Porto Alegre/RS e apresenta estrutura convencional em concreto armado com lajes maciças, tendo seus elementos estruturais moldados *in loco*, com características resumidas na Tabela 18.

Tabela 18: Características da obra para estudo preliminar

Resistência característica concreto (MPa)	35
Cobrimento nominal de projeto (mm)	25
Armadura positiva lajes	Ø 6,3 mm c/ 10
Dimensões das lajes (m)	7,60 x 5,50

(fonte: autora, 2019)

O concreto usinado tinha especificação de f_{ck} 35 MPa e as armaduras eram montadas na obra, sendo amarradas com arame recozido. Para garantir o cobrimento nominal de projeto, a obra utilizou espaçadores plásticos do tipo contínuo (centopeia) de 25 mm para as armaduras positivas das lajes.

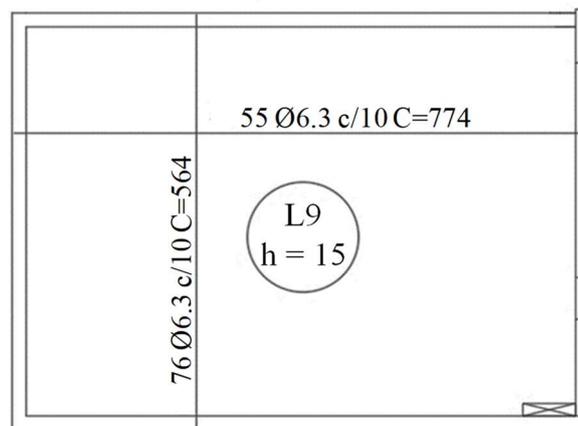
Foram realizadas medições na torre central que é formada por 15 pavimentos. As intervenções foram realizadas em quatro lajes do 10º, 11º, 12º e 14º pavimento. Por possuir múltiplos pavimentos e geometria simétrica, o estudo permitiu configurar diferentes formas de distribuição de espaçadores em lajes com mesma dimensão e mesma armação. Assim, permitiu comparações entre espessura de cobrimento com situações idênticas, diminuindo os fatores não controlados e sendo possível a obtenção de leituras mais confiáveis.

Nos projetos estruturais foram obtidas informações importantes, como a espessura de cobrimento requerida em projeto e a resistência do concreto. Desta forma, é possível avaliar as escolhas de projeto com as exigências normativas.

Ao analisar o projeto, verificou-se que os pavimentos apresentavam diferentes configurações de armadura positiva, tendo diferentes diâmetros na composição da malha de aço das lajes, em função do carregamento e da taxa de armadura considerada.

Desta forma, optou-se pela escolha de lajes com as mesmas configurações de dimensão e armadura para leitura da espessura de cobertura executado. As lajes escolhidas tinham as mesmas dimensões, quantidade e diâmetro das barras, abertura de malha e posicionamento semelhante no pavimento, conforme mostra a Figura 16.

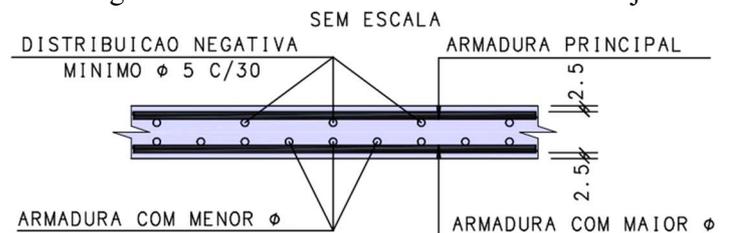
Figura 16: Modelo de configuração das lajes onde foi proposta a intervenção de distribuição de espaçadores



(Fonte: projeto estrutural, 2017)

O cobrimento de projeto é apresentado através de detalhamento em corte, que define a espessura em 25 mm, em ambas as faces da laje. Ainda, o projeto indica o uso obrigatório dos espaçadores e considera controle rigoroso de execução, como mostra a Figura 17.

Figura 17: Posicionamento da armadura nas lajes



OBS.: OBRIGATORIO O USO DE ESPACADORES PLASTICOS
PARA GARANTIR O COBRIMENTO DA ARMADURA
ESTES COBRIMENTOS CONSIDERAM
CONTROLE RIGOROSO DE EXECUCAO.

(Fonte: detalhamento projeto estrutural, 2017)

Da comparação entre as informações contidas no projeto e as prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2014), pode-se identificar pelo menos duas possibilidades:

- a) O projetista considerou classe de agressividade III, com um controle rigoroso de execução ($\Delta c = 5,0$ mm) e um concreto de classe superior (35 MPa) à mínima exigida em norma (30 MPa), possibilitando a redução de 5,0 mm. Desta forma, o cobrimento nominal seria de 25 mm e o cobrimento mínimo de 20 mm.
- b) O projetista considerou classe de agressividade II, com cobrimento nominal de 25 mm, e optou por não aplicar as reduções normativas decorrentes da classe de resistência do concreto ou do controle rigoroso de execução, resultando em tolerância de execução normal ($\Delta c = 10,0$ mm) e conseqüentemente em um cobrimento mínimo de 15 mm.

A análise dos cobrimentos mínimos mensurados após a execução da laje discute acima das duas hipóteses de especificação de cobrimento, uma vez que a escolha dos parâmetros de decisão não é exposta pelo projetista e nem indicada por norma. Destaca-se como uma informação necessária, quanto à avaliação da durabilidade das estruturas, a indicação de classe de agressividade ambiental da região e intenção de vida útil da estrutura projetada (ABECE, 2008).

Em estudo da mesma vertente, também realizado nesta obra, Palm (2017) observou que o espaçador utilizado até então possuía um valor de cobrimento abaixo do especificado em projeto, sendo igual a 20 mm (Figura 18).

O autor coloca que este erro provavelmente ocorre devido à falta de um controle rigoroso na execução e/ou na falta de cuidado na compra e recebimento dos materiais. Entretanto, junto ao projeto estrutural é indicado que os cobrimentos estão especificados perante o controle rigoroso de execução, sendo assim é imprescindível o acompanhamento mais cuidadoso durante todo o processo de montagem dos elementos estruturais.

Figura 18: Espaçador contínuo utilizado na obra



(Fonte: Palm, 2007)

As especificações de projeto indicam que a obra foi considerada em meio urbano com classe de agressividade ambiental II, ou seja, moderada com pouco risco de deterioração na estrutura. A exigência da norma para este caso é que o cobrimento de laje tenha espessura de 25 mm, considerando uma tolerância de execução de 10 mm, e a classe de concreto seja com resistência maior ou igual a 25 MPa.

A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) coloca a permissão de redução do cobrimento nominal tabelado quando há indicação de controle rigoroso de execução e/ou também se a classe de resistência de concreto for superior ao prescrito. Além disso, a redução do cobrimento nominal também é dada pela tolerância de execução, e desta forma, o cobrimento poderia ter uma diminuição de espessura de 5,0 mm ou 10 mm, considerando o uso de uma ou ambas as possibilidades.

Cabe salientar que essas condições não se aplicam neste caso com espaçador de dimensão menor, pois a indicação de projeto é de espessura de cobrimento nominal igual a 25 mm e assim deve ser seguido durante a execução.

A obra em questão também não apresentava método de distribuição de espaçadores, sendo uma atitude recorrente nos canteiros (PALM, 2017; FREIBERGER, 2015; MARAN, 2015; MENNA BARRETO, 2014; CAMPOS, 2013; SILVA, 2012). Este comportamento na montagem e execução das estruturas é reflexo da falta de diretrizes para uso de espaçadores na obra, uma vez que as normas nacionais referentes ao projeto e execução de estruturas de concreto armado somente indicam que os espaçadores devem ser utilizados, porém sem especificar como. Desta forma, grandes espaços sem espaçadores são identificados na montagem da armadura das lajes, assim como espaçadores dispostos de forma inadequada.

Após o estudo realizado por Palm (2017) e apresentação dos seus resultados, a empresa responsável tomou providências para a melhoria neste processo, então não foi possível comparar valores totalmente sem controle. A partir dos primeiros resultados apresentados pelo autor, onde não havia nível de controle de distribuição de espaçadores e os cobrimentos mínimos executados estavam abaixo do previsto, o empreendimento passou a ter um método de distribuição de espaçadores fixo, sendo colocado um espaçador contínuo a cada 60 cm de forma alinhada (Figura 19).

Figura 19: Padrão de distribuição de espaçador multiapoio adotado na obra

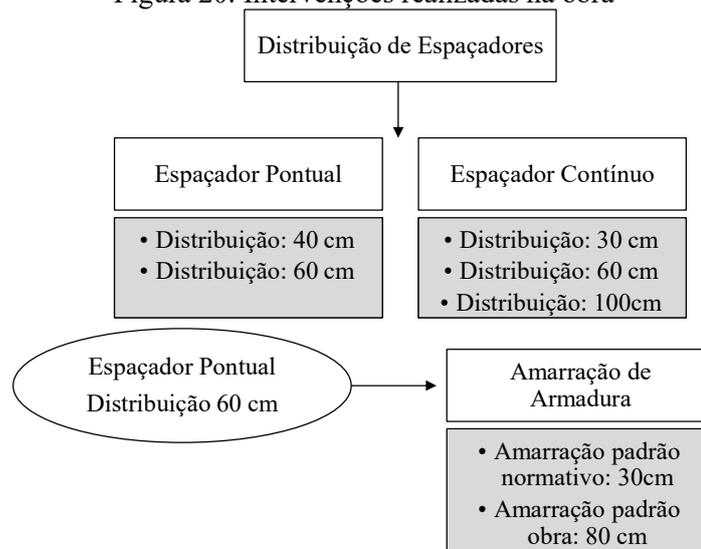


(Fonte: autora, 2017)

4.2 INTERVENÇÕES EM OBRA

Para levantamento de dados para análise de fatores que possam influenciar na obtenção de cobertura, foram testados diferentes tipos e distribuições de espaçadores, além de amarração controlada das barras de armadura na malha das lajes. Por ser disponibilizado somente um pavimento para o uso de espaçadores pontuais (cadeirinha), e por limitar-se a lajes de mesmas dimensões, a amarração da laje foi controlada somente em um quadrante, e teve comparativo com distribuição de espaçadores intermediária. O estudo preliminar foi proposto como mostra a Figura 20.

Figura 20: Intervenções realizadas na obra



(Fonte: elaborada pela autora, 2018).

Todas as etapas de amarração e distribuição dos espaçadores foram realizadas pela mesma equipe de montagem e execução da empresa. Em cada laje foram medidos 30 pontos de espessuras de cobertura no fundo dos elementos, de forma aleatória. O espaçador do tipo

contínuo, com distribuição alinhada a cada 60 cm, foi colocado em todas as lajes do 10º e 11º pavimento, enquanto a distribuição a cada 40 cm, para o mesmo espaçador, foi proposta para a laje do 12º pavimento. Os espaçadores foram posicionados linearmente à barra e a distância de distribuição foi dada através das extremidades dos espaçadores. Os espaçadores com apoio pontual foram distribuídos nas lajes do 14º pavimento. Todas as configurações propostas estão sintetizadas na Figura 21.

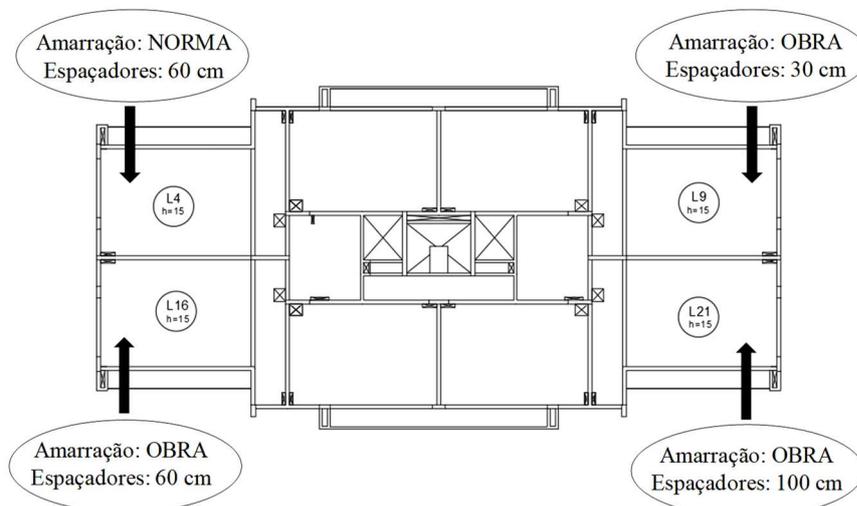
Figura 21: Intervenções propostas em cada pavimento

PAVIMENTO	ESPAÇADOR	DISTRIBUIÇÃO DE ESPAÇADORES	AMARRAÇÃO DE ARMADURA
10º ; 11º PAVIMENTO	CONTÍNUO	ALINHADO: 60 cm 2,5 espaçadores/ m ²	PADRÃO OBRA: 80 cm
12º PAVIMENTO	CONTÍNUO	ALINHADO: 40 cm 6 espaçadores/ m ²	PADRÃO OBRA: 80 cm
14º PAVIMENTO	PONTUAL	ESCALONADO: 30 cm 34 espaçadores/ m ²	PADRÃO OBRA: 80 cm
		ESCALONADO: 60 cm 17 espaçadores/ m ²	PADRÃO OBRA: 80 cm PADRÃO NORMA: 35 cm
		ESCALONADO: 100 cm 10 espaçadores/ m ²	PADRÃO OBRA: 80 cm

(Fonte: elaborado pela autora, 2018).

Três lajes estudadas com o espaçador pontual foram amarradas dentro do padrão utilizado em obra, e pela disponibilidade da mão de obra optou-se por verificar a influência de maior quantidade pontos de amarração na obtenção do cobrimento final em duas lajes, com mesma distribuição de espaçadores (60 cm). As lajes possuíam as mesmas características de dimensão, configuração de armadura, diâmetro da barra e abertura da malha, espessura de cobrimento, tipo de espaçador e distribuição de espaçador (Figura 22).

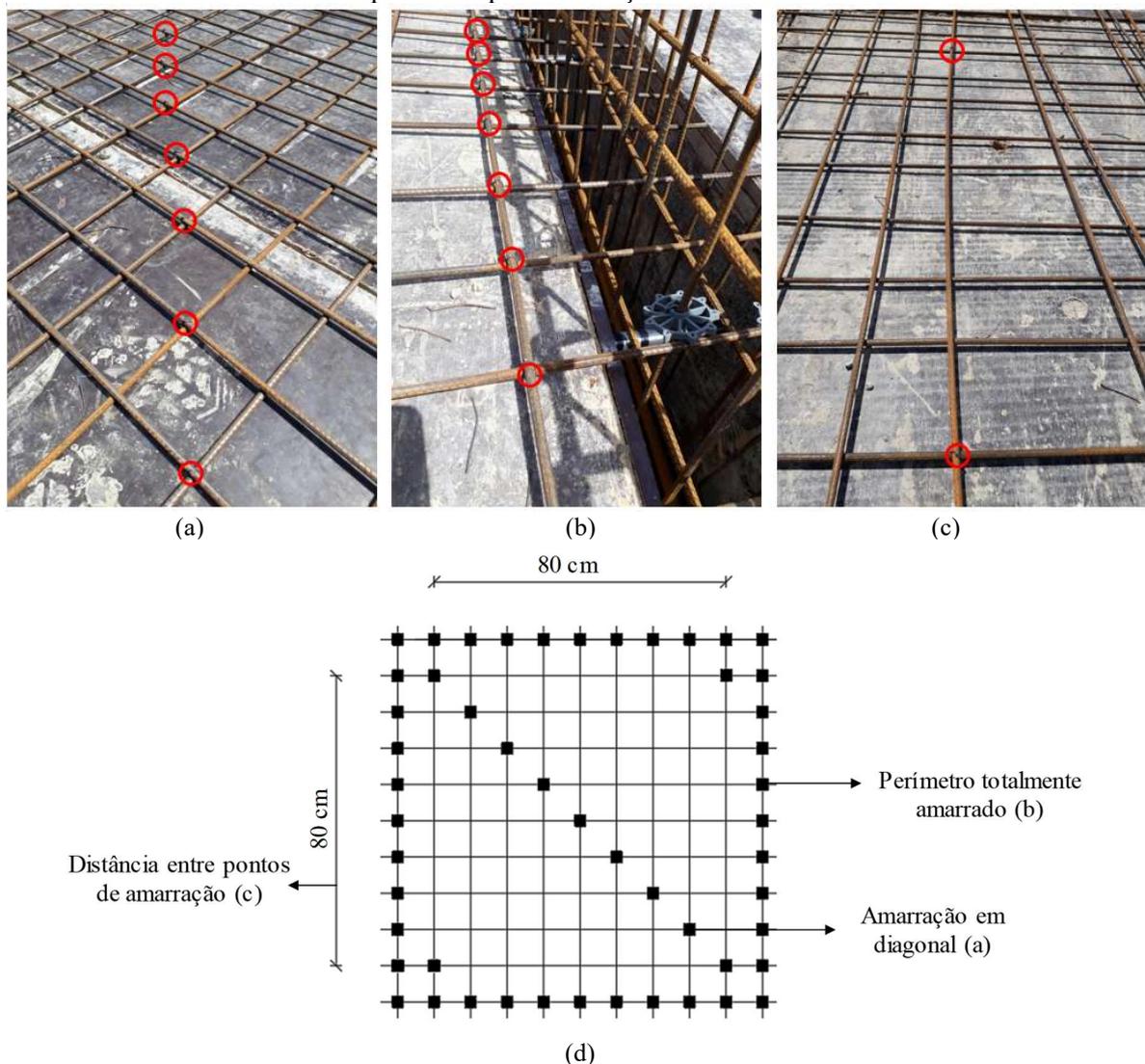
Figura 22: Lajes com distribuição do espaçador pontual.



(Fonte: elaborada pela autora, 2018).

O processo de amarração da laje foi observado durante a montagem da armadura e repassado ao armador. Na obra, usualmente, a armadura era amarrada em todos os pontos no contorno do elemento e logo após eram realizados pontos escalonados a cada 80 cm, partindo da contagem das barras de aço inferiores da malha. A amarração era realizada em diagonais como forma de controlar o padrão de pontos de amarração com arame recozido. A Figura 23 mostra os detalhes do procedimento de amarração junto com o desenho esquemático para visão geral da malha de armadura amarrada.

Figura 23: Padrão de amarração observado em obra durante levantamento em campo (a) amarração em nós diagonais da malha; (b) amarração no perímetro da malha; (c) distância de amarração (80 cm); (d) desenho esquemático para amarração da malha de armadura

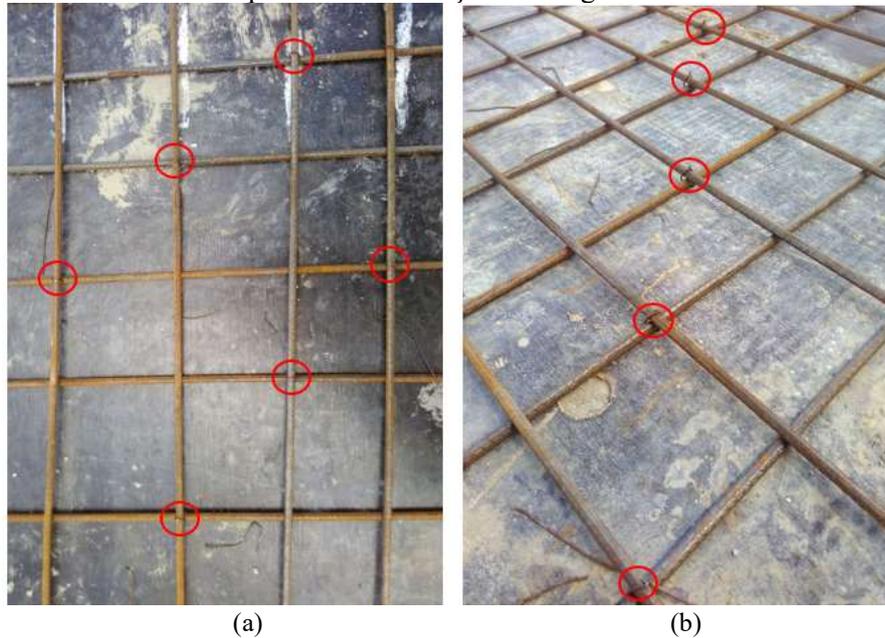


(Fonte: autora, 2017).

A amarração controlada por norma foi formulada a partir da indicação da NBR 14931 (ABNT, 2004), que dispõe que a montagem de armadura deve ser feita com o uso de arames e o

afastamento máximo dos pontos deve ser de 35 cm. Como a malha de armadura tinha abertura de 10 cm, a amarração escolhida foi de 30 cm, estando no limite normativo (Figura 24).

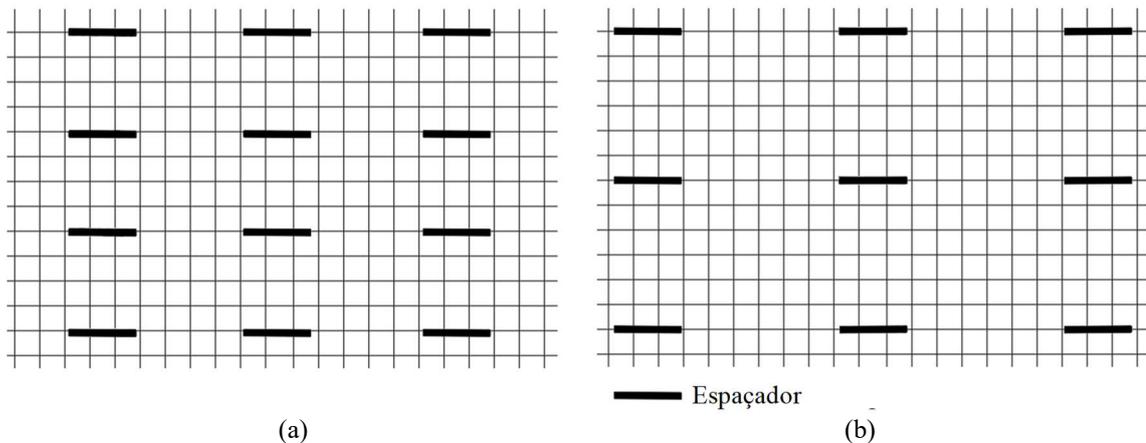
Figura 24: Amarração proposta pela prerrogativa normativa: (a) distância de amarração de 30 cm; (b) padrão de amarração em diagonais



(Fonte: autora, 2017).

A distribuição do espaçador contínuo foi feita a partir de configurações utilizadas pela empresa em diferentes empreendimentos. A obra deste estudo optou por utilizar um espaçamento de 60 cm em alinhamento, conforme já mostrado na Figura 25 e estava em teste com o espaçador alinhado a uma distância de 40 cm, a fim de verificar os melhores resultados.

Figura 25: Distribuição de espaçadores contínuos em malha 10x10 cm: a) 40 cm; b) 60 cm.



(Fonte: elaborada pela autora, 2018).

Optou-se pelo uso de espaçadores com apoio pontual para comparação de resultados decorrentes da variação de parâmetros, em função de simulações já terem sido feitas em

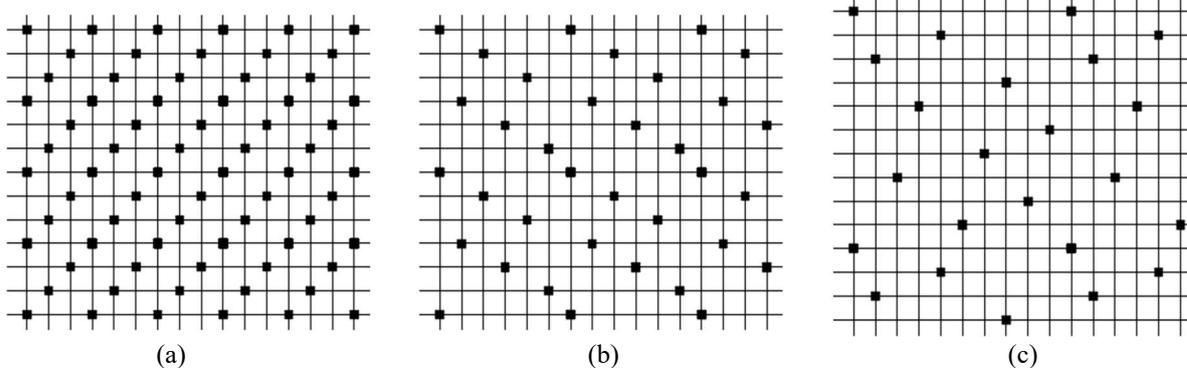
laboratório e computacionalmente (MARAN, 2015) e por tratar-se da pior situação, já que o suporte é dado em um único nó. Além de ser um material mais barato em relação ao espaçador contínuo utilizado na obra.

Considerando o espaçador pontual e a composição da malha ser em diâmetro 6,3 mm, a distribuição dos espaçadores foi configurada em 30 cm, 60 cm e 100 cm, sendo valores aproximados aos referentes às especificações normativas internacionais (EHE, 2008; BS 7973-2, 2001).

As diretrizes normativas indicam que para armadura inferior (positiva) de elementos de superfície horizontal, como lajes, a distância máxima entre espaçadores deve ser de 50ϕ da barra e não deve ultrapassar 100 cm. Assim, optou-se por um distanciamento mínimo, intermediário e máximo dos espaçadores.

As normas de referência indicam que a distribuição dos espaçadores deve ser feita de maneira escalonada, desta forma, criou-se um padrão para as lajes como mostra a Figura 26, onde buscou-se a obtenção da distância entre os espaçadores em todas as direções.

Figura 26: Distribuição de espaçadores pontuais em malha 10x10 cm:(a) 30 cm;(b) 60 cm;(c) 100cm



(Fonte: elaborada pela autora, 2018)

A distribuição dos espaçadores foi feita após a amarração da malha de armadura. Os espaçadores não foram amarrados junto à armadura, sendo somente dispostos sob as barras nos pontos de encontro (nós), como mostra a Figura 27.

Apesar da disposição de um gabarito na obra para a distribuição dos espaçadores pontuais, notou-se certa dificuldade em posicioná-los de forma escalonada, pois ocorre assimetria na colocação do espaçador na primeira barra, não tendo um padrão claro de execução. Entretanto, tendo controle inicial, a distribuição correta é possível conforme previsto em projeto.

Considerou-se um impedimento da aplicação normativa em obra a quantidade de espaçadores para distribuição mínima, devido à grande quantidade de espaçadores por laje (Figura 27 a).

Figura 27: Intervenção de distribuição de espaçadores pontuais: (a) 30 cm; (b) 60 cm; (c) 100 cm



(a)

(b)

(c)

(Fonte: autora, 2017).

O cobrimento executado foi mensurado após a desfôrma e com escoramento remanescente do elemento, por meio de pacômetro digital. O equipamento para medição funciona por tecnologia magnética de indução de pulso para detectar barras de aço, emitindo sinal sonoro e luminoso ao identificar a armadura (Figura 28). O método de medição não é afetado por materiais não condutivos como o concreto, desde que este não possua metais. O pacômetro estima a espessura de cobrimento até um máximo de 60 mm, valor que supre as recomendações limites de cobrimento da norma (PROCEQ, 2008).

Figura 28: Pacômetro digital



(Fonte: autora, 2017)

As tabelas de composições SINAPI, propostas pela Caixa Econômica Federal, têm indicação para o número necessário de espaçadores para executar a laje por quilograma de aço e em função dos diferentes diâmetros. Com este embasamento, Oliveira (2018) apresenta a demanda de espaçadores por metro quadrado e a distância média entre os dispositivos, considerando abertura de malha de 10 cm e 20 cm (Tabela 19).

Destaca-se que malhas com maiores afastamentos entre barras são mais flexíveis (MARAN, 2015) sendo necessário um maior número de pontos de apoios (espaçadores). Entretanto, a Tabela 19 mostra que este indicador não é considerado na indicações do SINAPI, uma vez que a malha com abertura 10 cm possui maior número de espaçadores/m². Essa composição pode estar associada ao posicionamento do espaçador *versus* a quantidade de nós da malha (mais interseções entre barras) ou pela relação de peso de aço por armadura.

Tabela 19: Consumo de espaçadores e distância média em relação a especificação SINAPI

Barra de aço (mm)	Malha 10x10 cm		Malha 20x20 cm	
	Espaçadores/m ²	Distância média entre espaçadores (cm)	Espaçadores/m ²	Distância média entre espaçadores (cm)
Ø 4,2	6,14	34	3,07	67
Ø 5,0	6,52	32	3,26	63
Ø 6,3	6,61	31	3,31	62
Ø 8,0	5,72	35	2,86	72
Ø 10,0	4,45	46	2,22	92

(Fonte: Oliveira, 2018).

Comparando a quantidade de espaçadores, em função da especificação da norma britânica BS 7973-2 (2001) com a planilha SINAPI, nota-se uma diferença considerável entre os espaçadores com distribuição a cada 30 cm (34 espaçadores) utilizados no experimento, com a quantidade para o diâmetro da malha apontado na Tabela 19, de aproximadamente 7 espaçadores.

Como aponta Oliveira (2018), as indicações apresentadas pelo SINAPI estão longe de uma diretriz técnica a ser seguida, pois não consideram fatores que influenciam no cobrimento de armadura. Porém, este tipo de prescrição permite avaliar a quantidade de espaçadores usualmente contabilizada para fins de orçamento, com reflexos sobre as previsões de custos e a quantidade de espaçadores disponibilizada nos canteiros.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após levantamento de dados na obra, foram analisadas diferentes configurações a fim de verificar quais fatores interferem na obtenção de cobrimento. A primeira análise foi realizada em função da amarração da armadura (Tabela 20), a fim de verificar se a prescrição normativa (ABNT NBR 6118, 2014), de amarração no máximo a cada 35 cm influencia na obtenção do cobrimento final.

Com o controle de execução realmente feito em obra, a permissão normativa para redução de cobrimento de 5 mm na especificação no projeto seria possível, devido ao cuidado com a

distribuição de espaçadores ou com o aumento da classe de resistência do concreto, pois a espessura de cobrimento adequada é alcançada. Esse resultado é considerado satisfatório caso a hipótese de cobrimento mínimo de 15 mm seja padrão de verificação das medições. Para a hipótese do projetista estrutural ter considerado classe de agressividade ambiental II, com cobrimento nominal de 25 mm ($\Delta c = 5$ mm) e cobrimento mínimo seria de 20 mm, um ponto mensurado na laje com amarração no padrão da obra (19 mm) estaria fora do critério que aponta que todos os cobrimentos devem ser menores ou iguais ao cobrimento mínimo.

Tabela 20: Cobrimentos medidos para padrão de distribuição de espaçadores pontuais escalonados a cada 60 cm para comparação diferentes amarrações de armadura

Espessura de cobrimento (mm)	Laje amarração norma (30 cm)	Laje amarração obra (80 cm)
	23	23
23	23	26
22	22	26
24	24	20
26	26	25
25	25	27
25	25	20
26	26	26
25	25	26
25	25	25
21	21	19
23	23	27
22	22	25
27	27	25
28	28	25
24	24	22
25	25	27
24	24	25
25	25	26
26	26	24
26	26	24
28	28	25
27	27	26
24	24	26
24	24	27
24	24	21
25	25	25
25	25	24
24	24	24
21	21	23
Média	24,57	24,57
Desvio Padrão	1,79	2,18
Coefficiente de Variação (CV)	0,073	0,089

Cobrimentos abaixo da hipótese de cobrimento mínimo 20 mm

Em comparação às faixas de coeficiente de variação (CV) propostas por Andrade (2001), onde estão estabelecidas faixas para definir controle de qualidade em relação à execução da estrutura em função do cobrimento, propostas em nível de controle de execução alto ($COV \leq 0,15$), nível

de controle de execução médio ($0,15 \leq CV \leq 0,35$) e nível de controle de execução baixo ($CV \geq 0,55$), os valores de CV encontrados são baixos, ou seja, pode-se considerar um controle rigoroso de execução do elemento, segundo o critério proposto.

Para verificação entre a distribuição de espaçadores pontuais, com amarração conforme padrão obra são apresentados os valores de cobrimento da Tabela 21.

Tabela 21: Cobrimentos medidos com diferentes distribuições de espaçadores do tipo pontual.

	Espaçadores c/ 30 cm	Espaçadores c/ 60 cm	Espaçadores c/ 100
		27	26
	20	26	19
	28	26	23
	28	20	22
	28	25	25
	27	27	27
	27	20	23
	27	26	24
	27	26	22
	27	25	18
	26	19	22
	27	27	24
	27	25	22
	26	25	21
	26	25	22
	26	22	21
	26	27	22
	28	25	21
	27	26	20
	28	24	20
	27	24	20
	28	25	20
	27	26	19
	28	26	21
	25	27	23
	28	21	27
	27	25	25
	26	24	25
	22	24	23
	28	23	23
Média	26,63	24,57	22,30
Desvio Padrão	1,75	2,18	2,28
Coefficiente de Variação (CV)	0,066	0,089	0,100

Cobrimentos abaixo da hipótese de cobrimento mínimo 20 mm

Para a distribuição de espaçadores a cada 30 cm, a média de cobrimento obtido ultrapassou o cobrimento indicado em projeto, essa relação pode ser dada pelo possível deslocamento das armaduras. Ainda, independente da configuração de espaçamento, todos os cobrimentos atingiram valores satisfatórios, estando dentro da tolerância de execução de 10 mm especificada na ABNT NBR 6118 (2014), considerando somente a situação de cobrimento mínimo de 15

mm (hipótese b) . Para qualquer configuração, os coeficientes de variação ficaram abaixo de 0,15 (15%), sendo considerada uma baixa dispersão de dados, ou seja, os cobrimentos levantados são homogêneos no elemento medido.

Nota-se que para a distribuição de espaçadores a cada 30 cm, tanto a tolerância de 5 mm ou de 10 mm permitida em norma são satisfatórias. Para a configuração de espaçadores escalonados a cada 60 cm, uma tolerância de execução de 5 mm não é atingida, já que um ponto apresenta valor abaixo, de 19 mm, assim como ocorre na distribuição de 100 cm.

Os resultados de cobrimento mensurados para as lajes com diferentes distribuições de espaçadores foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA), considerando um nível de significância de 5%, conforme mostrado na Tabela 22.

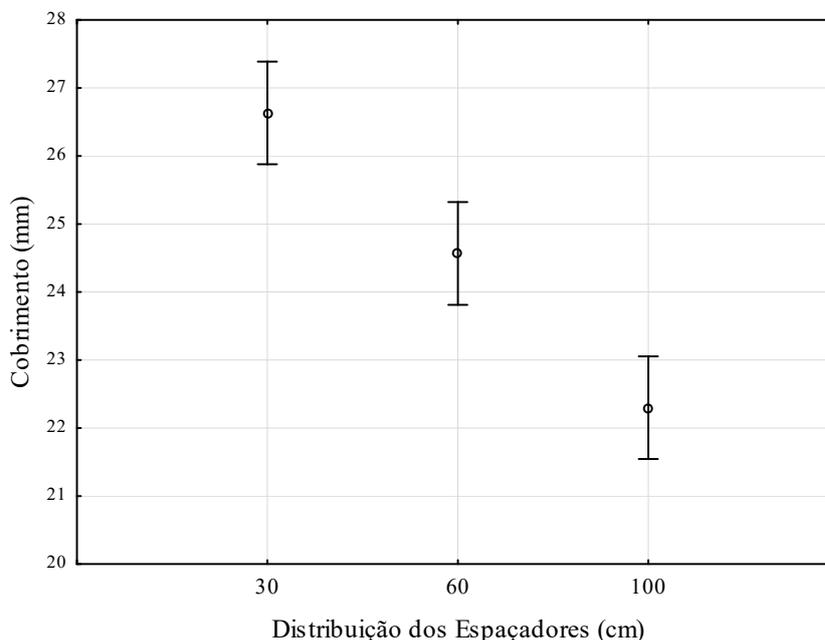
Tabela 22: Análise de variância (ANOVA) para distribuição de espaçador pontual a cada 30 cm, 60 cm e 100 cm.

	SQ	GDL	SQF	F	P	Sig.
Espaçamento dos espaçadores (cm)	281,87	2	140,93	32,55	0,00%	Significativo
Erro	376,63	87	4,33			

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F (calc): valor calculado de F; P: nível de significância; Se $P < 5\%$ = efeito significativo.

Percebe-se que a distribuição de espaçadores tem influência significativa no cobrimento final executado. Sendo assim, torna-se importante o controle desse parâmetro para alcançar a espessura projetada e conseqüentemente é necessária uma norma indicativa para o uso de espaçadores. A Figura 29 mostra a diferenças entre os espaçamentos utilizados.

Figura 29: Influência do espaçamento dos espaçadores do tipo pontual no cobrimento obtido.



Ao observar os cobrimentos alcançados, nota-se que a distribuição de espaçadores de apoio pontual de modo escalonado tem resultados dentro da tolerância de execução permitida em norma. Desta forma, fica a cargo do responsável técnico optar por uma distribuição mais econômica e que não influencie na durabilidade em função da grande quantidade de espaçadores no elemento estrutural.

Após estudos realizados por Palm (2017), a obra adotou uma distribuição de 60 cm entre os espaçadores de forma alinhada, enquanto outros empreendimentos da mesma empresa adotaram distribuição alinhada a cada 40 cm entre espaçadores. Por este motivo, fez-se a medição entre estas duas configurações (Tabela 23). Com isso, foram obtidos mais dados para distribuição de 60 cm, pois era o método padrão da empresa e o posicionamento a cada 40 cm foi executado somente em um pavimento para comparação de resultados.

Tabela 23: Cobrimentos medidos com diferentes distribuições de espaçadores do tipo contínuo.

	40 cm	60 cm			
		25	23	22	22
	25	24	21	22	23
	18	21	20	27	20
	26	23	20	21	19
	27	22	23	22	22
	26	27	21	23	23
	21	21	20	24	23
	23	21	19	28	27
	25	14	16	28	23
	20	21	23	26	24
	24	21	22	25	23
	22	24	24	24	21
	22	23	18	25	18
	23	23	25	24	19
	26	24	28	22	19
	24	26	27	22	24
	26	26	25	21	21
	25	27	16	22	20
	23	28	24	20	21
	19	28	20	25	25
	19	25	22	21	25
	19	25	22	22	24
	23	26	24	20	24
	24	25	23	24	19
	24	24	21	24	21
	23	23	14	22	25
	22	24	24	16	24
	23	25	24	16	13
	23	24	19	20	24
	23	21	19	15	25
Média	23,1	22,41			
Desvio Padrão	2,35	3,06			
Coefficiente de Variação (CV)	0,102	0,137			
	Cobrimentos abaixo da hipótese de cobrimento mínimo 20 mm				
	Cobrimentos abaixo da hipótese de cobrimento mínimo 15 mm				

Proposta de diretriz para uso de espaçadores em lajes maciças de concreto armado, visando a obtenção do cobrimento especificado pela limitação da deformação plástica da armadura durante a execução.

Para a distribuição dos espaçadores contínuos, uma distribuição a cada 40 cm resulta em cobrimentos eficientes se considerada uma tolerância de execução de 10 mm. Para configuração de posicionamento a cada 60 cm, as tolerâncias não são respeitadas em diversos pontos. Sendo assim, o cobrimento não é eficiente, pois em alguns pontos do elemento estrutural a proteção é prejudicada.

A análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5% para os dados mensurados para as lajes com distribuição de espaçadores contínuos é demonstrada na Tabela 24.

Tabela 24: Análise de variância para distribuição de espaçadores contínuos de 40 cm e 60 cm.

	SQ	GDL	SQF	F	P	Sig.
Espaçamento dos espaçadores (cm)	11,48	1	11,48	1,330	25,07%	Não Significativo
Erro	1277,69	148	8,63			

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F (calc): valor calculado de F; P: nível de significância; Se $P < 5\%$ = efeito significativo.

Pela Análise de Variância (ANOVA), a distribuição de espaçadores contínuos não é significativa para o cobrimento final entre distâncias de 60 cm e 40 cm. Contudo, o critério de norma é baseado em mínimos. Embora o espaçamento de 60 cm tenha apresentado três valores abaixo de 15 mm, enquanto o de 40 cm não apresentou nenhum, o número de observações do espaçamento de 60 cm é três vezes maior que o de 40 cm, e quanto maior a amostra, maior a probabilidade de nela se obter um valor extremo.

Para a comparação entre espaçadores do tipo pontual e espaçador contínuo para a mesma distância de distribuição de espaçadores porém com arranjos diferentes (escalonado e alinhado), foi realizada a Análise de Variância (ANOVA), apresentada na Tabela 25, com os cobrimentos medidos na Tabela 21 e na Tabela 23.

Tabela 25: Análise de variância (ANOVA) para comparação entre espaçador pontual e contínuo com mesma distribuição (60 cm).

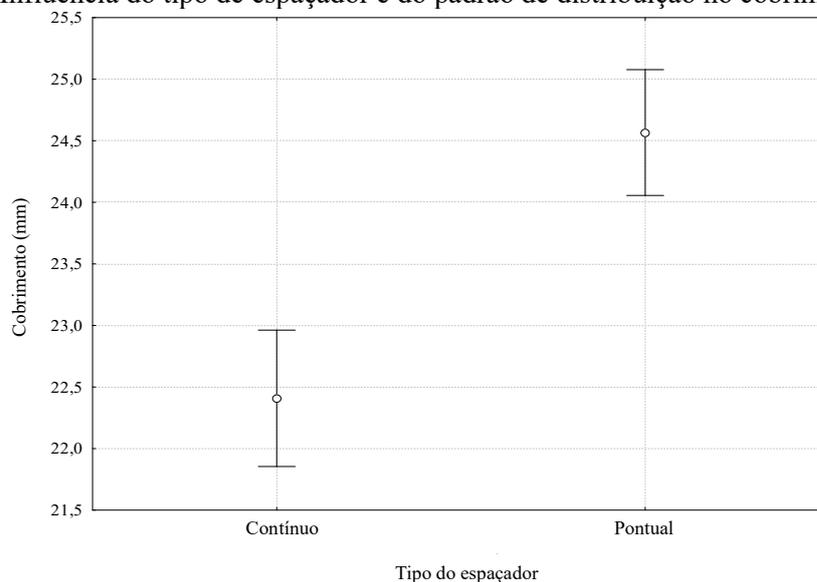
	SQ	GDL	SQF	F	P	Sig.
Tipo de espaçador	186,34	1	186,34	24,61	0%	Significativo
Erro	1347,73	178	7,57			

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F (calc): valor calculado de F; P: nível de significância; Se $P < 5\%$ = efeito significativo.

Os cobrimentos finais referentes ao uso de espaçador são influenciados pelo dispositivo e seu arranjo de distribuição. Em análise econômica, o uso de espaçador pontual é vantajoso em relação ao valor unitário quando comparado ao espaçador contínuo. Apesar do espaçador contínuo apoiar um número maior de barras, a disposição inadequada traz desempenho inferior, nas configurações propostas, a disposição do espaçador contínuo de forma alinhada gerou uma

malha mais flexível, uma vez que no entorno do espaçador a distância era maior quando comparado ao posicionamento escalonado. A diferença entre os cobrimentos mensurados é apresentada na Figura 30.

Figura 30: Influência do tipo de espaçador e do padrão de distribuição no cobrimento obtido.



(Fonte: Elaborado pela autora, 2018).

A média dos valores medidos (Tabela 26) demonstra que o uso de espaçadores do tipo pontual escalonado possui um resultado mais satisfatório em relação ao espaçador contínuo alinhado para a mesma distribuição (60 cm). Esse comportamento pode ser dado a partir do modo de distribuição, ou seja, os espaçadores do tipo contínuo foram distribuídos de forma alinhada, conforme metodologia da empresa, enquanto os espaçadores do tipo pontual foram distribuídos de forma escalonada, conforme normas internacionais (EHE 08, 2008; BS 7973-2, 2001).

Tabela 26: Valores de média, desvio-padrão e coeficiente de variação para espaçadores diferentes com mesma distribuição

DISTRIBUIÇÃO ESPAÇADORES (cm)	Média (mm)	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
Espaçador contínuo a cada 60 cm	22,41	3,06	0,137
Espaçador pontual a cada 60 cm	24,57	2,18	0,089

O coeficiente de variação para os dois tipos de espaçadores resultou em valores abaixo de 0,15, ou seja, os dados possuem baixa dispersão. Percebe-se que em todas as medições, o controle rigoroso de execução teve resultados positivos na obtenção de cobrimento final, independente da distribuição, amarração ou tipo de espaçador utilizado. A média de cobrimento está de acordo com as prerrogativas normativas e os resultados mostraram-se homogêneos ($CV \leq 0,15$). Notou-se que os resultados melhores de espessura de cobrimento ocorrem a partir do momento em que foi dada atenção para esta etapa construtiva.

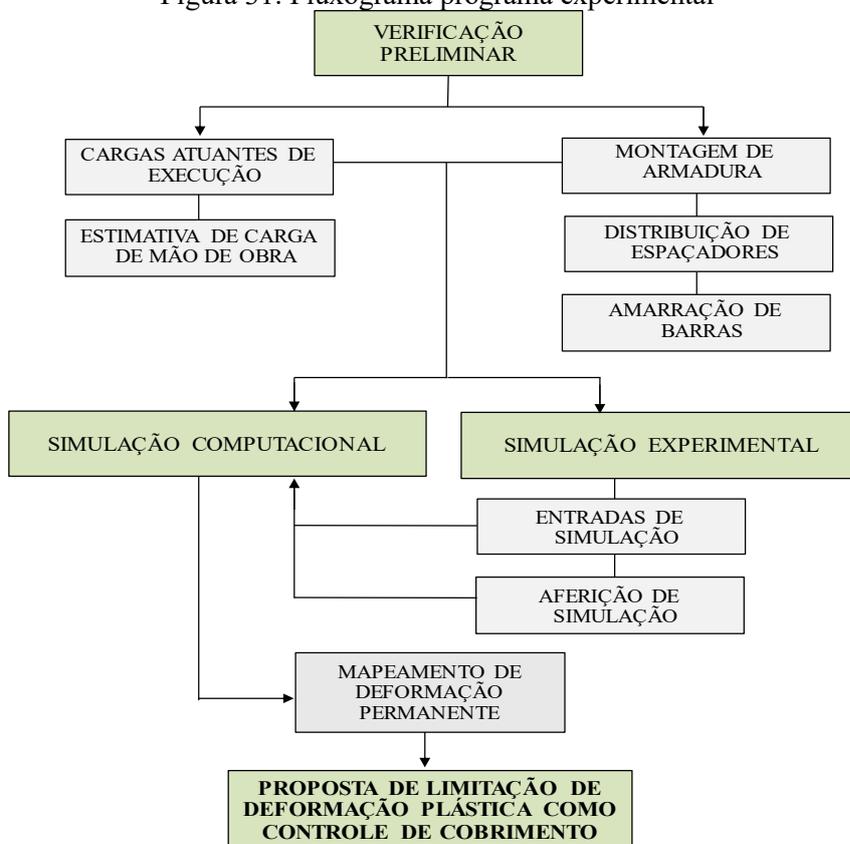
5 SIMULAÇÃO DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA DA ARMADURA FRENTE À APLICAÇÃO DE CARGA DE EXECUÇÃO

Neste capítulo serão descritos as etapas do programa experimental deste trabalho que consistiram no levantamento de fatores influentes na obtenção da espessura de cobrimento de armadura e posterior busca de configurações que proporcionam melhor desempenho para garantir a proteção das barras de aço.

As configurações envolvem a análise de malhas com diferentes composições, como o afastamento entre barras, o diâmetro e a amarração de armadura das barras de aço. Além das diferentes configurações de cobrimento, como a espessura, a distribuição de espaçadores e o padrão de distribuição.

Como mostra a Figura 31, o estudo preliminar do capítulo 4, junto com pesquisas já realizadas e complementares a este trabalho (MARAN *et al*, 2015; MARAN, 2015; PALM, 2017; OLIVEIRA, 2018) serviram como embasamento no levantamento de etapas de execução.

Figura 31: Fluxograma programa experimental



(Fonte: elaborado pela autora, 2019)

A verificação preliminar teve como principal objetivo a observação das cargas atuantes durante a montagem e execução de lajes, além das técnicas utilizadas para a amarração da malha de armadura e distribuição de espaçadores.

Os trabalhos complementares também auxiliaram no entendimento da correlação entre diferentes tipos de distribuição de espaçadores e a espessura de cobertura obtida, aplicando um controle de execução.

Com diversas combinações entre configurações de malhas de armadura, as simulações computacionais foram realizadas como forma de identificar conjuntos críticos em função da deformação máxima permanente das barras frente ao cobertura mínimo e tolerância de execução.

Como forma de aferir os resultados numéricos, simulações experimentais foram realizadas para mensurar as deformações nas barras apontadas pela simulação computacional e confirmar as distribuições de espaçadores adequadas. As etapas foram executadas com objetivo de propor uma diretriz que garanta a espessura de cobertura especificada.

Através da simulação computacional, junto com a aferição da simulação experimental, consegue-se prever as deformações permanentes. Por meio do conhecimento prévio do comportamento da armadura frente a diferentes configurações de montagem é possível avaliar se o cobertura nominal combinado com as tolerâncias normativas atende o cobertura mínimo.

Os próximos itens descrevem os parâmetros de simulação, discorrendo sobre as configurações consideradas para as malhas de armadura, assim como os dados de entrada para modelagem computacional. Também é colocado o método utilizado na aferição experimental para medição de deformação permanente das barras de aço.

5.1 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Os parâmetros foram estabelecidos a partir de revisão bibliográfica, com foco em orientações normativas, junto com o observado em obra nos trabalhos do grupo de pesquisa focado em cobertura e espaçadores (MARAN *et al.*, 2015; MENNA BARRETO, 2014; PALM, 2017; OLIVEIRA, 2018) e também do estudo preliminar apresentado no Capítulo 4. As diretrizes definidas (Figura 32) foram referências para todas simulações computacionais e foram aplicadas em algumas simulações experimentais propostas nesta pesquisa.

Figura 32: Parâmetros de simulação do experimento

ESPAÇAMENTO DE MALHA (cm)	DIÂMETRO DE ARMADURA (mm)	AMARRAÇÃO DA MALHA	
10x10 10x15 10x20 15x15 15x20 20x20	Ø 5,0 Ø 6,3 Ø 8,0	Amarração total Amarração proposta (50 cm)	
AFASTAMENTO ESPAÇADORES	PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO	ESPESSURA DE COBRIMENTO	CARREGAMENTO
40 cm 60 cm 80 cm 100 cm	Distribuição alinhada Distribuição escalonada total Distribuição escalonada intercalada	20 mm 25 mm 30 mm 35 mm 45 mm	1 operário próximo ao espaçador 2 operários próximos ao espaçador

(Fonte: elaborado pela autora, 2019)

O processo de determinação para os parâmetros definidos é descrito com maiores detalhes a seguir.

5.1.1 Configurações de malha de armadura

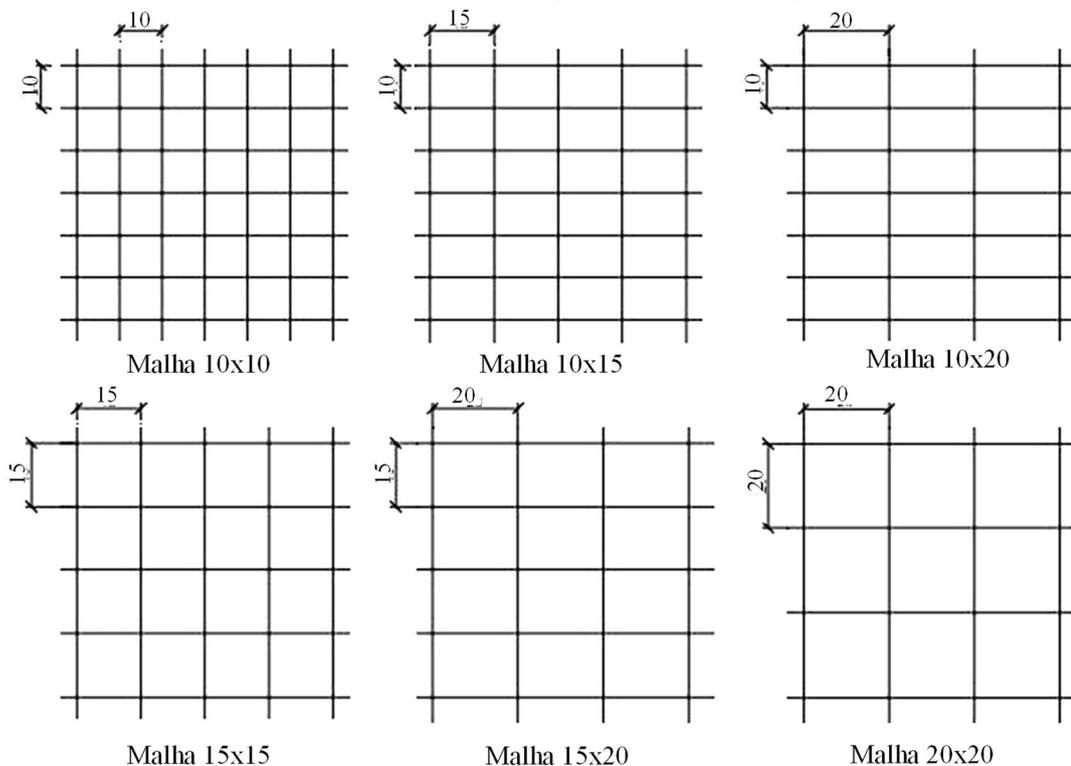
As malhas foram formuladas com a dimensão de 2,0 m x 2,0 m, representando armaduras positivas para lajes maciças armadas em duas direções. A dimensão foi delineada de modo a permitir a análise do comportamento da armadura frente à carga de uma forma mais abrangente e usual em obra. O peso próprio da armadura não permite a elevação do perímetro da malha para diâmetros mais finos quando a carga é aplicada, assim não há deslocamento dos espaçadores.

O afastamento entre barras na composição das malhas de lajes não deve ser superior a 2 vezes a espessura do elemento ou 20 cm, segundo NBR 6118 (ABNT, 2014), UNIT 1050 (2005) e CBH 87 (1987). A distância entre as barras de aço na malha é gerada em função da taxa de armadura e o diâmetro escolhido, sendo questões definidas pelo projetista, e assim, variável à concepção da estrutura.

Deste modo, buscou-se formular malhas de diferentes configurações para a simulação computacional, com malhas de espaçamento entre barras de 10 cm, 15 cm e 20 cm, como

possibilidade de aberturas diferentes em cada sentido, com proporção de 1:1, 1:1,33: 1:1,5 e 1:2, como mostra a Figura 33.

Figura 33: Malhas de armadura para simulação computacional



(Fonte: elaborado pela autora, 2019).

A amarração das barras da armadura foi definida inicialmente seguindo as simulações realizadas em análise anterior (MARAN, 2015), com todos os pontos amarrados devido a limitação do programa utilizado. Desta forma, as malhas simuladas computacionalmente consideraram todos os nós amarrados, para comparação entre deslocamento permanente da barra de armadura em novo método de simulação computacional usado neste trabalho e os valores encontrados experimentalmente nessas condições.

Além da condição de malha totalmente amarrada, também foi definido outro padrão de amarração, como forma de simular a situação de obra. A amarração foi dada com pontos em todo o perímetro da malha, de acordo com as prescrições das normas BS 7973-2 (2000) e EHE 08 (2008), conforme Figura 34 b.

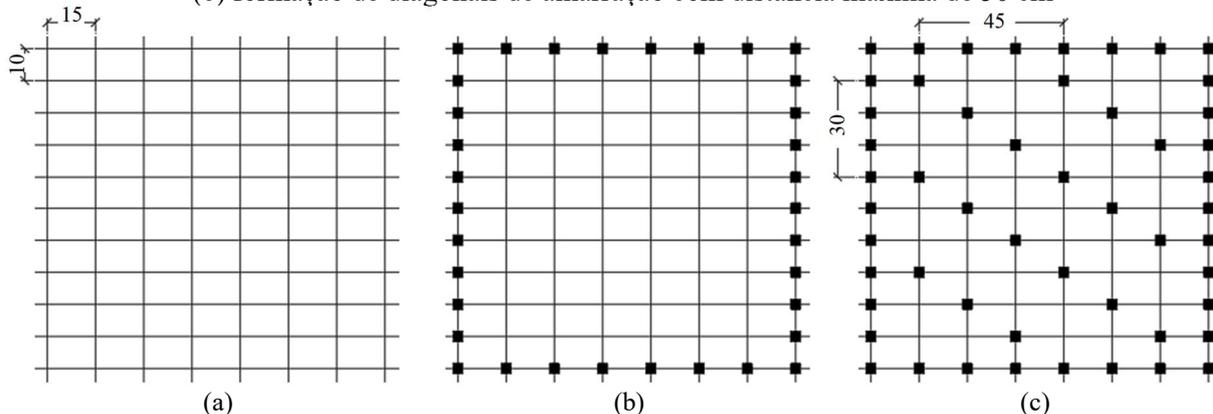
O valor de amarração máximo foi fixado em 50 cm, sendo determinado por ser intermediário entre a recomendação normativa da NBR 14931 (ABNT, 2004) que estabelece a amarração máxima de 35 cm, e o observado em obras (MARAN *et al.* 2015; PALM, 2017; OLIVEIRA,

2018). Um valor intermediário foi escolhido, pois se a orientação da NBR 14931 (ABNT, 2004) for seguida, uma malha com abertura de 20 cm deveria ter todos os pontos amarrados.

A amarração deve ter distância máxima de 50 cm, com distância em função do maior afastamento entre barras, para malhas com aberturas desiguais. Ainda, a amarração foi dada a partir do afastamento na primeira linha após o perímetro como referência e seguindo em pontos diagonais, assim como observado em metodologia nos canteiros de obra.

Como mostra a Figura 34 c, a malha com abertura 10x15 cm possui distância máxima entre pontos de amarração de 45 cm, obedecendo a prerrogativa de amarrar em função do maior afastamento entre barras e seguir em pontos diagonais.

Figura 34: Etapas de amarração: (a) malha a ser amarrada; (b) pontos de amarração em todo perímetro; (c) formação de diagonais de amarração com distância máxima de 50 cm

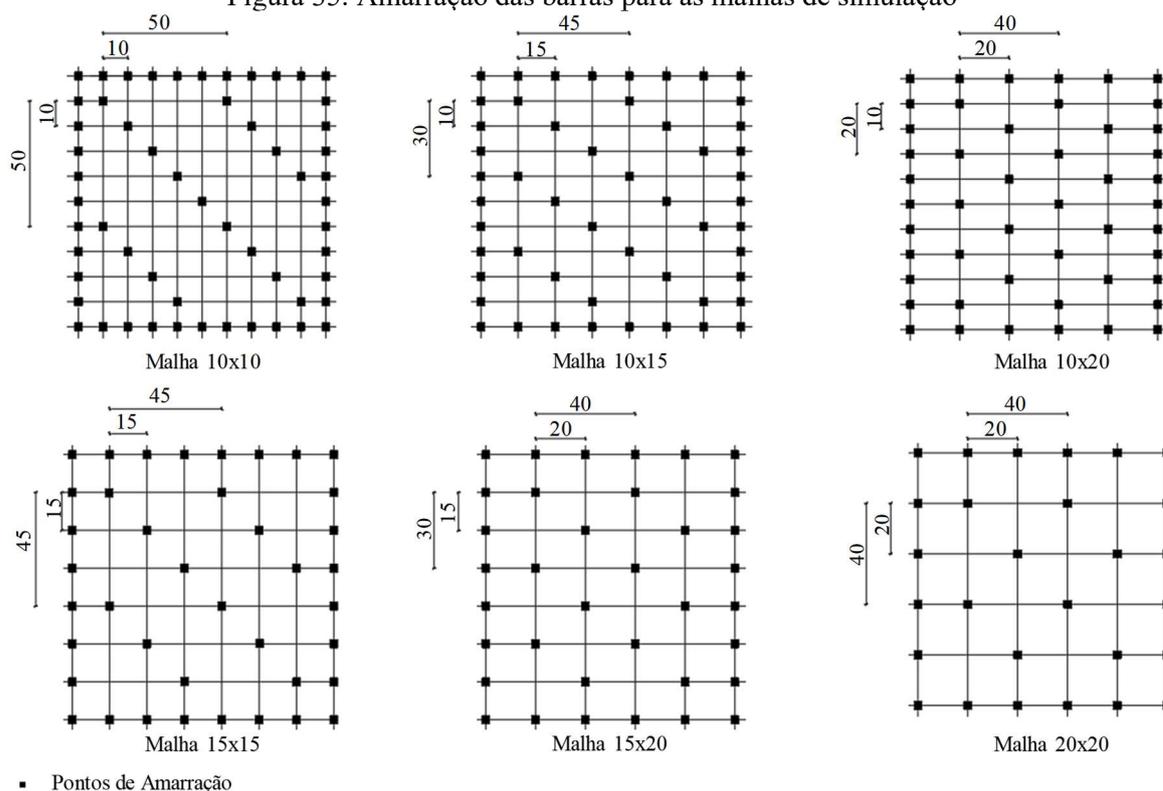


(Fonte: elaborado pela autora, 2018).

Com estas definições buscou-se configurações de montagem de armadura que garantam a obtenção do cobrimento e que disponham de padrão de execução de fácil entendimento e com diretriz simples para aplicação na obra.

A amarração para todos os tipos de malhas utilizadas na simulação está apresentada na Figura 35, onde o perímetro tem todos os pontos amarrados, e em função da maior abertura são definidas as diagonais de amarração.

Figura 35: Amarração das barras para as malhas de simulação



(Fonte: elaborado pela autora, 2019).

Os diâmetros de malha foram definidos a partir do observado em projetos estruturais para lajes armadas em duas direções durante o estudo preliminar deste trabalho, nas obras do trabalho de dissertação (MARAN, 2015) e o acompanhamento dos trabalhos complementares (PALM, 2017 e OLIVEIRA, 2018). Deste modo, as composições de malhas de armadura para laje visaram representar a realidade de projetos estruturais aprovados para obras em execução.

Apesar dos diâmetros de armadura serem definidos em função do carregamento, do vão e da análise do projetista, optou-se em simular as malhas com composição usual. Assim, os aços utilizados nas simulações foram de diâmetro 5,0 mm (CA-60) e diâmetros 6,3 mm e 8,0 mm (CA-50), com barras de mesmo diâmetro nas duas direções da malha. A barra com maior diâmetro foi definida como barra de 8,0 mm, pois as simulações anteriores (MARAN, 2015) apresentaram pequenos deslocamentos para barras de diâmetros maiores (10,0 mm), indicando que as barras permanecem no regime elástico linear sem deformações permanentes significativas na tolerância de execução e, conseqüentemente, no cobrimento mínimo.

As espessuras de cobrimento foram simuladas a partir da indicação na NBR 6118 (ABNT, 2014) para lajes, sendo 20, 25, 35 e 45 mm, compreendendo todas as classes de agressividade ambiental. Além disso, o cobrimento de 30 mm foi incluído comparação com deslocamentos

obtidos experimentalmente em Maran (2015). Diferentes cobrimentos foram incluídos a partir da influência que a altura da armadura provoca nas deformações. Para malhas com diâmetros menores e conseqüentemente com pouca rigidez, a deformação elástica pode provocar o contato entre a barra de aço e a fôrma. Desta forma, quanto maior o afastamento da barra com a fôrma (cobrimento), mais elevada é a chance de ocorrer deformações permanentes na armadura.

5.1.2 Afastamento entre Espaçadores

O apoio das barras durante a simulação foi pontual, representando o espaçador cadeirinha, por ser a situação mais crítica de suporte da malha, ou seja, somente um nó é apoiado por esse tipo de espaçador, diferentemente de espaçadores multiapoio que apesar do deslocamento ainda conseguem suportar mais de uma barra de armadura ou um nó. No estudo preliminar proposto, a análise de variância (ANOVA) não apontou diferença significativa para um mesmo afastamento entre espaçadores, de 60 cm, mas com padrões de distribuição diferentes (alinhado e escalonado).

Para a modelagem de malha de simulação computacional, o uso de espaçadores pontuais se torna mais flexível ao confrontar outras configurações, como a amarração da malha. A inserção pontual de espaçadores nos nós das malhas possibilitou a análise computacional de forma mais clara quanto às deformações plásticas da armadura.

Os espaçadores foram distribuídos em distâncias máximas de 40 cm, 60 cm, 80 cm e 100 cm e dispostos gradualmente conforme a configuração permitiu. Esses valores foram definidos a partir do recomendados em normas internacionais (EHE 08, 2008; BS 7973-2, 2001), já que no Brasil nenhuma diretriz é proposta. Como distância mínima, foi definida a abertura de 40 cm, obedecendo a especificação de $50.\varnothing$ para diâmetro de 8,0 mm.

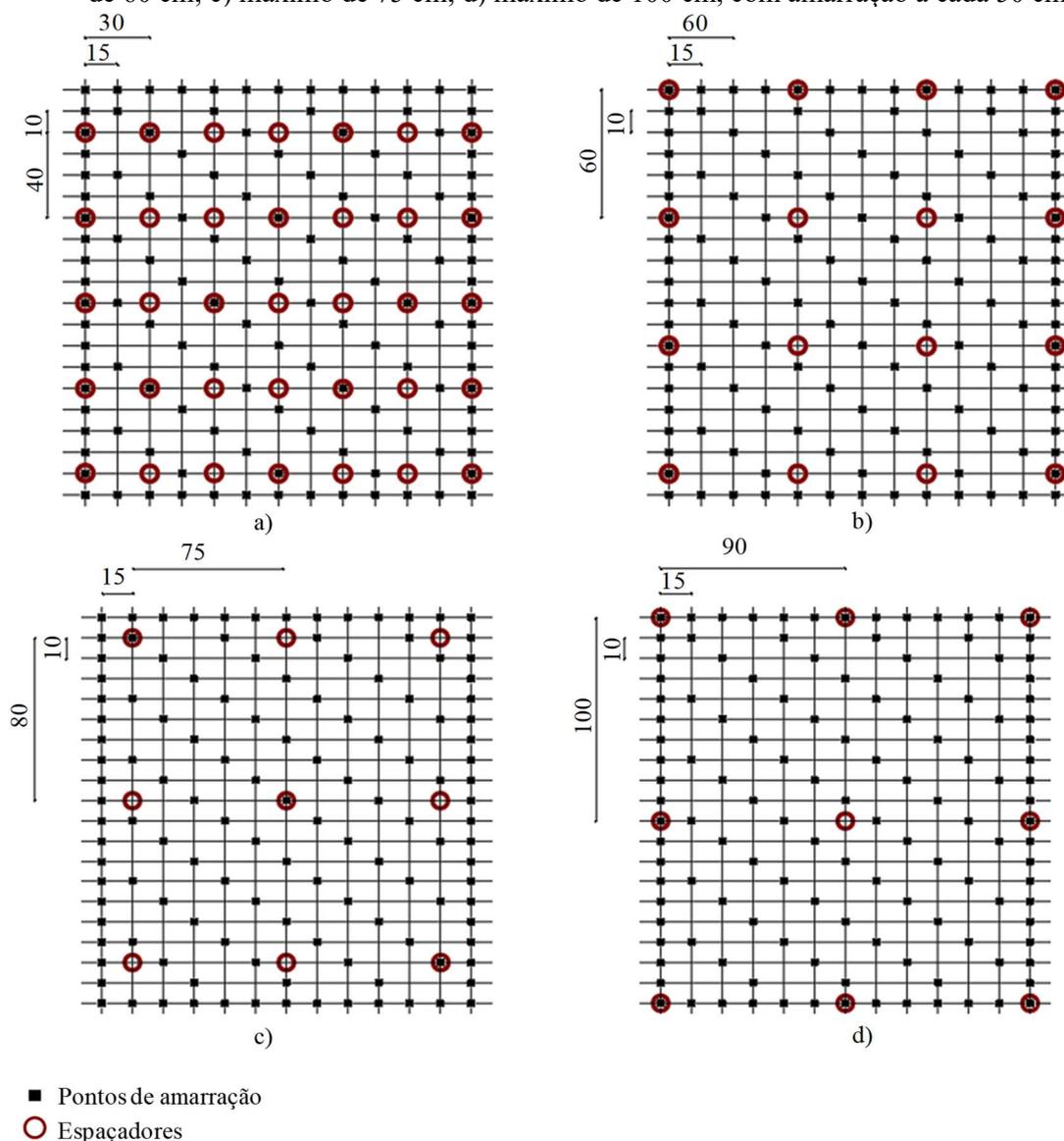
Para o diâmetro de 5,0 mm, esta especificação seria de 25 cm de afastamento entre espaçadores, entretanto foi descartada pela grande quantidade de dispositivos na laje e possível interferência na durabilidade do concreto. Alzyoud *et al.* (2016) e Barros (2018) destacam que o espaçador pode ser um facilitador na penetração de agentes agressivos pela interface dispositivo/concreto, sendo assim, a grande quantidade de espaçadores na laje pode ser causador de efeito reverso para a durabilidade da estrutura.

Angst *et al.* (2017) também colocam que a inserção de espaçadores na estrutura provavelmente afeta a microestrutura local do concreto e pode ocasionar vazios na interface entre concreto e

barras de armadura. Além disso, tal concentração de espaçadores na zona de tração da laje pode gerar linhas de fraqueza na face inferior, facilitando o aparecimento de fissuras de flexão.

O espaçamento máximo de 100 cm foi seguido conforme normas EHE 08 (2008), BS 7973-2 (2001) e IS 456 (2000). Como no primeiro momento de análise e comparação com os estudos já realizados (MARAN, 2015) foi proposta a distribuição inicial de espaçadores no padrão alinhado, como mostra a Figura 36, considerando as limitações de abertura de malha. Como exemplo, a malha 10x15 cm atinge valores aproximados a 40 cm, 80 cm e 100 cm em uma direção e valores exatos na direção de abertura 10 cm.

Figura 36: Distribuição de espaçadores alinhados para malha 10x15: a) máximo de 40 cm; b) máximo de 60 cm; c) máximo de 75 cm; d) máximo de 100 cm, com amarração a cada 50 cm



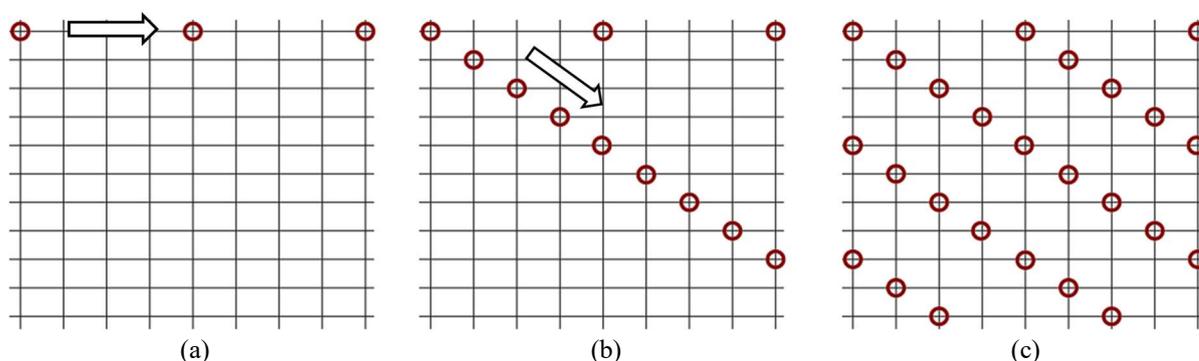
(Fonte: elaborado pela autora, 2019).

As normas com orientação de distribuição de espaçadores alegam que os dispositivos devam ser dispostos de forma escalonada (BS 7973-2, 2001; EHE 08, 2008). Entretanto, com base no estudo preliminar, notou-se a dificuldade de escalonar os espaçadores na malha pois não havia uma ordem lógica para o posicionamento, sendo os espaçadores escalonados com o auxílio de um desenho gabarito. Como forma de criar um padrão, e assim facilitar a locação, ficou estabelecida a formação de diagonais para definir os cruzamentos de barras apoiados pelos espaçadores.

Buscou-se uma orientação simplificada e operacional, inspirada na metodologia de amarração de lajes observada em obras, para que durante a montagem da armadura não seja necessário nenhum desenho auxiliar. É preferível que durante a distribuição dos espaçadores, os dispositivos sejam locados sob as interseções das barras, como forma de controle do posicionamento em função da distância definida a partir da abertura da malha.

Como exemplo, para uma malha com abertura 10 x 15 cm, foi considerada para a distribuição máxima a abertura de 15 cm. Para uma distribuição de espaçadores de 60 cm, inicialmente os dispositivos são posicionados na primeira barra da malha com o espaçamento proposto, ou menor, caso o afastamento entre espaçadores não seja múltiplo da abertura da malha (Figura 37 a). Em seguida, os espaçadores são dispostos na diagonal do primeiro ponto (Figura 37 b) e após, as demais diagonais são compostas para distribuição total na malha (Figura 37 c), formando assim, o padrão de distribuição escalonado total.

Figura 37: Etapas de distribuição de espaçadores em padrão escalonado total: (a) colocação de espaçadores no afastamento desejado na primeira barra; (b) formação de diagonais; (c) padrão de distribuição escalonado total



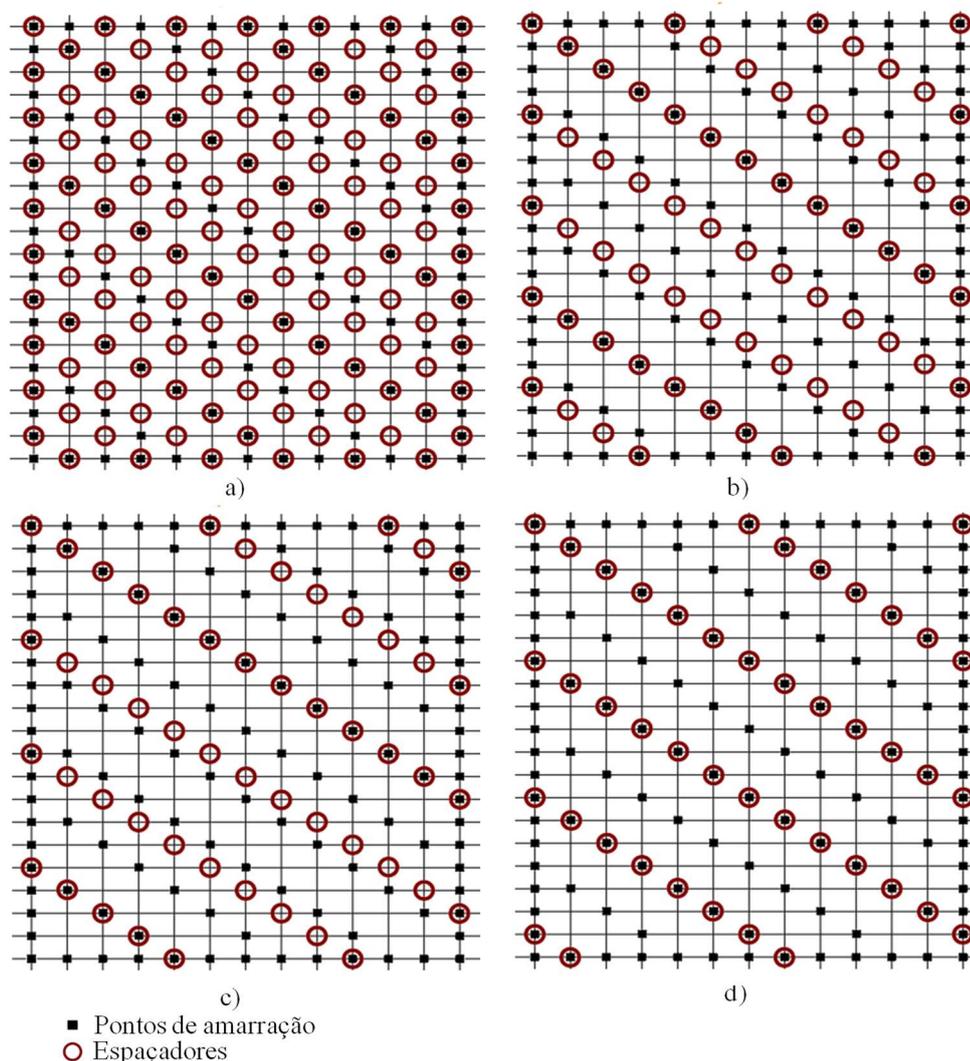
(Fonte: elaborado pela autora, 2018).

Como diferentes espaçamentos de barras foram trabalhados em cada direção, têm-se maior dificuldade em fixar um valor de distribuição dos espaçadores e ainda seguir as indicações

propostas acima, com dispositivos formando diagonais e posicionados nas interseções das barras. Desta forma, a distribuição foi concebida em função do afastamento maior entre barras.

Em simulações iniciais todas as barras foram apoiadas por um espaçador (BS 7973-2, 2001), como mostra a Figura 38 correspondente à malha com afastamento de barras de 10 cm e 15 cm. As demais malhas, com distribuição de espaçadores com todas as barras apoiadas, encontram-se no Apêndice A.

Figura 38: Distribuição de espaçadores para malha 10x15: a) máximo de 40 cm; b) máximo de 60 cm; c) máximo de 75 cm; d) máximo de 100 cm, com amarração a cada 50 cm



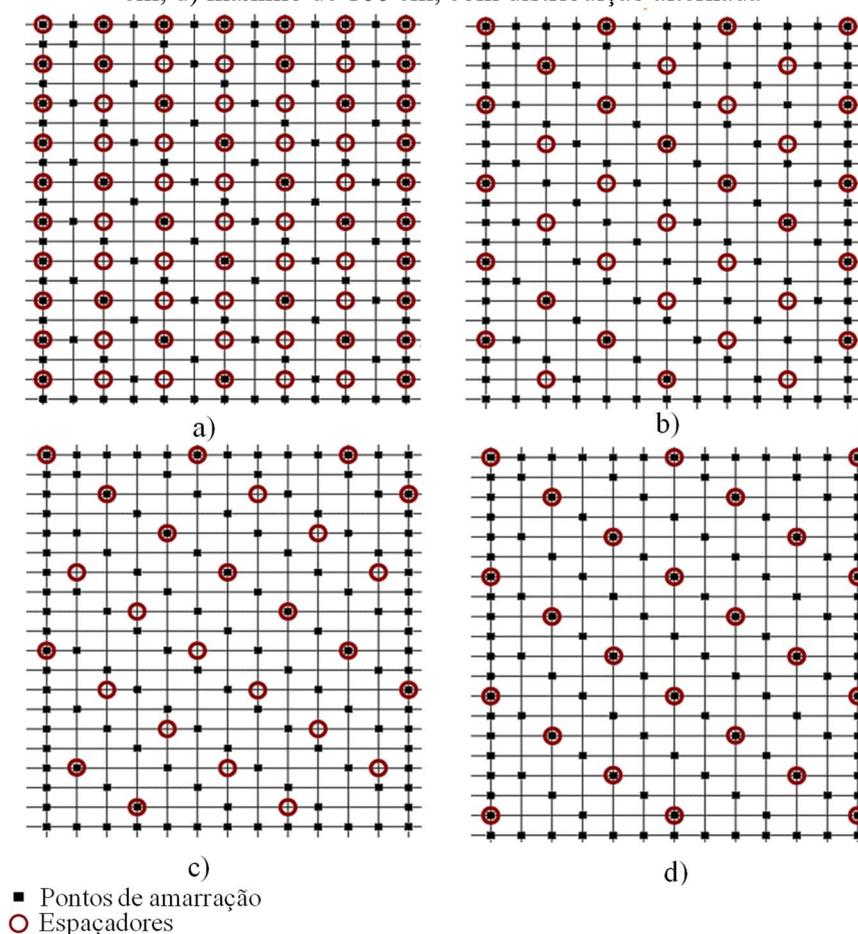
(Fonte: elaborado pela autora, 2018).

Em distribuições controladas de espaçadores (MARAN *et al.* 2015; PALM, 2017; GHIGGI, 2018; OLIVEIRA, 2018) notou-se a grande quantidade de dispositivos ao seguir a indicação normativa de distribuição e a prerrogativa dadas pela BS 7973-2 (2001) de que todas as barras devem estar apoiadas.

Como forma de tentar reduzir a quantidade de espaçadores e ainda obter distribuições de espaçadores adequadas, com cobrimentos satisfatórios, buscou-se uma terceira alternativa de padrão de disposição. Essas especificações são necessárias para tornar a distribuição exequível em canteiro de obras, sendo de fácil instrução como também relatam Maran *et al.* (2015), Palm (2017) e Oliveira (2018) e ainda, sem prejudicar a durabilidade da estrutura com o uso exagerado de espaçadores (ALZYOUND et al, 2016; MASCOLO, s.d).

O padrão de distribuição dos espaçadores de forma escalonada intercalada foi determinado a partir da retirada dos dispositivos. Os espaçadores foram alternados em segmentos iguais, como por exemplo, uma barra apoiada e outra sem espaçadores, como mostra a Figura 39. As demais malhas com distribuição de espaçadores com o apoio de barras alternado encontram-se no Apêndice B.

Figura 39: Distribuição de espaçadores: a) máximo de 40 cm; b) máximo de 60 cm; c) máximo de 75 cm; d) máximo de 100 cm, com distribuição alternada



(Fonte: elaborado pelo autora, 2018).

As especificações de configuração buscaram contemplar metodologias já utilizadas em canteiro de obra, como por exemplo a execução de amarração por diagonais e as diretrizes normativas

de amarração e distribuição de espaçadores consideradas aplicáveis. Assim, o objetivo destas prerrogativas foi tornar a distribuição de espaçadores executável em canteiros de obra, sendo de fácil instrução e sem prejudicar a durabilidade da estrutura com o uso exagerado de espaçadores.

5.1.3 Cargas estimadas

A carga de simulação foi definida em função da execução do elemento estrutural, sendo estimada pelo carregamento decorrente da mão de obra. Dependendo da configuração da malha, o peso de um operário ocasiona deformação permanente crítica na barra de armadura, impedindo a obtenção do cobrimento mínimo normativo.

A carga de execução foi considerada somente para a mão de obra, descartando o peso do concreto fresco sobre a armadura. Isso foi dado a partir dos ensaios experimentais realizados anteriormente (MARAN, 2015), onde o carregamento mais crítico do concreto sobre a malha foi apontado com uma carga de 2,89 kg/m durante o lançamento de concreto. Para uma malha 10x10 cm de abertura, tal carga corresponde a 57,8 kg/m², aplicado sobre 20 segmentos de barras de 1,0 m de comprimento. Como quem governa a deformação plástica da armadura são efeitos locais, tal carga é muito menos exigente que o peso de um operário apoiado em uma única barra. Além disso, a etapa de adensamento do concreto, a carga é transferida para a fôrma e conseqüentemente, esse concreto acaba contornando a armadura, resultando em uma carga final igual a zero.

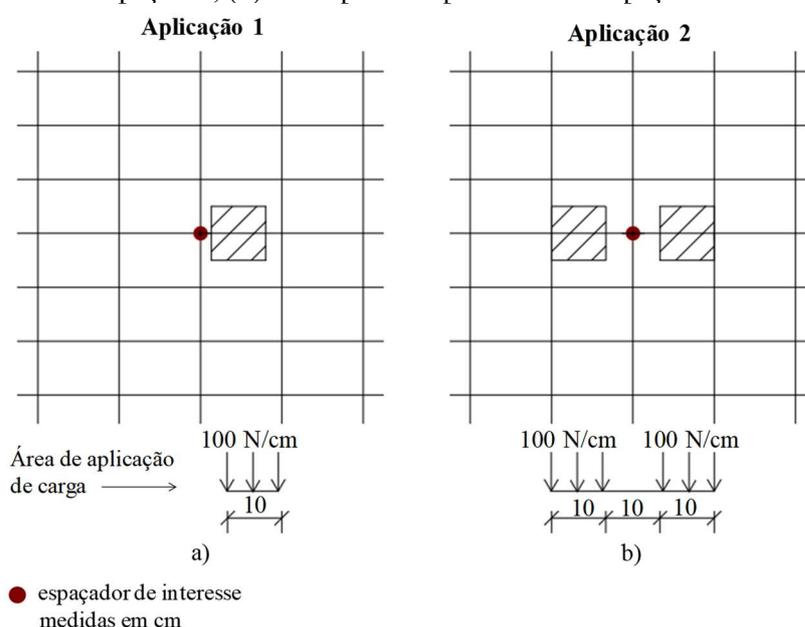
A carga de simulação referente à mão de obra foi representada como sendo o tráfego de operários durante a montagem e concretagem das lajes, conforme observado em diferentes obras (MARAN *et al.*, 2015; MARAN, 2015; PALM, 2017; OLIVEIRA, 2018). A carga arbitrada foi de um operário sobre a armadura com peso equivalente a 1000 N, correspondendo a aproximadamente 100 kg. O peso do operário foi considerado distribuído uniformemente por uma superfície condizente à ponta do pé durante a caminhada, idealizada por um retângulo de 10 x 10 cm para cada pé e com carga aplicada em uma única barra com 10 cm de largura. Esta disposição de carga já foi validada em trabalho anterior (MARAN, 2015).

Desta forma, duas situações de carregamento foram analisadas pois representam casos críticos durante a concretagem no entorno de um espaçador de interesse, escolhido como um dispositivo localizado no centro da malha e com os nós amarrados.

Foram avaliados os efeitos de deformação permanente das barras que somente um operário caminhando causa sobre a malha (Figura 40 a), sendo o peso total concentrado em um único pé (100 N/cm), nomeado como Aplicação 1. Destaca-se que o emprego da carga foi realizada somente em uma barra próxima ao espaçador de interesse (efeito local), como forma de simular a situação mais crítica de carregamento, ou seja, a forma mais concentrada de aplicação.

A Aplicação 2 corresponde a dois operários caminhando próximos ao espaçador de interesse (Figura 40 b) com carga de 100 N/cm em cada área de superfície.

Figura 40: Aplicação de carregamento em função da mão de obra: (a) um operário próximo do espaçador; (b) dois operários próximos do espaçador.



(Fonte: elaborado pela autora, 2018).

Nota-se na Figura 40, que a área de aplicação é dada em 10 cm de extensão na barra, representando a largura da área de aplicação. Para a Aplicação 1, a carga é disposta dois centímetros distante do espaçador de interesse, enquanto a Aplicação 2, representando dois operários possui distância entre cargas de 10 cm, ou seja, 5 cm de distância do espaçador de interesse para cada operário. Por fim, o espaçador de interesse foi considerado como o dispositivo colocado ao centro das malhas analisadas.

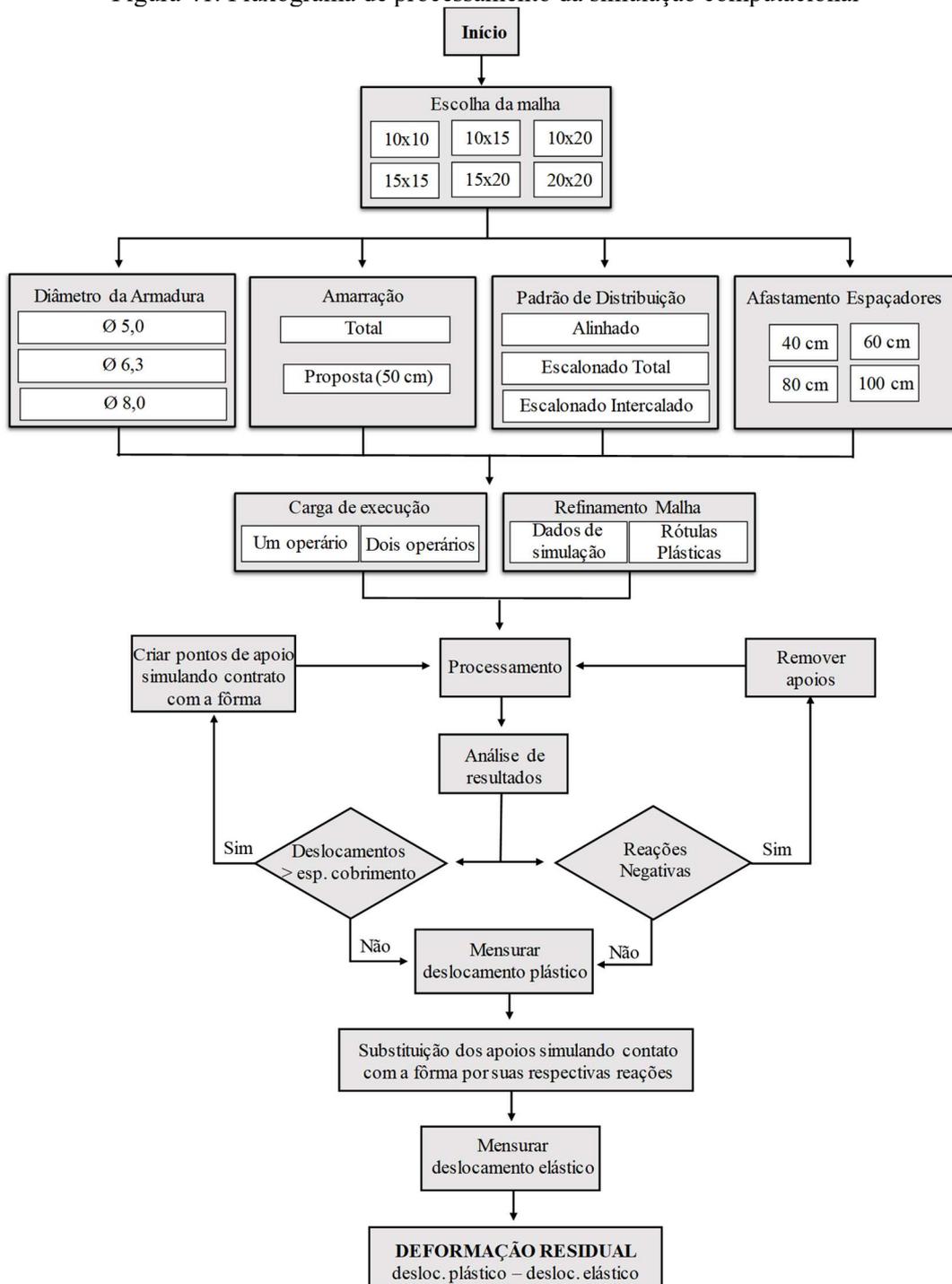
5.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E AFERIÇÃO

A avaliação do efeito de aplicação de carga de execução sobre a armadura foi realizada por simulação computacional. A simulação utilizou o método de elementos finitos, com comportamento não-linear, permitindo a plástificação do aço, através do software *SAP2000*

v.20. A modelagem foi elaborada com a definição da forma geométrica, das restrições de vinculação e dos carregamentos impostos à malha de armadura. Dados adicionais de análise computacional foram apurados com base na aferição dada através de ensaios experimentais.

O resumo de processamento na simulação computacional está mostrado através do fluxograma apresentado na Figura 41.

Figura 41: Fluxograma de processamento da simulação computacional



(Fonte: elaborado pela autora, 2020).

Foi considerado um regime elasto-plástico perfeito para o aço das barras, de acordo com o preconizado pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para as armaduras. A plastificação inicial da barra de aço indica que sob aplicação de carregamento ocorre o início de uma deformação permanente. A barra alcança a plastificação total a partir do momento em que a totalidade da seção transversal está submetida à tensão de escoamento.

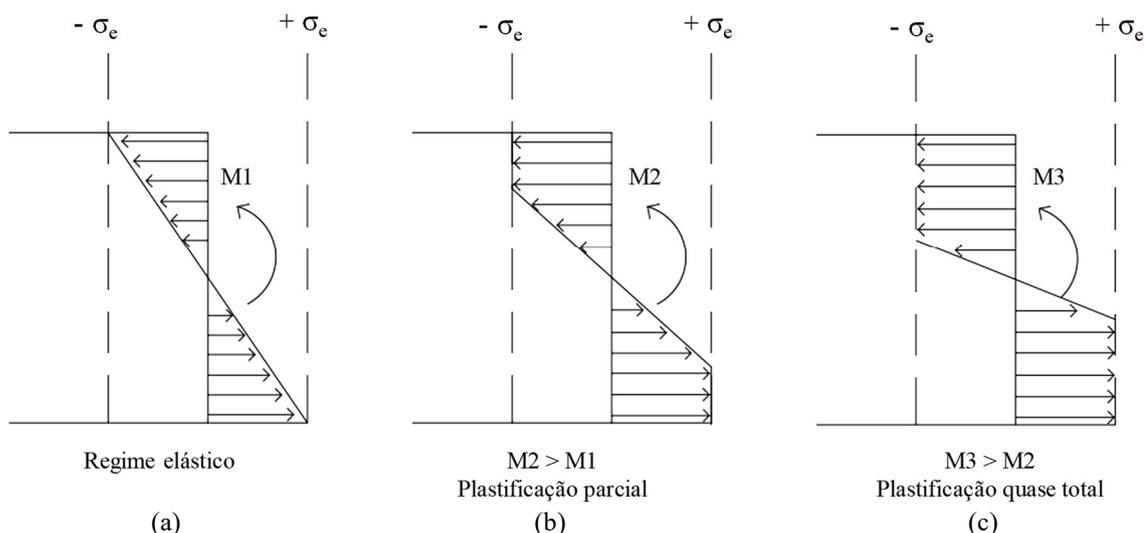
A malha de simulação foi disposta sobre fôrma considerada rígida, a fim de reduzir o número de variáveis na análise, assim como os espaçadores foram considerados como vínculos perfeitos, não permitindo deslocamentos.

Os dados para simulação computacional foram inseridos no *software* SAP2000 v.20 a partir das definições de malha, quanto à amarração e diâmetro da barra, além das configurações de distribuição de espaçadores descritas no capítulo 5.1.

5.2.1 Rótulas Plásticas

À medida que o momento fletor atuante em uma dada seção cresce, as tensões elásticas crescem igualmente, sendo máximas nos pontos mais afastados da linha neutra. Em um material elasto-plástico perfeito atingir a tensão de escoamento não significa necessariamente a falha do material (perda de capacidade resistente), uma vez que, naquele ponto, as tensões se mantêm constantes, e o material não oferece resistência ao acréscimo de deformação. O aumento no momento fletor faz com que uma região maior da seção esteja com tensão igual à tensão de escoamento, conforme Figura 42.

Figura 42: Comportamento da seção em regime elástico e de plastificação; (a) regime elástico; (b) plastificação inicial; (c) plastificação quase total



(Fonte: elaborado pela autora, 2020).

Quando a totalidade da seção atinge a tensão de escoamento, não há como equilibrar qualquer aumento na sollicitação atuante. A seção gira livremente para acréscimos de momento fletor, comportando-se como uma rótula, sendo chamada de rótula plástica, redistribuindo as sollicitações para outras seções até que a capacidade de rotação da seção se esgote ou a estrutura se transforme num mecanismo pela formação de inúmeras rótulas plásticas.

As rótulas plásticas são formadas pelo crescimento da região plastificada da seção e são condicionadas pela capacidade de rotação, sendo utilizadas na análise não-linear de estruturas. As rótulas foram empregadas na região de interesse da barra como meio de analisar o comportamento plástico das armaduras e a deformação residual.

O *software* SAP2000 v.20 aciona as rótulas plásticas somente quando o material passa por plastificação total. Contudo, com o crescimento da carga a barra de aço sofre plastificação parcial, e assim, o carregamento resulta em um começo de deformação permanente, sendo necessário considerar esse comportamento na simulação computacional.

Para o acionamento das rótulas plásticas em análise não-linear no início de plastificação, a tensão de escoamento do aço foi alterada. Para isso, foi aplicada a relação entre o momento elástico da barra e o momento de plastificação total, como demonstrado nas equações 1 e 2.

$$M_{el} = \left(\frac{\pi \cdot R^3}{4} \right) \cdot \sigma_e = 0,785 \cdot R^3 \cdot \sigma_e \quad (\text{Equação 1})$$

$$M_{pt} = \left(\sigma_e \cdot \frac{\pi \cdot R^2}{2} \cdot \frac{4 \cdot R}{3 \cdot \pi} \right) \cdot 2 = 1,333 \cdot R^3 \cdot \sigma_e \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

M_{el} : Momento elástico

M_{pt} : Momento de plastificação total

σ_e : Tensão de escoamento do aço

R: Raio da barra de aço

Para que as rótulas plásticas fossem acionadas com o início de plastificação da seção, e não com a plastificação total, como é o padrão do *software*, a tensão de escoamento do aço foi reduzida na razão 1,333/0,785, que resulta em um coeficiente de 1,698. Assim, ao aplicar essa redução na tensão de escoamento do aço, 500 MPa para aço CA-50 por exemplo, a tensão de escoamento foi de 294,5 MPa.

Esse coeficiente foi corrigido a partir de ensaios experimentais dos deslocamentos resultantes frente a aplicação da carga em estrutura bi apoiada. O coeficiente aplicado para ativar as rótulas plásticas, apontando o início de plastificação foi alterado para 1,5789. Assim as tensões de escoamento utilizadas foram de 317 MPa (CA-50) e 354 MPa (CA-60).

Para a aplicação dos coeficientes, foram utilizados os valores normativos, aço CA-50 (500 MPa) e aço CA-60 (600 MPa), pois são correspondentes às tensões que o aço das barras de armadura devem atender, embora seja frequente se obter amostras com tensões mais elevadas. Entretanto, o fabricante tem como obrigação atender o valor normativo, sendo esse o parâmetro tomado como base para as simulações.

A aplicação das rótulas plásticas é dada a partir da definição de pontos que representam o comportamento da barra de aço, em função da relação momento x curvatura. Para esta análise, a barra de diâmetro intermediário avaliada neste trabalho (6,3 mm) foi dividida em diversas faixas, como forma de verificar o gráfico momento/curvatura e conseqüentemente os pontos onde há mudança de comportamento.

Usando de simetria, metade da seção foi dividida em 45 faixas horizontais, cujos limites foram estabelecidos a cada 2° de inclinação do ângulo α de um raio. Para cada fatia, foi definida a área e a posição do centróide em relação ao centro da seção (Figura 43) A deformação específica em cada centróide foi obtida pela equação 3.

$$\varepsilon = \frac{1}{r} \cdot y \quad (\text{Equação 3})$$

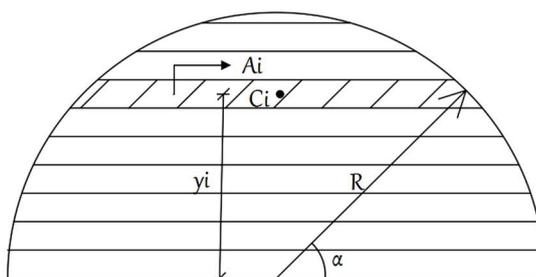
Onde:

ε : Deformação específica

$\frac{1}{r}$: Curvatura imposta (r = raio de curvatura)

y: altura do centróide da seção

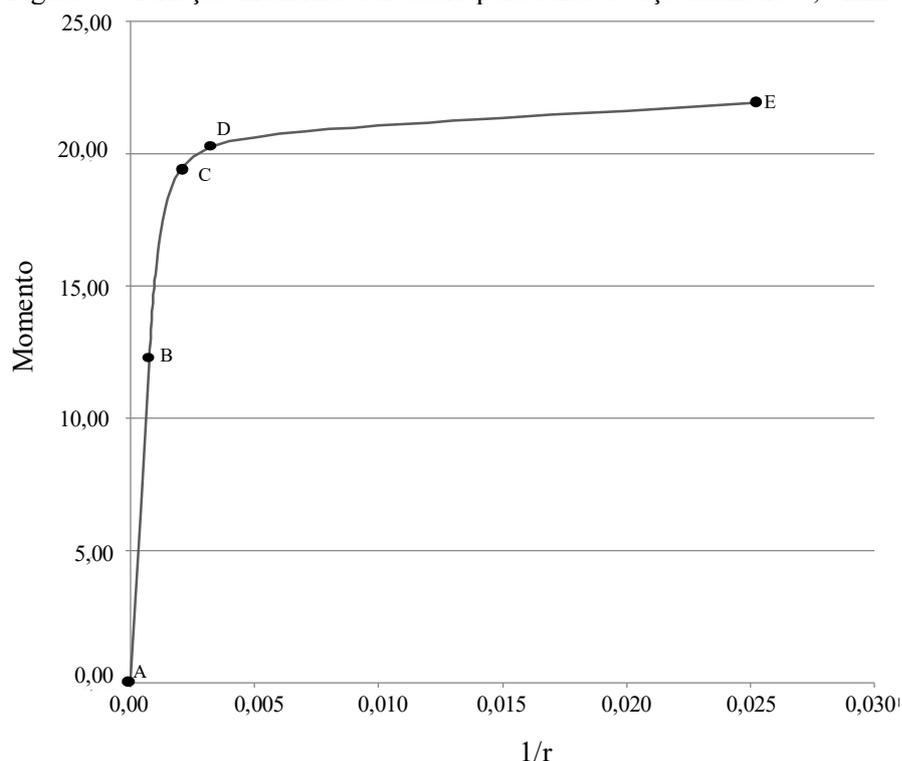
Figura 43: Divisão da seção da barra de armadura para análise de comportamento



(Fonte: elaborado pela autora, 2020).

A tensão no centróide foi obtida pelo diagrama tensão-deformação original elastoplástico perfeito do aço, conforme NBR 6118 (ABNT, 2014). Uma vez imposta a curvatura ($1/r$), foi possível calcular a deformação específica no centróide de cada fatia, a tensão nesse ponto, a resultante de forças na fatia, considerando-se a tensão no centróide constante em toda a fatia, e o momento fletor resultante, gerando o gráfico momento curvatura mostrado na Figura 44.

Figura 44: Relação momento/curvatura para barra de aço diâmetro 6,3 mm



(Fonte: elaborado pela autora, 2020).

Como o *software* SAP 2000 permite a definição da relação momento curvatura com cinco pontos de definição e quatro segmentos lineares entre eles, o diagrama foi aproximado como tal, removendo-se a parcela elástica da curvatura e adimensionalizando-se os momentos em função do momento de início de plastificação, considerado como 1.

O ponto A é definido sempre como a origem. O ponto B representa o limite do comportamento elástico da barra, ou seja, o início da plastificação. As rótulas são ativadas ao se ultrapassar o ponto B. O ponto C é intermediário, representando a plastificação parcial da barra. O ponto D indica a plastificação total do aço e, por fim, o ponto E representa a ruptura da barra.

Os valores obtidos pela aproximação do diagrama momento curvatura da Figura 44 estão indicados na Tabela 27.

Tabela 27: Propriedades das Rótulas Plásticas através de estimativa calculada

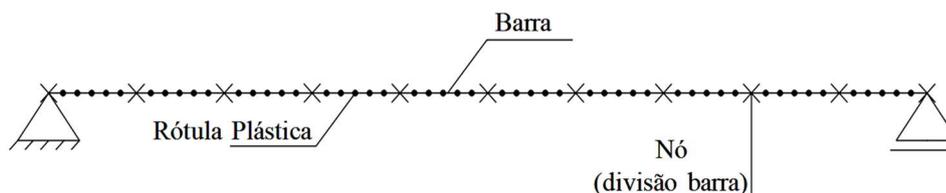
Ponto	Momento	Curvatura
A	0	0
B	1,0	0
C	1,55	1,377
D	1,64	3,214
E	1,785	32,554

(Fonte: elaborado pela autora, 2019)

Além da não linearidade física decorrente das rótulas plásticas, as simulações computacionais consideraram a não linearidade geométrica decorrente de grandes deformações, com uso de algoritmo P-Delta.

A aplicação das rótulas foi definida com deformação controlada pelo momento em relação ao eixo central de inércia da seção transversal, paralelo ao plano horizontal e com comprimento relativo a 0,2 do comprimento da barra. Para refinamento das barras, ou seja, a aproximação de resultados computacionais com experimentais, a barra entre nós ou apoios foi dividida em 10 partes. Em cada parte foram aplicadas as rótulas plásticas com centro em posições relativas de 0,1, 0,3, 0,5, 0,7 e 0,9 do comprimento da barra, com zona de influência de 0,2 do comprimento da barra, como mostra a Figura 45, resultando em 5 rótulas plásticas igualmente distribuídas por barra.

Figura 45: Refinamento da barra e aplicação de rótulas plásticas



(Fonte: elaborado pela autora, 2019)

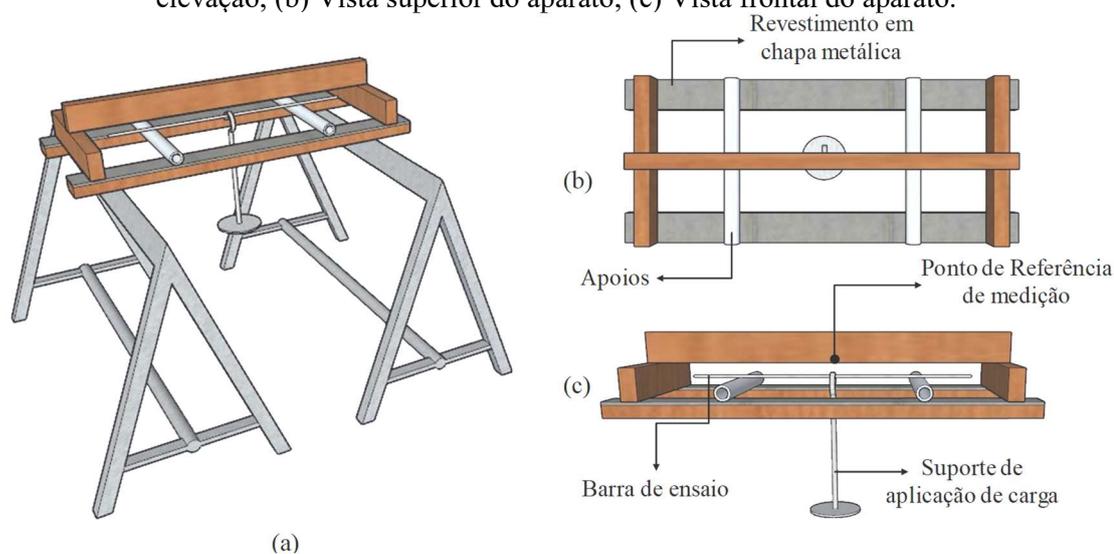
Para aferição da simulação computacional com a deformação real da barra, ensaios experimentais foram realizados para aproximação de resultados e ajuste dos parâmetros de simulação computacional.

O ensaio de aferição foi realizado em laboratório simulando a mesma situação do programa, com uma configuração simples proposta. A configuração de uma barra nervurada de aço com 50 cm de comprimento e de diâmetro 8,0 mm (aço CA-50), em sistema bi apoiado e com cargas pontuais centralizadas variadas foi reproduzida.

Optou-se por elevar a barra e aplicar a carga pontual de forma suspensa (Figura 46a) e colocar o sistema sobre uma superfície lisa como forma de melhorar o atrito. Sendo assim, as guias de

apoio receberam uma chapa metálica e no contato entre apoio do sistema e sustentação foi aplicado pó de grafite como incremento de melhoria quanto ao atrito (Figura 46b). A barra de ensaio foi amarrada em dois apoios móveis, como forma de representar o deslocamento do apoio e não o escorregamento da barra frente ao carregamento (Figura 46 c). Ensaios anteriores mostraram que fixar os apoios no suporte de sustentação e deixar a barra livre gerava grande variabilidade de deformações frente ao carregamento imposto.

Figura 46: Aparato para ensaio de deslocamento de barra de aço: (a) Aparato suspenso por suporte de elevação; (b) Vista superior do aparato; (c) Vista frontal do aparato.



(Fonte: elaborado pela autora, 2019).

As cargas aplicadas foram definidas conforme comportamento da barra no *software* SAP 2000. Assim optou-se por iniciar a aplicação de carga de 0,2 kN, onde não há apontamento de plastificação da barra e o crescimento de carga foi dado como meio de refinar os resultados, tendo um maior número de análises para comparação entre deformação computacional e experimental. A barra de ensaio recebeu a aplicação de um gancho junto ao suporte de carga, e assim foi possível mensurar a deformação da barra com a carga aplicada de uma forma mais precisa próximo ao ponto de carregamento (centro da barra).

O método de ensaio consistiu em medir a distância entre o ponto de referência e a barra para cada aplicação e retirada de carga, como forma de mensurar a deformação ativa e a deformação residual. Para cada etapa de carregamento foram realizadas duas medições com auxílio de paquímetro digital, não considerando a nervura da barra de aço.

A distância inicial foi dada entre referência de medição e a barra de aço de ensaio, com o suporte de carga já instalado e denominada como REF na Tabela 28. A aplicação de carga foi realizada

com período controlado de um minuto, proposto a partir dos resultados em ensaios testes que mostraram grande variabilidade nas deformações residuais.

As medidas foram geradas a partir das etapas de carregamento, com duas medições próximas ao gancho do suporte dos pesos (M_{A1} e M_{A2}). Após o controle de tempo de aplicação, os pesos foram retirados do suporte e foram realizadas mais duas medidas (M_{R1} e M_{R2}), resultando em médias para análise de deslocamento. A deformação total foi obtida a partir da diferença entre média das medidas com os pesos posicionados (M_{eA}) e a média de referência. Enquanto a deformação plástica residual, ou seja, o deslocamento permanente foi calculado pela diferença entre a média da deformação após a retirada da carga (M_{eR}) e a média referência, como exposto na Tabela 28.

Tabela 28: Deformações de ensaio experimental de aferição

Carga (kN)	Deformações (mm)						Deformação Total	Deformação Plástica Residual
	Aplicação da Carga			Retirada da Carga				
	M_{A1}	M_{A2}	Média (M_{eA})	M_{R1}	M_{R2}	Média (M_{eR})		
REF	74,53	74,4	74,47	74,53	74,4	74,47	-	
0,20	88,69	88,34	88,52	74,57	74,37	74,47	14,05	0,005
0,25	93,08	93,43	93,26	74,78	74,34	74,56	18,79	0,095
0,30	97,73	97,60	97,70	75,15	75,29	75,22	23,23	0,755
0,35	102,66	102,70	102,68	75,53	75,70	75,62	28,215	1,15
0,37	104,72	104,71	104,72	75,82	76,11	75,97	30,25	1,5
0,39	107,39	108,50	107,72	77,49	77,65	77,57	33,255	3,105
0,40	113,35	114,08	113,72	85,83	83,02	82,93	39,25	8,46
0,41	121,70	121,84	121,77	90,93	90,94	90,94	47,305	16,47
0,42	128,49	129,24	128,87	97,37	97,47	97,42	54,40	22,95
0,43	137,12	137,33	137,23	104,15	104,68	104,42	62,76	29,95
0,44	143,11	143,55	143,33	109,38	109,46	109,42	68,865	34,95
0,45	150,19	150,12	150,16	117,82	117,87	117,85	75,69	43,48

(Fonte: elaborado pela autora, 2019).

Concomitantemente ao ensaio experimental foi realizado o comparativo com os dados gerados computacionalmente para a mesma situação como forma de aferição, demonstrado através da Tabela 29 com a análise de erros percentuais para aplicação de rótulas plásticas originais. Destaca-se que a barra de ensaio experimental teve diâmetro medido (7,94 mm) e valores de resistência de escoamento ensaiados (600 MPa) como forma de apurar os resultados entre *software* e medição em laboratório.

Com a análise entre o erro percentual obtido para a aplicação das rótulas plásticas originais, foram aplicadas correções nos parâmetros das rótulas plásticas como meio de diminuir o erro percentual para que o mesmo ficasse dentro do limite de 10%. Enfatiza-se que pelos valores de deformação serem dados em milímetros e pela influência que o diâmetro exerce, devido a

inércia da barra ser o raio na quarta potência, o erro percentual controlado a 10% demonstra resultados satisfatórios de comparação entre análise computacional e experimental.

Tabela 29: Aferição entre deformações experimentais e computacionais com uso de rótulas plásticas originais de análise

Carga (kN)	Deformação Total (experimental) mm	Deformação Total (computacional) mm	Erro (%)	Deformação Plástica Residual (experimental) mm	Deformação Plástica Residual (computacional) mm
REF	-	-	-	-	-
0,20	14,05	14,576	3,744	0,005	0
0,25	18,79	18,089	3,731	0,095	0,133
0,30	23,23	23,996	3,297	0,755	2,68
0,35	28,215	31,906	13,082	1,15	7,254
0,37	30,25	35,349	16,856	1,5	9,37
0,39	33,255	39,123	17,645	3,105	11,821
0,40	39,25	42,078	7,205	8,46	14,117
0,41	47,305	45,040	4,788	16,47	16,421
0,42	54,40	53,107	2,377	22,95	23,830
0,43	62,76	62,976	0,344	29,95	33,044
0,44	68,865	71,888	4,390	34,95	41,301
0,45	75,69	80,042	5,750	43,48	48,802

(Fonte: elaborado pela autora, 2019)

Devido aos resultados de aplicação das rótulas plásticas apresentarem percentual de erro superior ao estimado nos carregamentos de 0,35 kN, 0,37 kN e 0,39 kN foi realizada a alteração de valores. O ajuste das rótulas plásticas foi dado em pontos intermediários (Ponto C e Ponto D) de curvatura como forma de atingir erros percentuais inferiores ao estipulado (10%), como forma de aproximar deslocamentos de simulação computacional e de ensaio experimental. A conferência de erro percentual frente a alteração de rótulas plásticas é exposto na Tabela 30.

Tabela 30: Aferição entre deformações experimentais e computacionais com uso de rótulas plásticas alteradas

Carga (kN)	Deformação Total (experimental) mm	Deformação Total (computacional) mm	Erro (%)	Deformação Plástica Residual (experimental) mm	Deformação Plástica Residual (computacional) mm
REF	-	-	-	-	-
0,20	14,05	14,576	3,150	0,005	0
0,25	18,79	18,016	4,119	0,095	0,06
0,30	23,23	23,044	0,801	0,755	1,728
0,35	28,215	29,383	4,140	1,15	4,731
0,37	30,25	32,121	6,185	1,5	6,142
0,39	33,255	34,992	5,223	3,105	7,69
0,40	39,25	38,920	0,841	8,46	10,959
0,41	47,305	43,123	8,841	16,47	14,504
0,42	54,40	49,772	8,507	22,95	20,495
0,43	62,76	60,057	4,307	29,95	30,125
0,44	68,865	69,300	0,632	34,95	38,713
0,45	75,69	78,055	3,125	43,48	46,815

(Fonte: elaborado pela autora, 2019).

Apesar do controle quanto a reprodução da tensão de escoamento da barra de aço ensaiada na simulação experimental aplicada na simulação computacional, assim como a espessura da barra, destaca-se que a variação entre as deformações permanentes para a mesma carga pode ser dada a pela influência da espessura da barra de aço, através da inércia. Também, a diferença entre as medidas pode ser gerada pelo comportamento da barra a partir do limite de elasticidade.

A partir da obtenção de erros percentuais reduzidos e mais próximos ao estimado, as rótulas plásticas foram alteradas e redefinidas para as análises computacionais com valores mostrados na Tabela 31.

Tabela 31: Propriedades das Rótulas Plásticas através de aferição

Ponto	Momento	Curvatura
A	0	0
B	1,0	0
C	1,55	0,9
D	1,64	5,0
E	1,785	32,554

(Fonte: elaborada pela autora, 2019)

5.2.2 Amarração da Malha

Para as malhas de armadura definidas com amarração total, todas as barras são interligadas por nós únicos, não sendo necessária nenhuma edição. A malha definida com todos os pontos amarrados foi gerada automaticamente pelo *software* SAP2000 v.20 a partir da entrada dos dados.

O modelo trabalhado considera ligação rígida entre as barras, ocasionando acoplamento entre torção e flexão, e assim, simulando uma malha soldada. Todavia, as malhas usuais em obra são compostas por barras de aço isoladas amarradas com arame recozido, e desta forma não possuem união rígida entre interseções, apenas uma vinculação dos deslocamentos verticais. Assim, para simular o desacoplamento flexão-torção, as barras de armadura tiveram seu valor de inércia torcional alterado para um valor mais baixo que o correspondente à seção transversal original, de 1%. Como consequência, o momento torçor nas barras do modelo tornou-se praticamente nulo, sendo mais aproximado do modelo de malha formado por barras independentes.

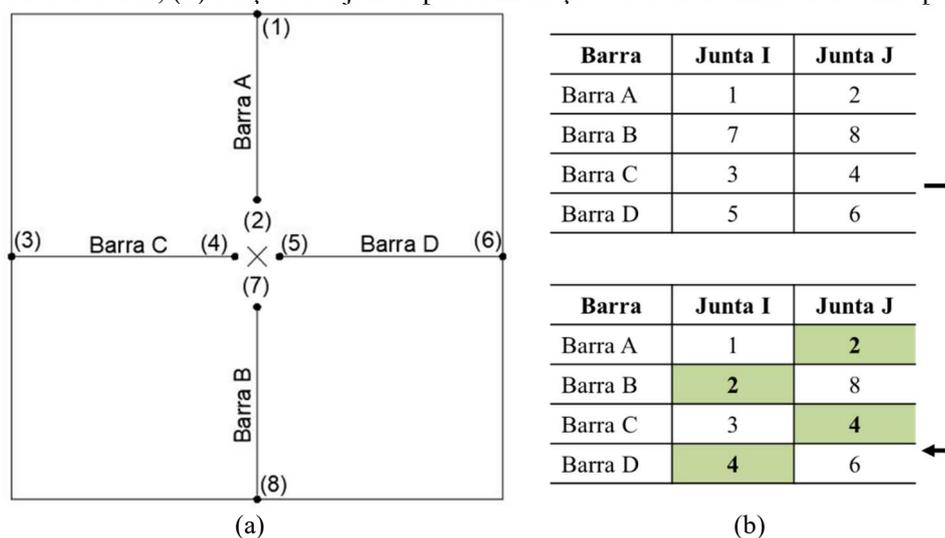
Em ligações não amarradas foram atribuídos nós duplos, como forma de reproduzir a ação isolada de cada barra frente ao carregamento, permitindo assim, o deslocamento da barra inferior em relação à barra superior. A amarração da armadura definida com espaçamento

máximo de 50 cm e com metodologia proposta na Figura 34 foi configurada a partir de edição dos nós. As interseções sem ligação e a continuidade das barras da malha foram determinadas com base na reconexão de pontos nos nós da grelha. Para isso, após a modelagem da malha de armadura, todos os nós, com exceção do perímetro, foram desconectados pela ferramenta de edição.

Os elementos de barra possuem em suas extremidades uma junta I (início) e uma junta J (fim) representadas por números. Ao desconectar esses pontos, cada nó de interseção é formado por 4 juntas, conforme representado na Figura 47a, onde o nó X central ao ser desconectado possui a junta 2 (junta J da Barra A), junta 4 (junta J da Barra C), junta 5 (junta I da Barra D) e junta 7 (junta I da Barra B).

Como exemplo, a Barra C e a Barra D estão na mesma direção e são contínuas em situação real (Figura 47a) e assim, a conectividade entre barras com continuidade foi editada. Para representar uma interseção sem amarração, as barras contínuas passam a ter uma junta de conexão em comum, como mostra a Figura 47b, a Barra C e Barra D possuem mesma junta 4.

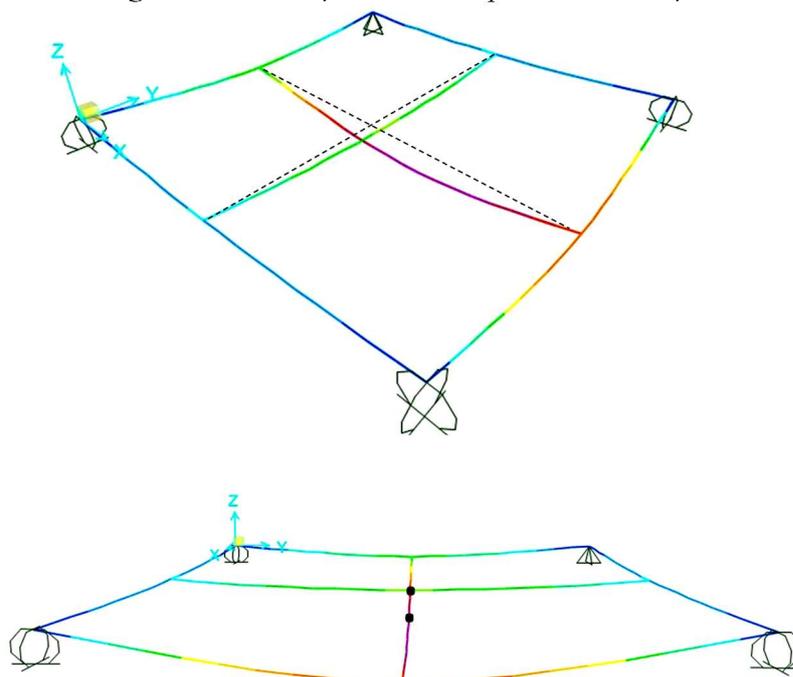
Figura 47: Etapas de edição para amarração de malha no software SAP2000: (a) juntas das barras após desconexão dos nós; (b) edição das juntas para simulação de barras amarradas e independentes



(Fonte: elaborado pela autora, 2019)

Neste método de edição de conectividade foi possível simular barras sobrepostas sem nós de amarração. Após essa alteração de dados, foi simulada a aplicação de carga para confirmar o desligamento das barras em cada direção, como mostra a Figura 48.

Figura 48: Simulação da malha quanto à amarração



(Fonte: elaborado pela autora, SAP 2000, 2019)

5.2.3 Modelagem da malha

A modelagem foi iniciada a partir da seleção de modelo de grelha para definição do afastamento e quantidade das barras. Após a inserção da malha, foram definidas as propriedades dos materiais, como mostra a Tabela 32.

Tabela 32: Propriedades de simulação computacional

Propriedade	Valor	Unidade
Módulo de Elasticidade (E)	196	kN/mm ²
Resistência característica de escoamento (Fy)	0,38 (CA-60) 0,317 (CA-50)	kN/mm ²
Resistência característica de ruptura (Fu)	0,66 (CA-60) 0,54 (CA-50)	kN/mm ²
Constante Torcional	0,01	-

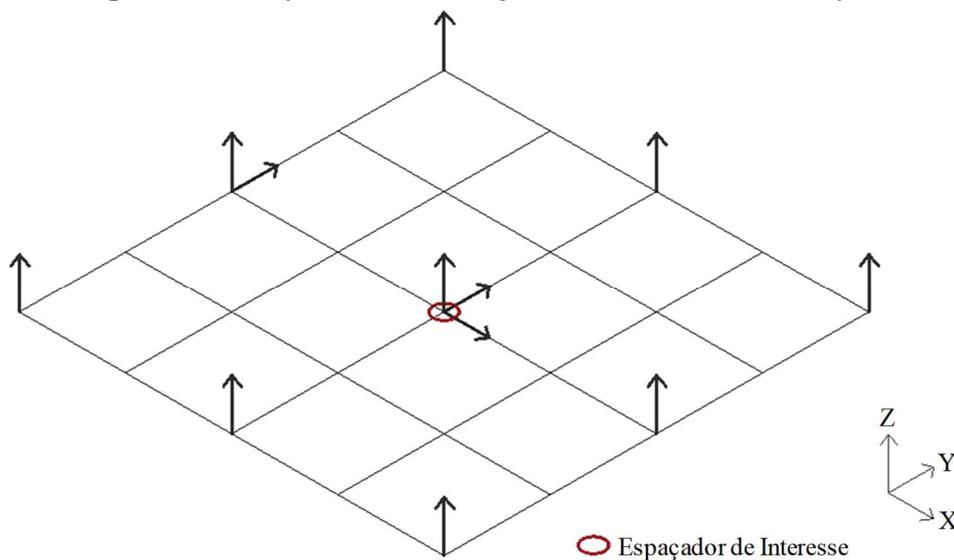
(Fonte: elaborado pela autora, 2019).

As resistências características de escoamento (Fy) das barras de aço foram geradas a partir da aplicação do coeficiente de ativação das rótulas plásticas, associando o momento elástico e de plastificação total das barras de aço conforme descrito no capítulo 5.2.1. Enquanto as resistências características de ruptura das barras de aço foram indicadas conforme as recomendações normativas e de fabricantes.

As malhas foram simuladas em todos os níveis dispostos na Figura 32, e o espaçador de interesse foi escolhido como sendo um dispositivo central para análise da aplicação da carga de

forma mais abrangente. O espaçador de interesse sempre possui restrição de deslocamentos em X, Y e Z no plano na malha de análise computacional, enquanto os demais espaçadores são indicados com restrição somente em Z. Ainda, na mesma barra onde encontra-se o espaçador de interesse foi escolhido um espaçador com restrição em Z e Y para evitar rotação de corpo rígido do conjunto em torno do eixo Z no apoio central, como mostrado Figura 49.

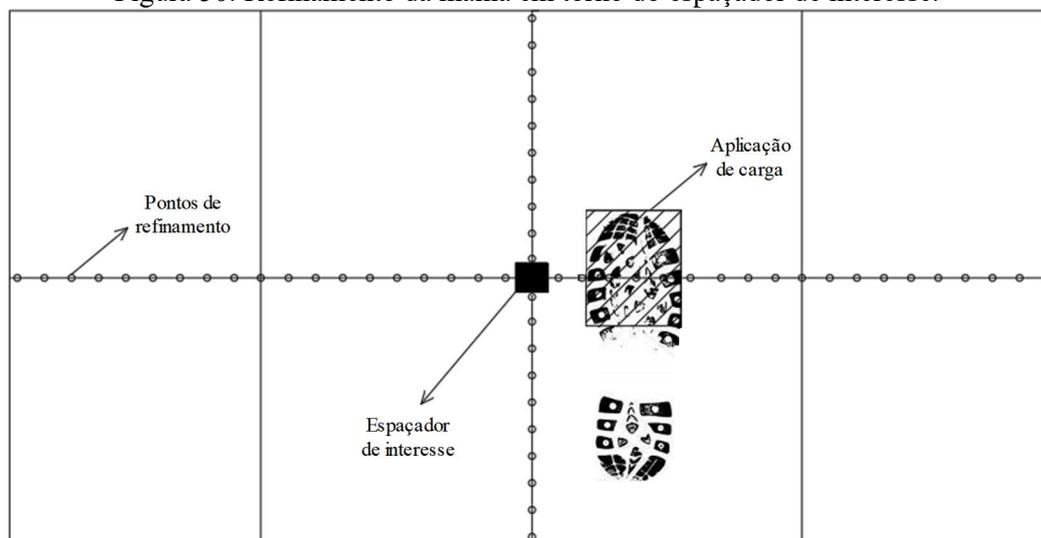
Figura 49: Restrição dos vínculos aplicados na malha de simulação.



(Fonte: elaborado pela autora, 2019).

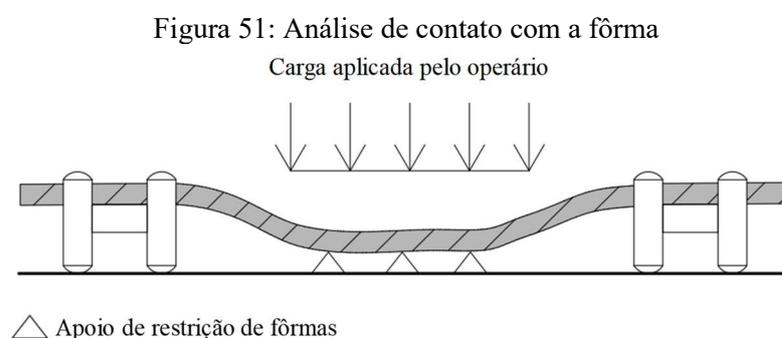
As barras adjacentes ao espaçador de interesse foram refinadas como forma de obter resultados com maior precisão (Figura 50). As quatro barras no entorno do espaçador, junto com duas barras adicionais na linha de aplicação de carga, foram divididas em 10 partes. Cada divisão da barra recebeu cinco rótulas plásticas, conforme descrito no capítulo 5.2.1.

Figura 50: Refinamento da malha em torno do espaçador de interesse.



(Fonte: elaborado pela autora, 2019).

A simulação foi feita com análise não linear geométrica (grandes deslocamentos) empregando o algoritmo P-Delta. Com a limitação da fôrma ser considerada rígida nas simulações computacionais, durante a aplicação de carregamento foram avaliadas as possíveis situações de contato da armadura com a fôrma. Deslocamentos da armadura maiores que a espessura de cobrimentos não são possíveis na situação real, porque a fôrma, considerada rígida, impede o deslocamento da armadura nos pontos de contato. Tal restrição modifica a distribuição do momento fletor nas barras e, conseqüentemente, a plastificação das mesmas. Desta forma, foram acrescentados outros apoios com deslocamento imposto igual ao cobrimento simulado, como forma de impedir que a barra ultrapasse a fôrma (Figura 51).

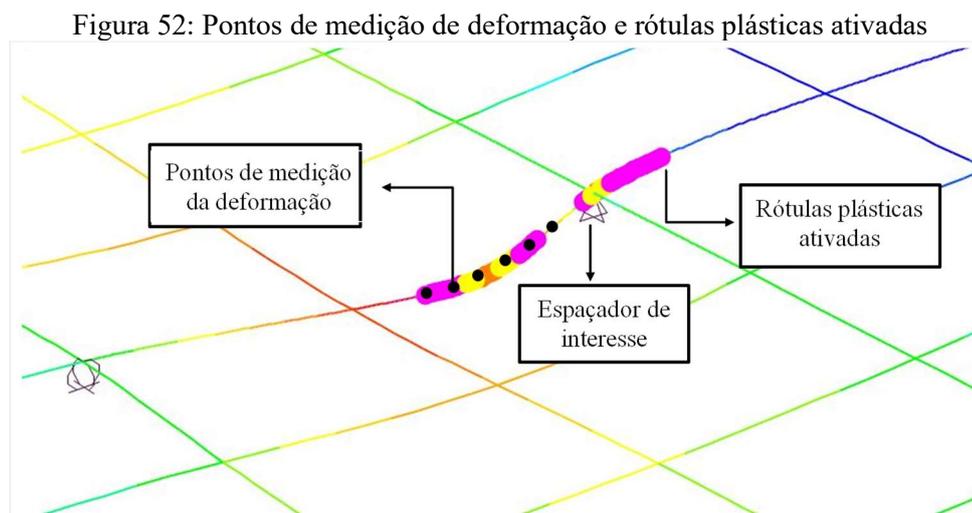


(Fonte: elaborado pela autora, 2018).

O distanciamento entre a fôrma e a armadura definiu o número de análises realizadas para diferentes espessuras de cobrimento. Para malhas menos rígidas, com diâmetro de 5,0 mm por exemplo, as análises envolveram todas as espessuras de cobrimento propostas, uma vez que há contato com a fôrma para cobrimentos mais elevados, como de 45 mm. Em malhas compostas por diâmetros maiores, como 8,0 mm, não houve necessidade de avaliação em diferentes espessuras de cobrimento, uma vez que a carga aplicada não resulta em contato da armadura com a fôrma, mesmo para as menores espessuras de cobrimento estudadas.

Após a análise da deformação gerada pelo carregamento imposto e a inclusão de apoios de restrição de fôrma, também foram verificadas as reações nos apoios correspondentes aos espaçadores, uma vez que estes representam vínculos incompletos, impedindo deslocamentos em um único sentido (para baixo) da direção restringida (vertical). Caso houvesse reação negativa nos nós, o que representaria o espaçador puxando a armadura para baixo, o apoio era retirado da malha. Os apoios com reação negativa foram retirados por partes, iniciando sempre a partir do apoio com a reação negativa de maior valor, e posterior reprocessamento da simulação.

O processamento foi considerado adequado somente com a ausência de reações negativas e a deformação plástica não-linear condizente com a espessura de revestimento avaliada, com tolerância de 1,0 mm. Após os critérios de aceitação serem atendidos, foram selecionados seis nós na barra de aplicação de carga para medição de deformação (Figura 52) e avaliação da influência das composições de malhas no revestimento.



(fonte: elaborado pela autora, 2020)

Após registro dos pontos de deformação em análise plástica foi realizado novo processamento como forma de mensurar o comportamento elástico da malha. As reações resultantes nos apoios com deslocamento imposto de restrição fôrmas foram aplicadas nos mesmos nós como cargas nodais. A análise foi realizada sem a aplicação das rótulas plásticas, mas ainda em análise não-linear geométrica com grandes deslocamentos. Os vínculos no modelo nesta análise correspondem somente aos espaçadores. Desta forma, a mesma situação de cargas e vínculos foi imposta nas análises plásticas e elásticas.

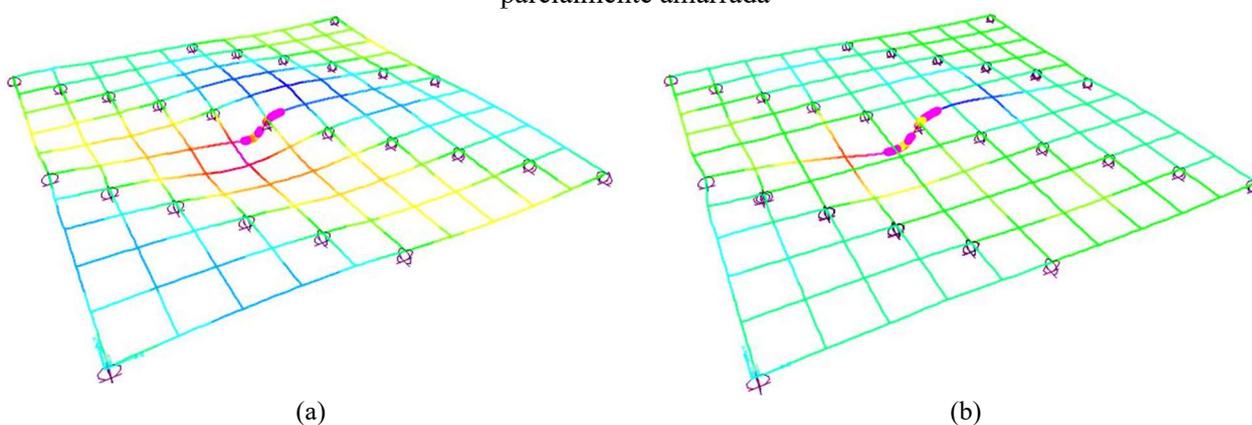
A deformação residual das malhas frente ao carregamento foi gerada pela diferença entre a análise plástica e elástica. A deformação plástica analisada foi considerada como sendo o maior valor entre a diferença dos seis pontos medidos. Um exemplo de planilha com anotação de análise plástica e análise elástica pode ser consultado no Apêndice D.

Para as malhas com todos os pontos amarrados, as configurações com maiores afastamentos entre barras, menores diâmetros de armadura e espessuras de revestimentos mais elevadas possuem tempo de simulação superior, chegando a aproximadamente 30 minutos por processamento em um computador com processador Intel Core i5 de 7ª geração, com 8 GB de memória RAM. Dependendo da quantidade de espaçadores e do padrão de distribuição, como

exemplo padrão escalonado total com distribuição a cada 40 cm, a repetição de processos eleva consideravelmente o tempo de análise.

Para malhas com amarração proposta a cada 50 cm, algumas configurações demandaram cerca de 50 minutos por processamento, devido ao maior número de etapas de simulação para a convergência dos dados. Ao aplicar a carga de execução correspondente a um operário, a malha totalmente amarrada sofre maior distribuição de deslocamento, devido ao acomplamento total de nós (Figura 53a), enquanto a malha parcialmente amarrada (Figura 53 b) possui deslocamento localizado somente na barra com carga aplicada.

Figura 53: Comparação de comportamento de malha 20x20 cm, diâmetro 5,0 mm, padrão de distribuição escalonado total a cada 100 cm para diferentes amarrações: (a) malha totalmente amarrada; (b) malha parcialmente amarrada



(Fonte: elaborado pela autora *software* SAP2000, 2020).

A necessidade de aumentar o número de etapas de simulação foi percebida a partir da aplicação dos apoios com deslocamento imposto para simular o contato com a fôrma. As análises iniciais foram geradas a partir de 300 etapas de simulação. Caso a espessura de cobertura fosse de 20 mm e a armadura tivesse contato com a fôrma, um apoio de restrição com deslocamento imposto de 20 mm era adicionado. Após a análise ser efetuada, por muitas vezes esse apoio adicional não estava com o deslocamento imposto (20 mm) mas sim com valor menor. Isso significa que as etapas de simulação foram concluídas mas a malha possui necessidade de maior número de passos para convergência completa de dados.

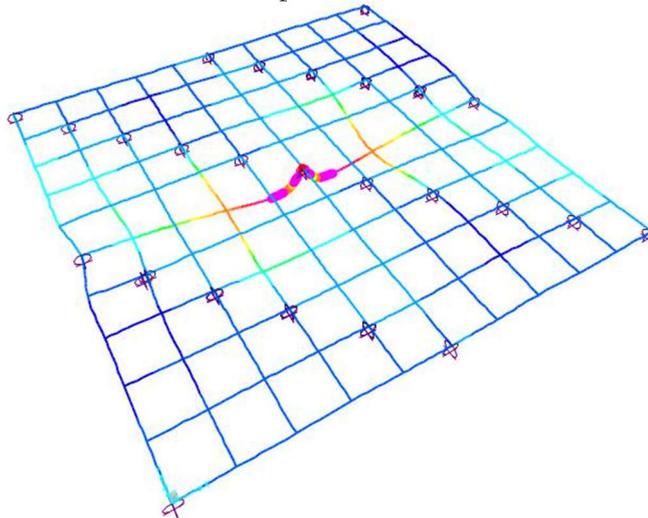
Assim, nova análise era realizada com a definição de maior número de etapas de simulação. Dentre as análises geradas, algumas composições demandaram até 650 etapas de simulação para total convergência. A necessidade de um maior número de etapas de simulação é característica inerente tanto da análise com não linearidade física (comportamento plástico) quanto geométrica (grandes deslocamentos). Quanto mais deformável a malha de armadura e

maior a região plastificada, mais demorada é a análise e mais instável em relação à convergência.

A análise completa de deformação permanente foi realizada para malhas com todos os pontos amarrados e com aplicação de carga do tipo 1 (1 x 100 N/cm), verificando as deformações plásticas em todas as espessuras de cobertura e em malhas formadas pelos diâmetros de 5,0, de 6,3 e de 8,0 mm.

Após análise de comportamento das malhas para a situação exposta, foram atribuídas configurações pontuais para aplicação de carga tipo 2, ou seja, em dois operários caminhando próximo ao espaçador de interesse ao mesmo tempo e considerando as malhas com a amarração proposta neste trabalho, de 50 cm (Figura 54).

Figura 54: Malha 20x20 cm, parcialmente amarrada, Ø 5 mm, com carga correspondente a dois operários.



(Fonte: elaborado pela autora *software* SAP2000, 2020).

Em função da dificuldade de convergência em configurações com malhas muito deformáveis e com grandes regiões plastificadas, as simulações computacionais começaram com as configurações mais estáveis, ou seja, malhas com amarração total e carga tipo 1 (um operário). Essas configurações são as mais favoráveis à malha, ou seja, à aceitação das deformações plásticas dentro dos limites de tolerância de execução do revestimento.

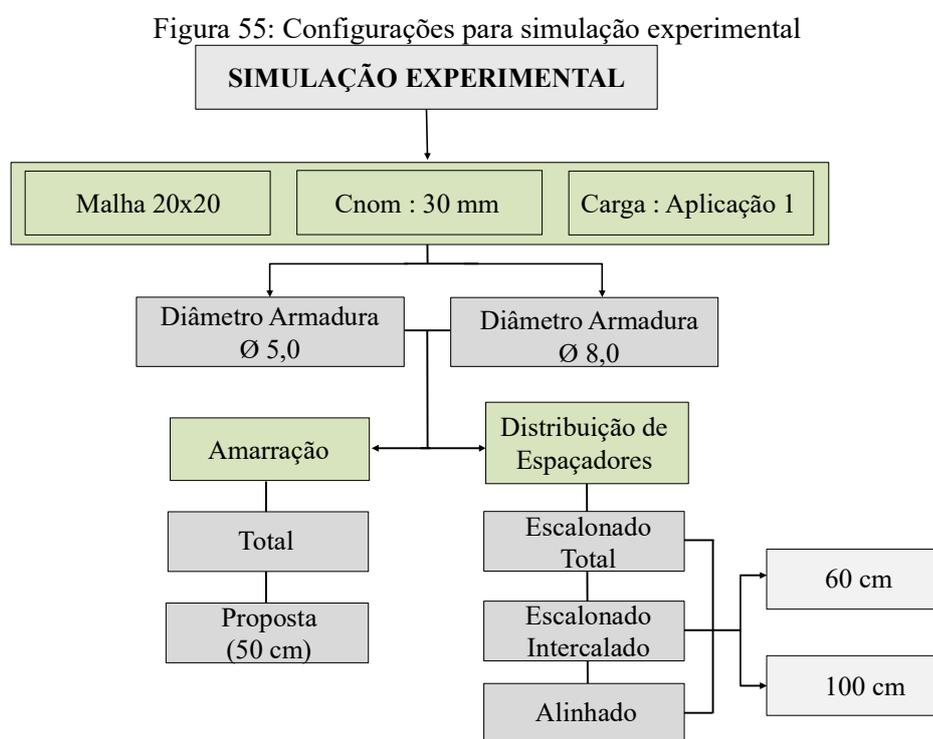
Todas as configurações com deformações plásticas excessivas foram excluídas das simulações posteriores, mais exigentes, com menor número de pontos de amarração e maior carga, reduzindo, desta forma, o número de situações com convergência mais instável e reduzindo consideravelmente o esforço computacional para completar todas as configurações.

5.3 SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL

A simulação experimental foi realizada como forma de fornecer informações adicionais, assim como aferir os resultados apresentados nas simulações computacionais e avaliar a variabilidade da deformação permanente das barras. Novas configurações foram consideradas, como amarração da malha e distribuição de espaçadores em padrão escalonado (Figura 55).

Deste modo, foram comparados os resultados com o trabalho de dissertação (MARAN, 2015) com simulações complementares para aferição das simulações computacionais. As malhas de armadura foram confeccionadas em laboratório, na mesma dimensão da simulação computacional (2,0 x 2,0 m), com afastamento de 20 cm entre as barras, representando a situação mais crítica, ou seja, a malha com menor rigidez.

O cobrimento utilizado para todas as configurações experimentais foi de 30 mm, por permitir maior deslocamento das barras durante o ensaio e ser o mesmo utilizado nos ensaios anteriores (MARAN, 2015).



(Fonte: elaborado pela autora, 2019).

Foram confeccionadas malhas com barras de aço com diâmetros de 5,0 mm e 8,0 mm, como representação do diâmetro mínimo e máximo utilizado na simulação computacional. Para comparação entre resultados computacionais e experimentais, as barras de aço utilizadas na

confeção das malhas de armadura foram submetidas ao ensaio de tração do aço para obtenção de tensão de escoamento, como mostra a Tabela 33.

Tabela 33: Tensão de Escoamento das barras utilizadas nos ensaios experimentais

Diâmetro (mm)	Comprimento Barra (mm)	Corpo de Prova	Tensão de Escoamento (MPa)
5,0	150	CP1	602,49
		CP2	599,95
CP1		500,34	
CP2		502,13	
8,0			

(Fonte: autora, 2019).

Como a tensão de escoamento foi bastante próxima aos resultados padronizados para aço CA-60 (600 MPa) e CA-50 (500 MPa), para fins comparativos, os valores foram mantidos conforme fabricante. A avaliação das deformações permanentes é utilizada como forma de criar um critério de aceitação dos deslocamentos gerados na simulação computacional e assim, avaliar as configurações de malha adequadas, associando a espessura de cobertura final com as tolerâncias de execução apontadas em norma.

A amarração inicial foi realizada em todos os nós da malha e após as primeiras configurações os nós foram soltos conforme prerrogativas já definidas de afastamento máximo de 50 cm. As malhas foram montadas para cada diâmetro e tiveram os pontos de amarração ligados por abraçadeiras de nylon. A escolha desse material foi realizada como medida de segurança para os operadores de ensaio, por não apresentar rebarbas ou extremidades cortantes ou perfurantes como o arame recozido, e por ser um material que facilita a troca das barras deformadas para uma nova simulação.

Menna Barreto (2014) apresenta em seus resultados, que os espaçadores plásticos do tipo cadeirinha geram valores de deformação elevados quando submetidos ao ensaio de carregamento proposto pela BS 7973-1 (2001).

A partir desse dado, os espaçadores utilizados na simulação experimental foram concebidos através de cortes de madeira do tipo *pinus*. Esta decisão reproduz os espaçadores de ensaio utilizados também no trabalho de mestrado (MARAN, 2015), já que os resultados para deformação se mostraram satisfatórios. Como a simulação experimental deste trabalho é somente com a malha de armadura, não envolvendo concreto, o uso de espaçadores em madeira é aplicável, e o objetivo do programa experimental é medir a deformação plástica da armadura, não sua combinação com a deformação do espaçador.

Desta forma, os espaçadores em madeira foram confeccionados para espessura de cobrimento de 30 mm e tolerância dimensional de ± 1 mm (CEB, 1990; BS 7973-1, 2001). A verificação da dimensão foi realizada em todos os espaçadores de ensaio através de medição com paquímetro digital, como mostra a Figura 56.

Figura 56: Espaçadores confeccionados para simulação experimental (30 ± 1 mm)

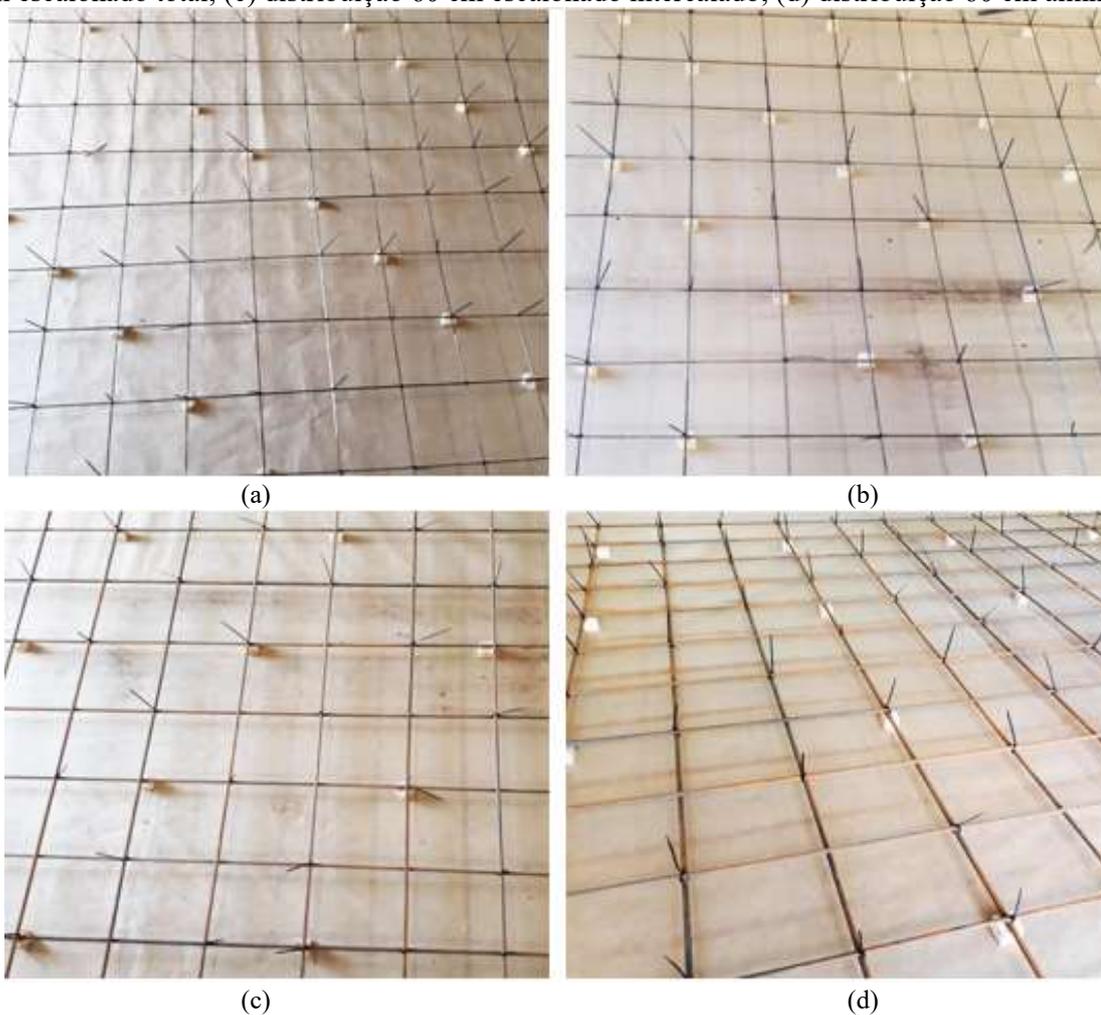


(Fonte: autora, 2019).

Independente do sentido da fibra, os espaçadores de madeira obtiveram resultados satisfatórios para carregamento de simulação de 100 kg (MARAN, 2015). Mesmo assim, a disposição dos espaçadores foi realizada com o contato entre barra de aço e dispositivo no sentido das fibras da madeira, por apresentar melhores resultados.

A distribuição de espaçadores foi definida em situação intermediária, de 60 cm, e máxima, de 100 cm, como forma de avaliar situações mais usadas na execução e evitar a grande quantidade de espaçadores na laje. Os espaçadores de ensaio foram distribuídos em padrão alinhado, escalonado total (todas as barras apoiadas) e escalonado intercalado (barras apoiadas parcialmente), como exemplificado no início deste capítulo e como mostra de maneira resumida na Figura 57.

Figura 57: Distribuição de espaçadores: (a) distribuição 100 cm escalonado total; (b) distribuição 60 cm escalonado total; (c) distribuição 60 cm escalonado intercalado; (d) distribuição 60 cm alinhado

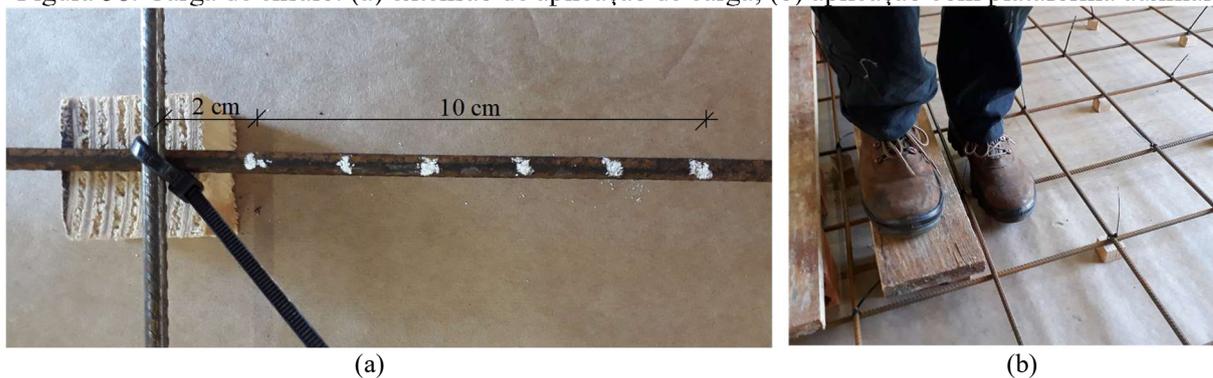


(Fonte: autora, 2019).

A barra inferior próxima ao espaçador de interesse recebeu a aplicação de carga e para melhor refinamento de resultados foram medidos pontos a cada 2 cm do espaçador, conforme definido na simulação computacional.

A partir desta referência, foram marcados 5 pontos para medição de cobrimento antes e após disposição da carga representando a extensão de 10 cm da superfície de aplicação (Figura 58 a). Ao lado do espaçador de interesse foi posicionada uma plataforma próxima do ponto de aplicação de carga para facilitar o acesso e possibilitar a aplicação de carga somente no ponto de interesse, reproduzindo a simulação computacional da forma mais fiel possível (Figura 58 b).

Figura 58: Carga de ensaio: (a) extensão de aplicação de carga; (b) aplicação com plataforma auxiliar



(Fonte: autora, 2019).

O espaçador de interesse para aplicação de carga foi escolhido como sendo um espaçador centralizado e com interseções amarradas, para todas as simulações experimentais.

A carga de 100 kg foi aplicada através da pisada de um operário com massa de 80 kg carregando 20 kg de peso extra, através de anilhas, como forma de correção de carga. Deste modo, a carga experimental representa a mesma carga utilizada na simulação computacional.

As barras que sofreram a aplicação de carga foram mensuradas por meio de paquímetro digital e depois do contato operário/armadura foram substituídas para nova simulação experimental. Para cada configuração de amarração de malha, distribuição de espaçadores e diâmetro de armadura, foram efetuadas três trocas das barras centrais inferiores. Desta forma, aplicação da carga e as medidas de deformação permanente foram realizadas em barras que não sofreram nenhum tipo de deformação prévia.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados das simulações computacionais e experimentais. As análises serviram como meio de visualizar o comportamento das malhas e elencar os fatores que influenciam na espessura de cobrimento durante a montagem e execução de lajes maciças em concreto armado através da deformação plástica das barras. Além disso, este capítulo busca fornecer parâmetros que auxiliem no controle de execução e na obtenção do cobrimento final dentro da tolerância normativa.

6.1 SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL E AFERIÇÃO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

As malhas simuladas experimentalmente através da aplicação de carga tiveram seis pontos mensurados na extensão de carregamento. Após aplicação de carga, a barra de ensaio foi substituída por outra barra, sem qualquer deformação, como forma de impedir variabilidade de medição. As trocas foram realizadas três vezes para cada configuração de simulação proposta.

Ao decorrer do ensaio, notou-se que as armaduras compostas por barras de diâmetro 5,0 mm entram em contato com a fôrma durante a aplicação da carga, independentemente de a malha estar totalmente amarrada ou com amarração parcial, a cada 50 cm. Esse comportamento demonstra a pouca rigidez da malha, pois além do contato com a fôrma, foi percebido que durante o carregamento parte da malha foi elevada, permitindo assim, o deslocamento do espaçador que muitas vezes não possui elemento de fixação e somente apoia a barra de armadura. A observação durante o ensaio condiz com os deslocamentos verificados nas simulações computacionais.

A malha de armadura composta por barras de aço com diâmetro de 8,0 mm não entrou em contato com a fôrma em nenhuma hipótese de aplicação de carga durante as simulações experimentais. Em alguns casos, foi observada a elevação da malha em alguns pontos do perímetro no mesmo alinhamento da barra carregada. Esse comportamento também foi apontado nas simulações computacionais.

Dentre os pontos mensurados foram selecionadas as maiores deformações permanentes como forma de análise crítica. Como o cobrimento mínimo indicado em norma (ABNT NBR 6118, 2014) é pontual, ou seja, qualquer parte da estrutura deve seguir a espessura indicada, trabalhar com médias e compensar valores não condiz com as prerrogativas normativas.

A maior deformação plástica apontada dentre os seis pontos mensurados na extensão de aplicação de carga, para malhas de diâmetro 5,0 e 8,0 mm, está registrada na Tabela 34, junto com as configurações propostas.

Tabela 34: Máxima deformação permanente (em mm) apontada em malhas simuladas experimentalmente

Amarração	Afastamento Espaçadores	Padrão de Distribuição					
		Alinhado		Escalonado Total		Escalonado Intercalado	
		Ø 5,0	Ø 8,0	Ø 5,0	Ø 8,0	Ø 5,0	Ø 8,0
Amarração Total	60 cm	7,12	0,60	8,03	0,76	7,7	0,82
		7,33	0,60	8,24	0,71	7,38	0,64
		7,23	0,72	8,01	0,85	6,68	0,58
	100 cm	6,78	0,38	6,32	0,85	6,74	0,97
		7,07	0,75	6,75	0,84	7,01	0,95
		6,99	0,70	6,98	0,99	6,35	0,97
Amarração Proposta (50 cm)	60 cm	6,50	0,71	6,74	0,89	6,54	0,86
		7,94	0,38	6,72	0,88	7,71	0,97
		6,62	0,91	7,48	0,85	8,08	0,81
	100 cm	6,32	0,71	6,89	0,74	6,12	0,98
		6,01	0,97	7,84	0,94	7,14	0,98
		6,29	0,96	7,18	0,94	6,36	0,90

Nota-se a discrepância entre as deformações geradas para malhas com barras de 5,0 e 8,0 mm, mesmo sob as mesmas condições de composição de malha, padrão de distribuição de espaçadores e amarração das barras de aço. Malhas compostas por barras de diâmetro 8,0 mm não sofrem deformações permanentes superiores a 1,0 mm, independentemente da configuração proposta.

As malhas compostas por barras de diâmetro 5,0 mm apresentaram deformações permanentes excessivas. Ressalta-se que para todas as configurações ensaiadas experimentalmente, algum ponto de espessura de cobrimento apresentou deformação acima de 5,0 mm somente com a aplicação de carga única, considerando o espaçador sem deformação e a fôrma rígida e nivelada. Desta forma, o cuidado com as malhas de armadura de diâmetro 5,0 mm deve ser maior nas especificações de cobrimento nominal e cobrimento mínimo com relação às indicações NBR 6118 (ABNT, 2014).

Quanto ao padrão de distribuição, a deformação permanente da malha obteve resultados aproximados entre as três formas de distribuição propostas. Para diâmetro de 5,0 mm, onde a medida de deformação fica mais evidente, o padrão escalonado total com distribuição a cada 60 cm e malha com todos os pontos amarrados, apresentou deformações mais elevadas, na faixa de 8,0 mm.

Para análise estatística, não foram consideradas barras com deformações plásticas em até 1,0 mm, em função da tolerância de ensaio e por possível discrepância de resultados devido ao fator de escala entre resultados. Dentro desta condição, as barras de 8,0 mm não foram analisadas estatisticamente.

Os resultados de cobertura medidos para as lajes dentro da condição proposta, de diâmetro 5,0 mm, foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA), considerando um nível de significância de 5%, conforme mostrado na Tabela 35. A análise considerou as variáveis controladas de amarração de barras, distribuição de espaçadores e padrão de distribuição.

Tabela 35: Análise de variância (ANOVA) para comparação entre variáveis de malha de armadura com barras de diâmetro 5,0 mm em simulação experimental

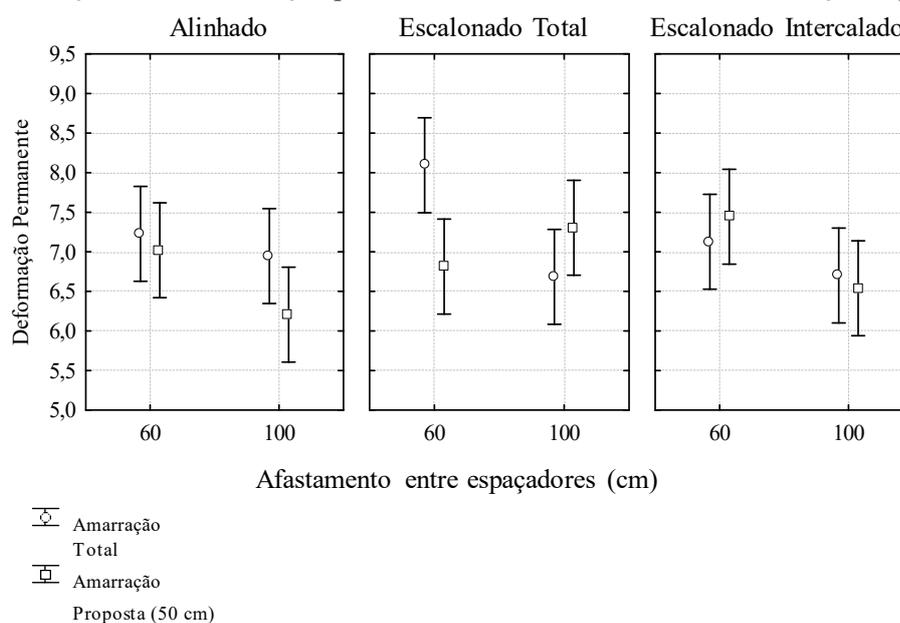
	SQ	GDL	SQF	F	P	Sig.
Amarração da malha (A)	0,526	1	0,526	2,077	16,24%	NS
Afastamento dos espaçadores (B)	2,794	1	2,794	11,044	0,28%	S
Padrão de distribuição (C)	0,893	2	0,446	1,764	19,28%	NS
A x B	0,198	1	0,198	0,783	38,51%	NS
A x C	0,492	2	0,246	0,971	39,29%	NS
B x C	0,064	2	0,032	0,126	88,26%	NS
A x B x C	2,893	2	1,447	5,717	0,93%	S
Erro	6,073	24	0,253			

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F (calc): valor calculado de \bar{F} ; P: nível de significância; Se $P < 5\%$ = efeito significativo.

A distribuição de espaçadores mais uma vez mostrou-se uma variável significativa nas deformações plásticas e conseqüentemente no cobertura final, assim como disposto em trabalhos como Palm (2017), Maran *et al.* (2015) e no estudo preliminar descrito no Capítulo 4 deste trabalho.

O comportamento das malhas de armadura de diâmetro 5,0 considerando as variáveis propostas e a análise de deformação plástica está exposto na Figura 59.

Figura 59: Relação entre deformação plástica e variáveis controladas de simulação experimental



(Fonte: elaborado pela autora, 2020).

Para amarração proposta de 50 cm de distância entre pontos, a malha composta por barras de diâmetro 8,0 mm indicou a ativação das rótulas plásticas em análise não-linear plástica. Os resultados da simulação computacional comparados aos resultados da simulação experimental para este caso são semelhantes, ficando abaixo de 1,0 mm.

Comparando os resultados obtidos por Maran (2015) e as deformações permanentes das simulações experimentais deste trabalho, é possível observar o comportamento semelhante das malhas de armadura, como mostra a Tabela 36.

Tabela 36: Comparação entre deformações permanentes em simulações experimentais de Maran (2015) e os realizados nesta tese

Amarração	Afastamento espaçadores (cm)	Padrão de Distribuição	Alinhado			
		Diâmetro da armadura	Ø 5,0		Ø 8,0	
		Análise	Tese	Maran (2015)	Tese	Maran (2015)
Amarração Total	60	Média	7,23	4,75	0,64	0,96
		Máximo	7,33	6,05	0,72	1,39
		CV	0,01	0,26	0,11	0,51
	100	Média	6,95	3,79	0,61	1,14
		Máximo	7,07	5,69	0,75	1,32
		CV	0,02	0,44	0,33	0,14

O ensaio experimental resultou em variabilidade de medição, devido ao grau de dificuldade de execução, uma vez que a aplicação de carga não é realizado de forma mecanizada. Apesar do controle proposto, os resultados variáveis podem ser em função da forma da aplicação da carga, embora o operador seja o mesmo, a pisada pode sofrer alterações ao longo do ensaio.

Uma melhoria dos resultados através da experiência adquirida pelos ensaios realizados em 2015 foi notada. As medições atuais geradas na simulação experimental apresentam uma menor dispersão de resultados, sendo utilizadas para a calibração das simulações computacionais.

Como forma de aferir os resultados, o comparativo entre as simulações experimentais e computacionais foi realizado a partir das maiores deformações permanentes apresentadas para cada barra experimental, o a maior diferença entre pontos mensurados na simulação computacional.

As malhas compostas por barras de aço de diâmetro 8,0 mm apresentaram deformações permanentes inferiores a 1,0 mm experimentalmente. Para a simulação computacional, as deformação plásticas apontam este mesmo comportamento, estando na faixa entre 0 e 1,0 mm. Entretanto, apesar da inserção das rótulas plásticas nas simulações computacionais, notou-se que essas não foram acionadas após a aplicação da carga para as malhas com todas as interseções amarradas. Para esse caso, o resultado de deformação plástica foi igual a zero, com exceção do padrão de distribuição alinhado com espaçadores a cada 100 cm.

As comparações entre as composições propostas nas simulações experimentais e aplicadas nas simulações computacionais para aferição estão apresentadas na Tabela 37, mostrando a média, o valor máximo de deformação e o coeficiente de variação (CV). Os coeficientes de variação maiores, apontando a heterogeneidade dos dados, estão relacionados aos deslocamentos pequenos, para malhas com diâmetro 8,0 mm, onde todos os deslocamentos são menores que 1,0 mm.

Tabela 37: Comparativo de deformações plásticas (mm) para simulação experimental e computacional

Amarração	Afastamento entre espaçadores (cm)	Padrão de distribuição					
		Alinhado					
		Ø 5,0			Ø 8,0		
		Deformação Experimental	Deformação Computacional	Deformação Experimental	Deformação Computacional	Deformação Experimental	Deformação Computacional
Amarração Total	60	Média	7,23	7,98	Média	0,64	0
		Máximo	7,33		Máximo	0,72	
		CV	0,01		CV	0,11	
	100	Média	6,95	7,91	Média	0,61	0
		Máximo	7,07		Máximo	0,75	
		CV	0,02		CV	0,33	
Amarração Proposta (50 cm)	60	Média	7,02	7,34	Média	0,67	0,58
		Máximo	7,94		Máximo	0,91	
		CV	0,11		CV	0,40	
	100	Média	6,21	7,60	Média	0,88	0,28
		Máximo	6,32		Máximo	0,97	
		CV	0,03		CV	0,17	

(continua)

Tabela 38: Comparativo de deformações plásticas (mm) para simulação experimental e computacional (continuação)

Amarração	Afastamento entre espaçadores (cm)	Padrão de distribuição					
		Escalonado total					
		Ø 5,0			Ø 8,0		
		Deformação Experimental		Deformação Computacional	Deformação Experimental		Deformação Computacional
Amarração Total	60	Média	8,09	8,64	Média	0,77	0
		Máximo	8,24		Máximo	0,85	
		CV	0,02		CV	0,09	
	100	Média	6,68	7,97	Média	0,89	0
		Máximo	6,98		Máximo	0,99	
		CV	0,05		CV	0,09	
Amarração Proposta (50 cm)	60	Média	6,98	8,46	Média	0,87	0,47
		Máximo	7,48		Máximo	0,89	
		CV	0,06		CV	0,02	
	100	Média	7,30	8,34	Média	0,87	0,33
		Máximo	7,84		Máximo	0,94	
		CV	0,07		CV	0,13	
Escalonado intercalado							
Amarração Total	60	Média	7,25	7,54	Média	0,68	0
		Máximo	7,38		Máximo	0,82	
		CV	0,07		CV	0,18	
	100	Média	6,70	7,12	Média	0,96	0
		Máximo	7,01		Máximo	0,97	
		CV	0,05		CV	0,01	
Amarração Proposta (50 cm)	60	Média	7,44	8,37	Média	0,88	0,54
		Máximo	8,08		Máximo	0,97	
		CV	0,11		CV	0,09	
	100	Média	6,54	7,37	Média	0,95	0,34
		Máximo	7,14		Máximo	0,98	
		CV	0,08		CV	0,05	

Os resultados para a simulação experimental, quando comparados aos da simulação computacional, também são bastante próximos para malhas compostas por diâmetro 5,0 mm. Além disso, a simulação computacional gerou deformações sempre superiores à média experimental para esse diâmetro de armadura.

Analisando as deformações permanentes experimentais, a maior diferença entre simulação computacional e média experimental foi de 1,48 mm para o padrão de distribuição escalonado total com afastamento a cada 60 cm e malha com amarração proposta a cada 50 cm. Cabe salientar que os resultados para amarração de 50 cm apresentaram maior variabilidade, com o coeficiente de variação mais elevado quando comparado aos resultados de deformação plástica para malha com amarração total. Ao considerar os valores máximos de deformação permanente em simulação experimental, a maior diferença entre simulação computacional e experimental é de 1,27 mm, para padrão de distribuição alinhado a cada 100 cm e com pontos de amarração na malha a cada 50 cm.

Ainda assim, considera-se que a previsão da deformação permanente obtida com o *software SAP 2000* se mostrou adequada para as malhas utilizadas, avaliando o contato com a fôrma e o levantamento da média no ponto de aplicação do espaçador.

6.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

As simulações computacionais foram realizadas para cada carregamento utilizando análise não linear física e geométrica, com a inserção de rótulas plásticas e consideração de grandes deslocamentos com o algoritmo p-delta, e utilizando apenas não linearidade geométrica. A malha do modelo computacional foi refinada no entorno do espaçador de interesse, de forma a melhorar a precisão da avaliação dos deslocamentos nessa região. O *software* utilizado para a simulação demonstrou capacidade de previsão para as deformações permanentes provenientes da carga de execução dos operários avaliadas.

6.2.1 Definição dos níveis de controle para deformação plástica das armaduras

Associado à verificação do comportamento das malhas, buscou-se discutir acerca das deformações plásticas da armadura em comparação com as tolerâncias de execução no cobrimento permitidas na NBR 6118 (ABNT, 2014).

Como diretriz deste trabalho, um controle de execução deve considerar critérios de aceitação para fontes de variação no cobrimento da armadura. Sendo assim, o somatório de tolerâncias de execução de diversos componentes deve ser igualado aos valores normativos de 10 mm (para situações normais de execução) e 5 mm (controle rigoroso de execução), se as especificações tabeladas da NBR 6118 (ABNT, 2014) forem tomadas como base. A norma também recomenda que a tolerância de execução pode ser maior que 10 mm, caso a tabela indicativa de cobrimento nominal não seja utilizada.

A partir dos dados encontrados na bibliografia (OLIVEIRA, 2018; PALM, 2017, MARAN, 2015, EHE-08, 2008, BS 7973-1, 2001, entre outros), quanto a perda de cobrimento, tomou-se como base três critérios que afetam de forma mais extensiva o cobrimento final da armadura. Foram considerados como fatores principais sobre a obtenção do cobrimento: o sistema de fôrmas, o espaçador e a deformação plástica da armadura frente as cargas de execução.

Para o sistema de fôrmas, a NBR 14931 (ABNT, 2004) especifica uma tolerância de desnivelamento mínimo de 5 mm, podendo ser considerados desnivelamentos maiores para vãos superiores a 5 metros, até um máximo de 10 mm. Foi considerado na discussão que é feita

neste trabalho que o sistema de fôrmas é responsável por 5 mm da tolerância de execução, para tolerâncias de execução de 10 mm ou superiores.

A BS 7973-1 (2001) indica como critério de desempenho dos espaçadores que a deformação dos mesmos sob cargas de serviço deve ser igual ou inferior a 1 mm. Esta limitação foi definida como outra parcela de possível redução de cobertura durante a execução do elemento estrutural.

Por fim, o último fator escolhido como critério de aceitação foi a deformação plástica da armadura, já que esse item envolve diversos aspectos que influenciam no resultado final de cobertura, como explanado no item 3.3. Diante da escolha dos sistemas selecionados como relevantes, a tolerância de execução do cobertura adotado neste trabalho foi definida pela equação 4:

$$\Delta_c = \Delta_f + \Delta_e + \Delta_a \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

Δ_c : Tolerância de execução

Δ_f : Tolerância de desnivelamento do sistema de fôrmas ($\leq 5,0$ mm)

Δ_e : Tolerância de deformação do espaçador ($\leq 1,0$ mm)

Δ_a : Tolerância de deformação plástica da armadura

Considerou-se inicialmente a tolerância de execução para situações correntes em obra para definição dos níveis de controle, estendendo os níveis para os demais critérios (rigoroso e não controlado). As limitações quanto ao desnivelamento da fôrma e da deformação do espaçador foram consideradas com base em indicações normativas encontradas, enquanto a limitação da deformação plástica foi estabelecida como o valor complementar aos dois anteriores em relação à tolerância de execução preconizada pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

A definição dos níveis de controle partiu da tolerância de execução para obras correntes proposta pela NBR 6118 (ABNT, 2014) de 10 mm. Após esta definição, os valores de tolerância de deformação permanente, que é foco deste trabalho, foram aplicados para outros níveis de controle.

Os níveis de controle para a deformação plástica apresentada nas simulações computacionais seguiram o exposto na Tabela 39 e foram mapeados a partir das cores em destaque.

Tabela 39: Níveis de controle para tolerância de deformação plástica da armadura

Desnívelamento do sistema de fôrmas (Δ_f)	Deformação espaçador (Δ_e)	Deformação plástica da armadura (Δ_a)	Tolerância de execução total (Δ_c)	Controle
2,0 mm	1,0 mm	$\Delta_a \leq 2,0$ mm	5,0 mm	Alto
5,0 mm	1,0 mm	$2,0$ mm $< \Delta_a \leq 4,0$ mm	10,0 mm	Médio
5,0 mm	1,0 mm	$4,0$ mm $< \Delta_a \leq 9,0$ mm	15,0 mm	Baixo
-	-	$\Delta_a > 9,0$ mm	-	Crítico

Como em situações normais de execução a tolerância no cobrimento é de 10,0 mm (ABNT NBR 6118, 2014), e o sistema de fôrmas e o espaçador somam 6,0 mm para desnívelamento e deformação, a deformação plástica da armadura está limitada a um máximo de 4,0 mm. A partir desta designação os níveis de controle foram divididos entre nível de controle alto, incluindo atendimento para qualquer execução, normal, baixo e crítico (sem controle). Ao indicar o controle alto de deformação plástica ($\Delta_a = 2,0$ mm), a tolerância remanescente de 3,0 mm inclui o sistema de fôrmas e o espaçador.

A maior tolerância de execução proposta foi dada a partir da pesquisa das especificações normativas internacionais, e assim, o valor de 15 mm foi escolhido por ser o maior apresentado, constando na DIN 1045-1 (2008).

O nível crítico foi definido a partir do uso da máxima tolerância encontrada na revisão bibliográfica (DIN 1045-1, 2008), porém descontando os valores de deformação apresentados pelos outros sistemas, sendo que o sistema de fôrmas consome 5,0 mm e o espaçador 1,0 mm da tolerância total. Assim, as deformações plásticas apontam um nível crítico de controle das armaduras quando o valor é superior a 9,0 mm.

Cabe salientar que estes valores foram definidos para deformação permanente das barras de aço, e toda a análise aqui descrita foca nesta tolerância. Como exemplo, pode-se ter um controle rigoroso de execução para outras etapas, como o sistema de fôrmas, e ainda assim possuir um nível de controle crítico para deformação plástica das armaduras. Se a decisão for por utilizar a tolerância total de execução de 5,0 mm em função de admitir um controle rigoroso de execução, necessariamente será imposto uma tolerância para deformação plástica da armadura no nível rigoroso, mas a recíproca não é verdadeira. Usar tolerância de deformação plástica das armaduras em um nível rigoroso não implica em uma tolerância de execução menor do que a usualmente indicada pela norma (ABNT NBR 6118, 2014), de 10,0 mm.

6.2.2 Mapeamento do comportamento das malhas de armadura

Os pontos com maior deformação no entorno do espaçador de interesse foram tabelados para comparação entre os diferentes padrões de distribuição entre espaçadores, as espessuras de cobertura e as aberturas das malhas. Desta forma, foi possível criar um cenário do comportamento da malha com mesmo diâmetro, mas em diferentes composições.

Em um panorama geral, malhas totalmente amarradas e com aplicação de carga correspondente a um operário, resultaram em deformações plásticas menores. Seguindo desta composição, têm-se a ordem crescente da deformação plástica para malhas totalmente amarradas com carga de dois operários, malhas parcialmente amarradas com carga de um operário e malhas parcialmente amarradas com carga de dois operários, sendo a última a mais crítica para deformação plástica. Para um mesmo padrão de carga e amarração, quanto menor o diâmetro da armadura, quanto mais aberta é a malha e quanto maior é a espessura de cobertura nominal (altura do espaçador), maior a deformação plástica da armadura. Em relação à espessura de cobertura nominal, menores alturas de espaçadores fazem com que a armadura deformada entre em contato com a fôrma, limitando os deslocamentos totais e a deformação plástica permanente.

Em termos de esforço computacional, quanto maior a deformação da armadura e mais extensa a região plastificada, maior o número de iterações para a solução e mais difícil é a convergência do algoritmo de cálculo, exigindo tempos consideravelmente maiores de solução. A fim de otimizar a obtenção das soluções, nem todas as configurações foram simuladas computacionalmente. As simulações foram feitas das configurações de carga, amarração, diâmetro de barra, abertura da malha e altura do espaçador menos exigentes em termos de deformações plásticas para as mais exigentes. Se para as condições menos exigentes os limites de deformação plástica não eram atendidos, o mesmo aconteceria para as situações mais exigentes, dispensando sua simulação computacional.

Apesar das simulações considerarem configurações com diferentes aberturas de malha em cada direção, como forma de parametrizar as especificações de distribuição de espaçadores (padrão e afastamento), as malhas foram divididas em aberturas máximas para sintetizar as prescrições de uso. Sendo assim, a malha 10x10 cm ficou definida como malha de abertura máxima de 10 cm, enquanto malhas 10x15 e 15x15 cm passam a ser malhas com abertura máxima de 15 cm. Por fim, as malhas 10x20, 15x20 e 20x20 cm são fixadas como malhas de abertura máxima de

20 cm. Essas definições são indicadas para análise de conformidade quanto aos níveis de controle de deformação plástica.

6.2.2.1 Malhas compostas por diâmetro 5,0 mm

Analisando o deslocamento livre da armadura, sem superfície de restrição (fôrma), quanto maior o afastamento entre os espaçadores, maior o valor de deformação. Para fins de ilustração, o padrão de distribuição alinhado na malha com abertura de 20 cm nas duas direções e formada por barras de diâmetro 5,0 mm, o deslocamento livre foi de 76,4 mm pra espaçadores a cada 100 cm, enquanto que para distribuição a cada 40 cm, o deslocamento foi de 39,9 mm. Esses resultados foram gerados a partir das simulações computacionais realizadas para a malha de armadura com todas as interseções amarradas e com aplicação de carga correspondente a um operário. Tais valores são irreais, pois a fôrma oferece restrição a tais deslocamentos. O efeito da fôrma foi considerado nas simulações computacionais apresentadas a seguir, limitando a deformação total e, conseqüentemente, a deformação plástica.

A Tabela 40 mostra o comportamento das malhas de armadura compostas com barras de diâmetro 5,0 mm, simuladas considerando a malha totalmente amarrada e com a aplicação de carga do tipo 1, ou seja, um operário caminhando sobre a armadura. Essa configuração representa a hipótese menos desfavorável para análise de deformação permanente, uma vez que a malha se torna mais rígida e com menor propensão de sofrer deformações excessivas. No entanto, a simulação computacional iniciou por esta configuração, por ser a que apresenta a convergência mais rápida e, conseqüentemente, tempos de solução menores. O mapeamento das deformações plásticas foi gerado a partir dos níveis de controle definidos na Tabela 39.

Os valores de deformação plástica repetidos para a mesma configuração indicam que a malha não entra em contato com a fôrma quando ocorre aplicação da carga. Para esta situação, a deformação permanente é a mesma, independente da espessura de cobertura, sendo dependente do afastamento entre espaçadores, da amarração e do diâmetro da armadura.

As deformações plásticas para malhas compostas por diâmetro 5,0 mm são, para as configurações mais deformáveis, diferentes para cada espessura de cobertura analisada. Isso ocorre devido a menor rigidez do conjunto e, conseqüentemente, maior deslocamento livre. Desta forma, independente do cobertura analisado, a aplicação da carga gerou contato da barra de armadura com a fôrma, e esse é o fenômeno que faz com que as deformações plásticas sejam diferentes.

Tabela 40: Deformações plásticas (mm) para malhas Ø 5,0 mm com amarração total e carga tipo 1

Afastamento entre espaçadores (cm)	Cobrimento (mm)	Escalonado Total						
		10x10	10x15	10x20	15x15	15x20	20x20	
40	20	0,5	2,1	3,6	4,6	5,5	5,8	
	25	0,5	2,1	3,6	4,6	7,1	7,5	
	30	0,5	2,1	3,6	4,6	7,1	9,0	
	35	0,5	2,1	3,6	4,6	7,1	11,2	
	45	0,5	2,1	3,6	4,6	7,1	11,2	
60	20	0,5	2,4	4,0	4,4	5,4	5,9	
	25	0,5	2,4	4,0	5,2	6,7	7,5	
	30	0,5	2,4	4,0	5,2	7,0	8,6	
	35	0,5	2,4	4,0	5,2	7,0	11,3	
	45	0,5	2,4	4,0	5,2	7,0	11,3	
80	20	0,5	2,4	3,6	4,1	5,0	5,2	
	25	0,5	2,4	3,6	4,6	6,3	7,2	
	30	0,5	2,4	3,6	5,4	7,2	8,4	
	35	0,5	2,4	3,6	5,4	7,2	10,3	
	45	0,5	2,4	3,6	5,4	7,2	11,4	
100	20	0,6	2,4	3,7	4,3	4,6	5,1	
	25	0,6	2,4	3,7	4,9	6,2	6,5	
	30	0,6	2,4	3,7	5,5	7,1	8,0	
	35	0,6	2,4	3,7	5,5	7,3	9,6	
	45	0,6	2,4	3,7	5,5	7,3	11,3	
Escalonado intercalado								
40	20	0,8	COMPOSIÇÃO IGUAL A DISTRIBUIÇÃO ALINHADA 40 cm					
	25	0,8						
	30	0,8						
	35	0,8						
	45	0,8						
60	20	1,0	2,8	3,2	3,9	4,2	4,8	
	25	1,0	2,8	3,9	5,0	5,5	6,5	
	30	1,0	2,8	3,9	5,7	6,4	7,5	
	35	1,0	2,8	3,9	5,7	7,2	10,4	
	45	1,0	2,8	3,9	5,7	7,2	11,0	
80	20	1,1	3,0	3,3	4,3	4,1	4,7	
	25	1,1	3,0	3,9	5,7	5,4	5,9	
	30	1,1	3,0	3,9	6,3	6,7	7,3	
	35	1,1	3,0	3,9	6,4	7,2	10,0	
	45	1,1	3,0	3,9	6,4	7,2	10,6	
100	20	1,1	2,4	3,2	3,3	3,9	4,5	
	25	1,2	3,0	4,1	5,2	5,3	5,6	
	30	1,2	3,0	4,2	5,4	5,5	7,1	
	35	1,2	3,0	4,2	6,5	7,6	10,3	
	45	1,2	3,0	4,2	6,5	7,7	11,5	

(continua)

Tabela 40: Deformações plásticas (mm) para malhas Ø 5,0 mm com amarração total e carga tipo 1 (continuação)

Afastamento entre espaçadores (cm)	Cobrimento (mm)	Alinhado					
		10x10	10x15	10x20	15x15	15x20	20x20
40	20	1,2	2,8	3,3	4,3	5,1	4,7
	25	1,2	2,8	3,9	6,2	6,3	7,6
	30	1,2	2,8	3,9	6,2	7,7	8,8
	35	1,2	2,8	3,9	6,2	8,0	9,7
	45	1,2	2,8	3,9	6,2	8,0	12,4
60	20	1,3	3,1	2,9	4,3	4,3	4,7
	25	1,5	3,3	4,1	5,9	6,3	6,0
	30	1,6	3,6	4,2	7,0	7,0	8,0
	35	1,6	3,6	4,2	7,7	8,0	9,1
	45	1,6	3,6	4,2	7,7	9,6	12,3
80	20	1,6	3,1	3,5	3,0	3,5	3,7
	25	1,6	3,7	4,2	4,7	6,1	5,1
	30	1,9	3,9	4,8	6,2	7,0	8,0
	35	2,0	4,0	4,9	7,1	7,9	9,1
	45	2,0	4,0	4,9	7,5	9,6	12,2
100	20	1,5	3,1	3,3	3,1	3,3	3,5
	25	1,7	3,8	3,9	5,7	6,0	4,9
	30	2,1	4,0	4,6	6,5	6,6	7,9
	35	2,2	4,1	4,9	7,5	7,2	9,0
	45	2,3	4,2	5,1	7,8	9,6	12,0

	Nível de controle alto
	Nível de controle médio
	Nível de controle baixo
	Sem controle

Destaca-se que a malha com melhores resultados tem afastamento de 10 cm entre barras nas duas direções. Esse comportamento foi apontado por se tratar de uma armadura com maior rigidez, devido à proximidade entre os elementos. Sob as mesmas condições, malhas com menor afastamento entre as barras tendem a apresentar menores deformações plásticas da armadura sob aplicação de carregamento de execução.

Na análise de comportamento das malhas também foi possível observar que quanto maior o espaço livre entre a armadura e a fôrma, maior será a deformação plástica da barra. Este apontamento é claramente notado quando são comparados valores de deformação permanente para a espessura de cobrimento entre 20 mm e 45 mm sob mesma condição de simulação.

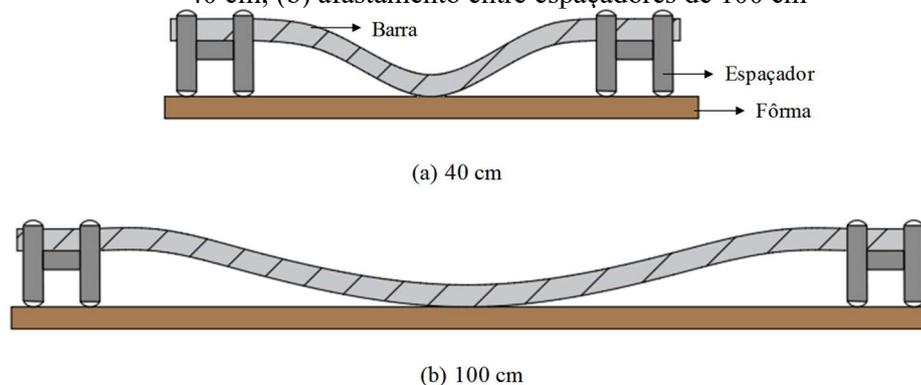
Ainda que exista valores semelhantes para as diversas distribuições, as deformações plásticas para o padrão escalonado total foram mais baixas. Esse resultado pode ser associado à densidade de espaçadores utilizados. Como exemplo, para malha com abertura 20x20 cm e afastamento nominal de 100 cm, o padrão de distribuição escalonado total possui densidade

maior de espaçadores (6,3 espaçadores/m²), seguido pelo padrão de distribuição escalonado intercalado (3,5 espaçadores/m²) e alinhado (2,3 espaçadores/m²), respectivamente. Ao possuir deformação plástica dentro do mesmo nível de controle, é preferível o uso de padrão de distribuição com menor densidade de espaçadores/m², sendo uma opção economicamente vantajosa além de evitar problemas quanto à durabilidade da estrutura.

A restrição da fôrma altera consideravelmente a deformação plástica, uma vez que limita o deslocamento total da armadura ao valor da altura do espaçador. Assim, um afastamento entre espaçadores menor pode ser mais crítico, pois um mesmo deslocamento total representa maior curvatura nas barras.

Quando ocorre a restrição imposta pela fôrma, o afastamento menor entre espaçadores, como 40 cm, resultou em deformações permanentes maiores. Como mostrado na Figura 60, ao aplicar o carregamento com uma mesma altura de espaçador, maior é a curvatura da barra ou o momento fletor. Deformações mais elevadas para afastamento entre espaçadores menor também foram apontadas em simulações experimentais (MARAN, 2015).

Figura 60: Curvatura de barra gerada pela aplicação de carga (a) afastamento entre espaçadores de 40 cm; (b) afastamento entre espaçadores de 100 cm



(Fonte: elaborado pela autora, 2020).

As deformações plásticas foram compiladas para comparação entre resultados para mesmas composições, porém com diferentes diâmetros. Como forma de apresentar a influência do diâmetro da armadura, a Tabela 41 mostra as deformações plásticas da malha 15x20 cm, amarrada em todos os nós e com aplicação de carga de um operário, para padrão de distribuição escalonado total e afastamento entre espaçadores de 100 cm.

Tabela 41: Comparativo entre deformações plásticas para diferentes diâmetros, malhas totalmente amarradas e carregamento do tipo 1

Escalonado total				
Afastamento entre espaçadores (cm)	Cobrimento (mm)	Ø 5,0	Ø 6,3	Ø 8,0
100	20	4,6	2,3	0
	25	6,2	2,3	0
	30	7,1	2,3	0
	35	7,3	2,3	0
	45	7,3	2,3	0

	Nível de controle alto
	Nível de controle médio
	Nível de controle baixo

Todas as malhas analisadas seguiram o mesmo comportamento indicado na Tabela 41, ou seja, quanto maior o diâmetro da armadura para a mesma configuração, menor a deformação plástica, independente do padrão de distribuição empregado ou afastamento entre espaçadores.

As malhas formadas por barras de diâmetro 5,0 mm constituíram as configurações mais críticas, registrando deformações permanentes que atendem na maioria, somente o nível de controle baixo ou crítico (sem controle).

Com objetivo de propor uma diretriz para uso dos espaçadores, em função das malhas e da deformação plástica, foram realizadas simulações parciais para certas configurações, a fim de avaliar o atendimento aos níveis de controle. Quando a análise demandou um número maior de simulações, os resultados foram apresentados em tabelas. Para simulações pontuais, ou seja, com poucos resultados onde há possibilidade de prever o comportamento da malha, os valores de deformação plástica foram descritos ao longo do texto.

Dentre 335 registros de deformação plástica indicados na Tabela 39, somente 17% das medidas atendem o nível de controle alto, que poderia estar associado ao critério de execução rigorosa da NBR 6118 (ABNT, 2014), ou seja, indicação da tolerância total de execução em 5,0 mm. Neste caso, apenas 57 configurações sofreriam uma deformação plástica aceitável, abaixo de 2,0 mm, lembrando que esta é a situação menos desfavorável de deformação plástica.

Mesmo que os resultados da Tabela 40 correspondam as configurações menos exigentes para deformação plástica, os valores obtidos permitem afirmar que não é possível utilizar malhas com abertura superior a 10 cm, com o diâmetro de 5,0 mm, para nível de controle alto ($\Delta_a \leq 2,0$ mm). Se para esta configuração as aberturas maiores de malha não atenderam ao critério, também não atenderão para qualquer outra configuração mais desfavorável.

A única malha que atendeu o nível de controle alto foi a de abertura máxima de 10 cm, a qual foi submetida a uma nova simulação com carga mais crítica, correspondente a dois operários caminhando sobre a malha, a fim de verificar se o nível de controle é mantido. Para isso, foram selecionadas as configurações que resultaram em deformações plásticas menores. Se estas configurações não atenderem o critério na nova simulação, nenhuma das configurações mais exigentes atenderá. As armaduras com padrão de distribuição escalonado total, afastamento entre espaçadores de 40 e 100 cm e com amarração total foram simuladas com a carga 2 (2 operários) e têm os resultados apresentados na Tabela 42.

Tabela 42: Deformações plásticas (mm) para malha 10x10 cm com Ø 5,0 mm, amarração total e carga 2, para análise de configuração com $\Delta_a \leq 2,0$ mm em padrão escalonado total

Cobrimento (mm)	Afastamento entre espaçadores (cm)	
	40 cm	100 cm
20	2,5	3,7
25	2,5	3,7
30	2,5	3,7
35	2,5	3,7
45	2,5	3,7
Nível de controle médio		

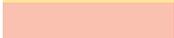
Frente à nova imposição de carga, nenhuma configuração de malha composta com barras de diâmetro 5,0 mm atendeu ao nível de controle alto, mesmo sem os resultados das simulações com amarração parcial.

Para os resultados dispostos na Tabela 40, 47% dos resultados de deformação plástica para malhas com diâmetro 5,0 mm, amarração total e carga correspondente a um operário, atenderam ao nível médio de controle, considerando o mapeamento em verde também neste percentual. Como forma de verificar se as configurações que atenderam ao nível médio permanecem com o mesmo comportamento frente à aplicação de carga mais crítica, foram realizadas novas simulações.

As configurações que resultaram em menores valores na Tabela 40, para nível médio, foram novamente simuladas para malha de diâmetro 5,0 mm, com amarração total e aplicação de carga correspondente a dois operários. A Tabela 43 apresenta as deformações plásticas para malha 10x15 cm e padrão de distribuição escalonado total.

Tabela 43: Deformações plásticas (mm) para malhas 10x15 cm com Ø 5,0 mm, amarração total e carga 2, em padrão escalonado total, para análise de configurações com $2,0 < \Delta a \leq 4,0$ mm

Cobrimto (mm)	Afastamento entre espaçadores (cm)			
	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm
20	3,1	4,74	5,3	5,6
25	3,1	4,74	5,3	5,6
35	3,1	4,74	5,3	5,6
45	3,1	4,74	5,3	5,6

 Nível de controle médio
 Nível de controle baixo

Para situação mais favorável (distribuição escalonada total), somente o afastamento entre espaçadores de até 40 cm atendeu o nível de controle analisado. Nesta condição, para o nível médio de controle ($2,0 < \Delta a \leq 4,0$ mm), o padrão de distribuição demanda uma densidade de espaçadores de 39,5 espaçadores/m².

Como representação ilustrativa, a Figura 27 permite observar a aplicação de altas densidades dos espaçadores na montagem das armaduras. No estudo preliminar, a distribuição a cada 30 cm demandou uma densidade de 34 espaçadores/m² e teve certa resistência da mão de obra ao executar tal padrão.

Destaca-se que o uso exagerado dos espaçadores pode facilitar o ingresso de agentes agressivos na estrutura, além de criar linhas de fraqueza. Sendo assim, o estudo mais aprofundado da densidade máxima de espaçadores nas lajes que pode ser utilizada, sem prejudicar a durabilidade, é importante para a indicação definitiva do uso de espaçadores com embasamento técnico. Enquanto isso, as configurações que resultaram em um consumo elevado de espaçadores não são recomendadas.

Devido ao alto consumo de espaçadores, malhas 10x15 cm não são indicadas para nível de controle médio.

Ao analisar a malha com abertura máxima de 10 cm, o padrão de distribuição alinhado a cada 100 cm também não atendeu a esta limitação, tendo deformação plástica de 4,22 mm. Entretanto, ao simular o padrão alinhado de distribuição com afastamento entre espaçadores de 80 cm, a deformação plástica apontada foi de 3,94 mm e esta configuração possui densidade de uso de 3,5 espaçadores/m².

Malhas parcialmente amarradas (50 cm), compostas por diâmetro 5,0 mm, não atenderam aos níveis alto e médio de controle. Ao simular a composição de malha mais rígida, 10x10 cm, e

com maior densidade de espaçadores, padrão de distribuição escalonado total, a deformação plástica apresentou valor superior a 4,0 mm, estando fora dos limites propostos para os critérios analisados.

Em função dos resultados anteriores, pode-se afirmar que para atender o nível médio de controle com armaduras de diâmetro 5,0 mm, é preciso utilizar uma malha com abertura máxima de 10 cm, totalmente amarrada e com densidade mínima de espaçadores de 3,5 espaçadores/m².

Em malhas totalmente amarradas e com carga de um operário, 92% das configurações atenderam ao nível baixo de controle, considerando que o mapeamento em amarelo e verde também pertencem a este critério. Para estas malhas, 8% das configurações apresentaram valores de deformação plástica acima de 9,0 mm.

Ao observar a Tabela 40, para valores de deformação plástica entre 4,0 e 9,0 mm, as malhas com abertura de 20 cm nas duas direções apresentaram diversos resultados superiores para esse nível de controle. Com a carga de um operário, o padrão de distribuição alinhado para a malha 15x20 cm apresentou comportamento semelhante.

Ao impor carga representativa de dois operários sobre a malha, a malha 15x20 cm, totalmente amarrada, conseguiu suprir a tolerância de deformação plástica limitada a 9,0 mm até mesmo para a espessura de cobertura mais elevada, de 45 mm. Malhas com abertura de 20 cm nas duas direções não foram consideradas neste nível de deformação plástica, uma vez que a malha mais fechada (15x20 cm) apresentou deformação limite para o critério indicado.

Para malhas totalmente amarradas e nível baixo de controle, pode-se utilizar a abertura de malha de até 15 cm, independentemente do padrão de distribuição de espaçadores.

As malhas mais rígidas (10x10 cm) testadas sob condições mais exigentes de simulação, com malhas parcialmente amarradas e carga de dois operários, somente atenderam ao nível de controle baixo quando a distribuição com maior densidade de espaçadores foi aplicada (escalonada total). Para esta condição, malhas com abertura máxima de 10 cm, em padrão escalonado total e com afastamento máximo de 100 cm, resultaram em deformação plástica de 4,9 mm.

Para as demais malhas, os resultados de deformação foram superiores a 9,0 mm, estando fora do limite do nível de controle. Como exemplo, a malha com abertura de 15 cm nas duas direções apresentou deformação plástica de 11,13 mm nesta mesma condição de simulação.

Para as malhas parcialmente amarradas e nível baixo de controle, somente é possível utilizar malhas com abertura máxima de 10 cm, obrigatoriamente com padrão de distribuição escalonado total.

No geral, malhas compostas por barras de diâmetro 5,0 mm frente ao carregamento de execução atenderam de forma bastante limitada aos níveis de controle propostos. Para nível alto, nenhuma configuração obteve resultado satisfatório, ou seja, deformações plásticas até 2,0 mm. Quanto ao nível médio, somente a malha com abertura máxima de 10 cm e com amarração total resultou em deformações entre 2,0 e 4,0 mm.

Indicar malhas com diâmetro de 5,0 mm, combinando com as prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2014) que permitem tolerâncias totais de execução de 5,0 mm (execução rigorosa, deformação plástica até 2,0 mm) e 10 mm (execução normal, deformação plástica entre 2,0 e 4,0 mm) torna-se praticamente inviável. Sendo assim, ao analisar as deformações plásticas em armadura de lajes, as malhas com diâmetro 5,0 mm não são recomendadas, a não ser que tolerâncias de execução totais superiores a 10 mm sejam utilizadas na especificação do cobrimento nominal.

6.2.2.2 Malhas compostas por diâmetro 6,3 mm

A Tabela 44 mostra o comportamento das malhas compostas por diâmetro 6,3 mm, submetidas ao carregamento 1 (um operário) e amarração total da malha. Como primeira observação, verifica-se que na maioria das situações de simulação não houve contato entre a armadura e a fôrma, fenômeno que pode ser percebido pela repetição do mesmo valor de deformação plástica para as diversas alturas de espaçador.

Tabela 44: Deformações permanentes (mm) para malhas Ø 6,3 mm, com amarração total e carga 1

Afastamento entre espaçadores (cm)	Cobrimento (mm)	Escalonado Total					
		10x10	10x15	10x20	15x15	15x20	20x20
40	20	0,0	0,4	0,6	0,7	2,1	3,6
	25	0,0	0,4	0,6	0,7	2,1	3,6
	30	0,0	0,4	0,6	0,7	2,1	3,6
	35	0,0	0,4	0,6	0,7	2,1	3,6
	45	0,0	0,4	0,6	0,7	2,1	3,6
60	20	0,0	0,4	1,0	0,8	2,7	3,9
	25	0,0	0,4	1,0	0,8	2,7	3,9
	30	0,0	0,4	1,0	0,8	2,7	3,9
	35	0,0	0,4	1,0	0,8	2,7	3,9
	45	0,0	0,4	1,0	0,8	2,7	3,9
80	20	0,0	0,4	1,1	0,8	2,3	3,8
	25	0,0	0,4	1,1	0,8	2,3	3,8
	30	0,0	0,4	1,1	0,8	2,3	3,8
	35	0,0	0,4	1,1	0,8	2,3	3,8
	45	0,0	0,4	1,1	0,8	2,3	3,8
100	20	0,0	0,4	1,1	0,8	2,3	3,4
	25	0,0	0,4	1,1	0,8	2,3	3,4
	30	0,0	0,4	1,1	0,8	2,3	3,4
	35	0,0	0,4	1,1	0,8	2,3	3,4
	45	0,0	0,4	1,1	0,8	2,3	3,4
Escalonado Intercalado							
40	20	0,0	CONFIGURAÇÃO IGUAL A DISTRIBUIÇÃO ALINHADA 40 CM				
	25	0,0					
	30	0,0					
	35	0,0					
	45	0,0					
60	20	0,1	0,6	1,2	1,1	2,8	3,7
	25	0,1	0,6	1,2	1,1	2,8	4,9
	30	0,1	0,6	1,2	1,1	2,8	4,9
	35	0,1	0,6	1,2	1,1	2,8	4,9
	45	0,1	0,6	1,2	1,1	2,8	4,9
80	20	0,1	0,6	1,3	1,2	2,7	3,3
	25	0,1	0,6	1,3	1,2	2,7	4,6
	30	0,1	0,6	1,3	1,2	2,7	4,6
	35	0,1	0,6	1,3	1,2	2,7	4,6
	45	0,1	0,6	1,3	1,2	2,7	4,6
100	20	0,1	0,6	1,3	1,2	2,8	3,1
	25	0,1	0,6	1,3	1,2	2,8	4,6
	30	0,1	0,6	1,3	1,2	2,8	4,6
	35	0,1	0,6	1,3	1,2	2,8	4,6
	45	0,1	0,6	1,3	1,2	2,8	4,6

continua

Tabela 44: Deformações permanentes (mm) para malhas Ø 6,3 mm, com amarração total e carga 1 (continuação)

Afastamento entre espaçadores (cm)	Cobrimento (mm)	Alinhado					
		10x10	10x15	10x20	15x15	15x20	20x20
40	20	0,1	0,7	1,5	1,3	3,6	5,1
	25	0,1	0,7	1,5	1,3	3,6	5,1
	30	0,1	0,7	1,5	1,3	3,6	5,1
	35	0,1	0,7	1,5	1,3	3,6	5,1
	45	0,1	0,7	1,5	1,3	3,6	5,1
60	20	0,2	0,8	1,6	1,8	3,4	3,3
	25	0,2	0,8	1,6	1,8	3,6	5,3
	30	0,2	0,8	1,6	1,8	3,6	5,3
	35	0,2	0,8	1,6	1,8	3,6	5,3
	45	0,2	0,8	1,6	1,8	3,6	5,3
80	20	0,3	0,8	1,6	1,4	2,8	3,2
	25	0,3	0,8	1,6	1,5	3,1	4,3
	30	0,3	0,8	1,6	1,5	3,0	5,1
	35	0,3	0,8	1,6	1,5	3,0	5,6
	45	0,3	0,8	1,6	1,5	3,0	5,6
100	20	0,4	0,9	1,5	1,3	2,7	2,7
	25	0,4	0,9	1,6	1,6	3,0	4,4
	30	0,4	0,9	1,5	1,7	3,1	5,1
	35	0,4	0,9	1,5	1,7	3,1	5,4
	45	0,4	0,9	1,5	1,7	3,1	5,8

	Nível de controle alto
	Nível de controle médio
	Nível de controle baixo
	Sem controle

As deformações plásticas para o diâmetro de 6,3 mm apresentaram resultados mais satisfatórios, considerando os níveis de controle propostos. Avaliando as malhas com amarração total e a carga aplicada correspondente a um operário, 33% das malhas não atenderam ao nível alto de controle.

Em uma primeira verificação, para hipótese de simulação menos desfavorável (malhas totalmente amarradas e com carga de um operário), malhas com abertura máxima de 20 cm foram descartadas para o atendimento de nível alto de controle. Esta decisão foi tomada uma vez que nenhum padrão de distribuição de espaçadores atingiu deformação plástica menor que 2,0 mm.

Ainda para amarração total, as malhas que atenderam ao nível de controle alto na Tabela 44 foram simuladas com carga mais crítica (dois operários). Somente as malhas 10x10 cm e 10x15 cm atenderam ao critério de deformação menor ou igual a 2,0 mm, com padrão escalonado

intercalado de distribuição e afastamento entre espaçadores de 100 e 60 cm, respectivamente. A Tabela 45 apresenta os valores de deformação plástica para as configurações descritas.

Tabela 45: Deformações plásticas (mm) para malhas com Ø 6,3 mm, amarração total e carga 2, para análise de composições com $\Delta a \leq 2,0$ mm em padrão escalonado intercalado

Cobrimento (mm)	Escalonado intercalado			
	Afastamento entre espaçadores			
	10x10 (100 cm)	10x15 (60 cm)	10x20 (60 cm)	15x15 (60 cm)
20	1,8	2,0	3,9	3,3
25	1,8	2,0	3,9	3,3
35	1,8	2,0	3,9	3,3
45	1,8	2,0	3,9	3,3

Para amarração total, malhas com abertura 15 cm não atenderam ao nível alto de controle. Neste caso, somente malhas com abertura máxima de 10 cm são recomendadas, para uso com padrão escalonado intercalado e, conseqüentemente, escalonado total. O padrão alinhado foi excluído, uma vez que o valor da deformação plástica da distribuição escalonada intercalada foi próximo do limite do nível de controle.

As malhas com diâmetro 6,3 mm tiveram a simulação realizada com a amarração parcial (50 cm) e carregamento de um operário. Com mapeamento mais completo para esta situação, foi possível notar a diferença de análise de dados durante as simulações. Para simulação de malhas com amarração total e carga correspondente a um operário foram adicionados aproximadamente três apoios para representar a restrição da fôrma. Em contrapartida, as simulações com amarração parcial atingiram a imposição de até 15 apoios correspondentes à restrição de fôrmas. Esta constatação apenas corrobora com a informação de que malhas com amarração parcial são mais flexíveis do que malhas com amarração total.

A Tabela 46 exemplifica o comportamento das malhas com amarração parcial, compostas por diâmetro 6,3 mm e submetidas à carga de um operário. A simulação foi realizada para os afastamentos entre espaçadores limites de 40 e 100 cm, para todos os padrões de distribuição.

Sabendo que quanto maior a altura do espaçador, maior a deformação plástica da barra, a partir da obtenção de valores entre 4,0 e 9,0 mm, a simulação foi suspensa. Perante esta condição, algumas células da tabela apresentam valores repetidos, referentes às deformações superiores, com indicação de nível de controle.

Tabela 46: Deformações permanentes (mm) para malhas Ø 6,3 mm, com amarração parcial e carga 1

Afastamento entre espaçadores (cm)	Cobrimento (mm)	Escalonado Total					
		10x10	10x15	10x20	15x15	15x20	20x20
40	20	3,6	3,5	3,8	3,4	5,3	6,1
	25	3,6	4,1	4,4	5,5	> 5,3	> 6,1
	35	3,6	4,1	4,4	5,5	> 5,3	> 6,1
	45	3,6	4,1	4,4	5,5	> 5,3	> 6,1
100	20	2,2	2,3	2,2	3,7	3,5	3,7
	25	2,5	3,3	2,2	4,1	4,4	4,6
	35	3,6	4,4	2,2	> 4,1	> 4,4	> 4,6
	45	3,6	> 4,4	2,2	> 4,1	> 4,4	> 4,6
		Escalonado Intercalado					
40	20	3,6	CONFIGURAÇÃO IGUAL A DISTRIBUIÇÃO ALINHADA 40 CM				
	25	3,6					
	35	3,6					
	45	3,6					
100	20	2,5	2,4	3,3	3,4	3,7	3,9
	25	2,9	3,1	4,3	4,9	> 4,7	4,9
	35	4,2	4,4	4,3	> 4,9	> 4,7	> 4,9
	45	4,2	> 4,4	4,3	> 4,9	> 4,7	> 4,9
		Alinhado					
40	20	4,5	4,7	5,0	5,7	5,5	6,4
	25	4,5	4,7	> 5,0	> 5,7	> 5,5	6,4
	35	4,5	4,7	> 5,0	> 5,7	> 5,5	13,4
	45	4,5	4,7	> 5,0	> 5,7	> 5,5	13,4
100	20	2,0	2,5	3,3	3,0	2,7	3,6
	25	3,0	3,8	4,9	5,0	5,6	5,6
	35	4,9	6,5	> 4,9	> 5,0	> 5,6	> 5,6
	45	> 4,9	> 6,5	> 4,9	> 5,0	> 5,6	> 5,6

	Nível de controle alto
	Nível de controle médio
	Nível de controle baixo
	Sem controle

Com a mudança na amarração da malha (amarração parcial) ficou perceptível que, para diâmetro 6,3 mm, as deformações plásticas não atenderam ao nível alto de controle.

Para avaliação do nível médio de controle, a análise da Tabela 44 permitiu descartar malhas com amarração total e abertura máxima de 20 cm, em padrão escalonado intercalado e alinhado, com afastamento entre espaçadores maiores que 40 cm.

As malhas totalmente amarradas, com abertura máxima de 15 cm, foram simuladas novamente com carga de dois operários, como forma de avaliar o atendimento ao nível de controle médio, conforme Tabela 47. Apesar das novas análises, a composição que atende ao critério permanece sendo a exposta na Tabela 45, de distribuição escalonada intercalada de espaçadores, com afastamento de 60 cm.

Tabela 47: Deformações plásticas (mm) para malhas com \varnothing 6,3 mm, abertura 15x15, amarração total e carga 2, para análise de composições com $2,0 \leq \Delta a \leq 4,0$ mm em padrão escalonado intercalado

Cobrimento (mm)	Padrão escalonado intercalado Afastamento entre espaçadores		
	60 cm	80 cm	100 cm
20	3,3	4,9	7,1
25	3,3	4,9	7,1
35	3,3	4,9	7,1
45	3,3	4,9	7,1

Para malhas totalmente amarradas, recomendam-se malhas com abertura máxima de 15 cm, com distribuição de espaçadores de forma escalonada intercalada ou total, e obrigatoriamente com afastamento nominal entre espaçadores máximo de 60 cm para atendimento de nível médio.

Considerando ainda o nível médio e a amarração parcial, os resultados da Tabela 46 permitiram descartar o uso das malhas com abertura superior a 10 cm e malhas com abertura máxima de 10 cm, com padrão de distribuição alinhado ou escalonado intercalado com afastamento entre espaçadores superior a 40 cm.

As configurações que atenderam ao nível de controle médio na Tabela 44 foram novamente simuladas, com carga referente a dois operários. Para esta condição, a malha com abertura máxima de 10 cm, no padrão de distribuição escalonado total e afastamento entre espaçadores de 100 cm apresentou deformação plástica de 9,2 mm. Ao simular a mesma configuração com afastamento de 60 cm a deformação plástica resultante foi de 9,5 mm. A configuração com afastamento de 40 cm não foi analisada pois resulta em uma densidade de espaçadores 27,8 espaçadores/m², superior ao que foi considerado exequível neste trabalho.

Para malhas parcialmente amarradas, as configurações com diâmetro 6,3 mm não atenderam ao nível médio de controle, já que mesmo a malha mais rígida (10x10 cm) em distribuição escalonada total, com afastamento entre espaçadores de 60 cm, apresentou deformação plástica de 4,7 mm, estando fora da limitação do critério.

Considerando o nível mais baixo de controle, todas as malhas com amarração total e carga correspondente a um operário atenderam ao critério de deformação plástica entre 4,0 e 9,0 mm (Tabela 44). Ao testar a malha mais flexível, com abertura máxima de 20 cm, e com padrão que gera maiores deformações plásticas (alinhado), para carga de dois operários, o resultado foi de 8,5 mm.

Desta forma, para amarração total, malhas com abertura máxima de 20 cm atenderam ao nível de controle baixo, independentemente do padrão de distribuição empregado para afastamento entre espaçadores de até 100 cm.

Em relação à amarração parcial, ao se analisar a Tabela 44, que contempla a carga correspondente a um operário, foi possível identificar que aberturas de malha de 20 cm não atenderam ao nível de controle baixo. Para testar as demais configurações, novas simulações contemplando a carga de dois operários foram feitas. Para esta nova configuração, malhas com abertura acima de 10 cm apresentaram deformação superior a 9,0 mm, para qualquer padrão de distribuição entre espaçadores considerada.

Ao simular malhas com abertura máxima de 10 cm, o padrão escalonado intercalado com afastamento entre espaçadores de 100 cm indicou uma deformação plástica de 8,63 mm, estando dentro do limite proposto para nível de controle baixo.

Sendo assim, para malhas parcialmente amarradas, para atendimento ao nível de controle baixo, recomenda-se o uso de malhas com abertura máxima de 10 cm e padrão de distribuição escalonada intercalada ou total, com afastamento entre espaçadores máximo de 100 cm.

De uma forma geral, notou-se uma melhora no atendimento aos níveis de controle de deformação plástica para malhas compostas por diâmetros 6,3 mm. Se for possível admitir que a tolerância total de execução de 5,0 mm indicada pela NBR 6118 (ABNT) para um controle rigoroso, e a de 10 mm para uma execução normal, correspondentes ao nível alto e médio de controle de deformação plástica desse trabalho, respectivamente, malhas parcialmente amarradas não deveriam ser utilizadas.

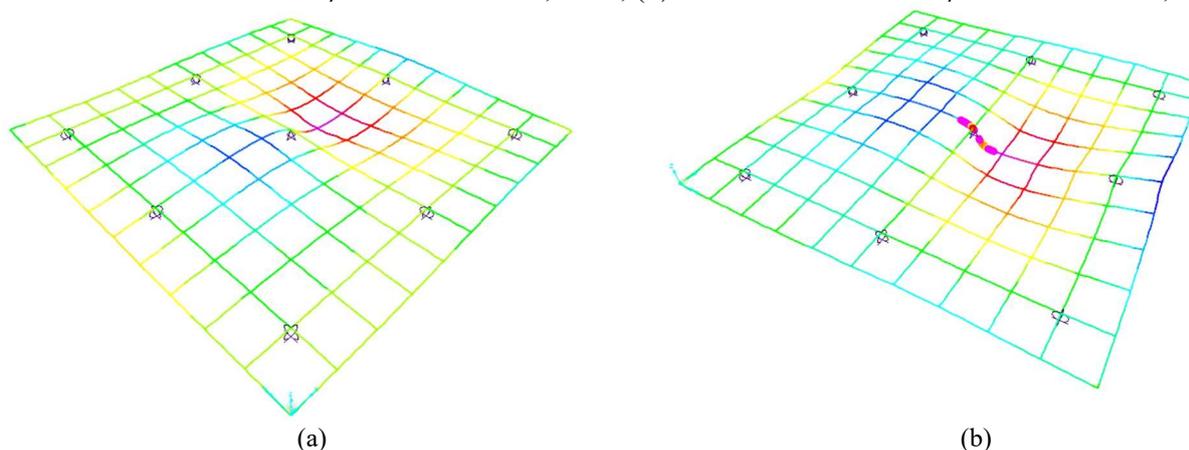
Para controle baixo, que pode ser associado a uma tolerância de execução total de 15,0 mm, é possível atender as deformações plásticas tanto com malhas com amarração total quanto parcial, de 50 cm. As malhas com diâmetro 6,3 mm demandam uma densidade menor de espaçadores quando comparadas com as indicações das malhas com diâmetro 5,0 mm.

6.2.2.3 Malhas compostas por diâmetro 8,0 mm

As malhas formadas por barras de aço de diâmetro 8,0 mm sob a carga de um único operário não entraram em contato com a fôrma durante as simulações que representam a amarração total da armadura. Nessas simulações, notou-se que as rótulas plásticas não foram ativadas sob nenhuma hipótese em todas as configurações analisadas. Assim, os deslocamentos mensurados

para análise não-linear plástica e elástica eram exatamente iguais. A Figura 61 mostra a diferença na ativação das rótulas plásticas para malhas com diferentes diâmetros, mas sob mesma situação de simulação.

Figura 61: Comparação de ativação de rótulas plásticas entre malhas com diferentes diâmetros: (a) malha com barras de aço com diâmetro 8,0 mm; (b) malha com barras de aço com diâmetro 5,0 mm



(Fonte: elaborado pela autora, *software* SAP2000, 2020).

A Tabela 48 apresenta as deformações plásticas de forma resumida para amarração total da malha e aplicação da carga de um operário. Não existindo deformação plástica, todos os níveis de controle foram atendidos.

Tabela 48: Deformações permanentes (mm) para malhas Ø 8,0 mm, com amarração total e carga 1

Afastamento entre espaçadores (cm)	Cobrimento (mm)	Escalonado total					
		10x10	10x15	10x20	15x15	15x20	20x20
100	20	0	0	0	0	0	0
	25	0	0	0	0	0	0
	30	0	0	0	0	0	0
	35	0	0	0	0	0	0
	45	0	0	0	0	0	0
Escalonado intercalado							
100	20	0	0	0	0	0	0
	25	0	0	0	0	0	0
	30	0	0	0	0	0	0
	35	0	0	0	0	0	0
	45	0	0	0	0	0	0
Alinhado							
100	20	0	0	0	0	0	0
	25	0	0	0	0	0	0
	30	0	0	0	0	0	0
	35	0	0	0	0	0	0
	45	0	0	0	0	0	0

Nível de controle alto

Ao simular a malha menos rígida (20x20 cm), com amarração total e carga de dois operários sobre a armadura, o padrão de distribuição de espaçadores alinhado, com afastamento entre espaçadores de 100 e 80 cm gerou deformações plásticas de 3,3 e 2,7 mm, respectivamente, atendendo o nível médio de controle. Ao adotar o afastamento entre espaçadores de 60 cm, para o mesmo padrão, a deformação plástica atinge 1,9 mm e atende ao nível de controle alto. Para distribuição escalonada intercalada a cada 100 cm, a deformação plástica atinge o valor de 1,85 mm, também atendendo ao nível mais rigoroso de deformação.

Malhas totalmente amarradas com diâmetro de 8,0 mm atenderam aos níveis de controle médio e inferiores para todas as configurações testadas. Para nível de controle alto, podem ser utilizados o padrão de distribuição escalonado total ou intercalado com afastamento até 100 cm ou o padrão alinhado com afastamento máximo de 60 cm.

Com a amarração parcial, as rótulas plásticas foram ativadas na análise plástica não-linear das malhas. Independente do padrão de distribuição dos espaçadores, não foi apontado o contato da malha com a fôrma, com exceção para padrão de distribuição alinhado a cada 100 cm.

As simulações para amarração parcial e carga de um operário foram feitas somente para malhas com abertura de 20 cm nas duas direções, por ser a configuração mais flexível (Tabela 49), onde todas as deformações atenderam ao nível alto de controle, estando abaixo de 2,0 mm.

Tabela 49: Deformações permanentes (mm) para malha 20x20 com barras Ø 8,0 mm, com amarração parcial e carga 1

Afastamento entre Espaçadores (cm)	Cobrimento (mm)	Padrão de distribuição		
		Alinhado	Escalonado total	Escalonado intercalado
40	20	0,64	0,60	Composição igual a distribuição alinhada 40 cm
	25	0,63	0,60	
	30	0,63	0,60	
	35	0,63	0,60	
	45	0,63	0,60	
60	20	0,57	0,47	0,54
	25	0,57	0,47	0,54
	30	0,57	0,47	0,54
	35	0,57	0,47	0,54
	45	0,57	0,47	0,54
100	20	0,28	0,33	0,34
	25	0,32	0,33	0,34
	30	0,44	0,33	0,34
	35	0,44	0,33	0,34
	45	0,44	0,33	0,34

Nível de controle alto

A malha 20x20 cm, por possuir maior afastamento, tende a sofrer deformações plásticas mais significativas, comportamento também já observado nas simulações com malhas de diferentes diâmetros (5,0 e 6,3 mm). Desta forma, se a malha mais flexível atende a todos os critérios, as demais malhas também atenderão, não sendo necessárias realizar novas simulações para este carregamento.

Mais uma vez, o padrão de distribuição escalonado total resultou em menores deformações permanentes, comparado em mesma situação com os demais modelos de disposição. Contudo, sob o mesmo nível de deformações plásticas da armadura, o padrão de distribuição alinhado é mais favorável economicamente, devido à baixa densidade de espaçadores.

Malhas com diâmetro 8,0 mm foram simuladas com amarração parcial (50 cm) e carga de dois operários caminhando simultaneamente sobre a armadura, próximos ao espaçador de interesse. Para malhas com maior abertura, até 20 cm, os padrões de distribuição escalonado total e alinhado ainda foram satisfatórios para o nível alto de controle, desde que a distância entre os espaçadores seja de 40 cm.

Com isso, as malhas com aberturas mais fechadas tiveram continuidade de simulação para esta mesma situação. Apesar de atender o nível de controle rigoroso para a deformação plástica, afastamentos tão próximos (40 cm) e que possuem alta densidade de espaçadores não são recomendados.

Sendo assim, para armaduras compostas por diâmetro 8,0 mm submetidas na hipótese mais crítica de simulação, foi verificado o comportamento da armadura para as demais malhas com afastamento intermediário (60 cm) e máximo (100 cm) entre espaçadores, como mostra a Tabela 50.

Tabela 50: Deformações permanentes (mm) para malhas com Ø 8,0 mm, com amarração parcial e carga 2

Afastamento entre espaçadores (cm)	Cobrimento (mm)	Escalaonado Total					
		10x10	10x15	10x20	15x15	15x20	20x20
40	20	-	-	-	-	-	1,95
	25	-	-	-	-	-	1,95
	30	-	-	-	-	-	1,95
	35	-	-	-	-	-	1,95
	45	-	-	-	-	-	1,95
60	20	0,4	2,5	2,3	2,8	3,1	3,7
	25	0,4	2,5	2,3	2,8	3,1	3,7
	30	0,4	2,5	2,3	2,8	3,1	3,7
	35	0,4	2,5	2,3	2,8	3,1	3,7
	45	0,4	2,5	2,3	2,8	3,1	3,7

(continua)

Tabela 50: Deformações permanentes (mm) para malhas com Ø 8,0 mm, com amarração parcial e carga 2 (continuação)

Afastamento entre espaçadores (cm)	Cobrimento (mm)	Escalonado Total					
		10x10	10x15	10x20	15x15	15x20	20x20
100	20	1,3	4,5	4,2	4,7	5,0	7,0
	25	1,3	4,5	4,2	4,7	5,0	7,0
	30	1,3	4,5	4,2	4,7	5,0	7,0
	35	1,3	4,5	4,2	4,7	5,0	7,0
	45	1,3	4,5	4,2	4,7	5,0	7,0
		Escalonado Intercalado					
40	20	-	CONFIGURAÇÃO IGUAL A DISTRIBUIÇÃO ALINHADA 40 CM				
	25	-					
	30	-					
	35	-					
	45	-					
60	20	0,6	3,0	2,7	3,1	4,2	5,3
	25	0,6	3,0	2,7	3,1	4,2	5,3
	30	0,6	3,0	2,7	3,1	4,2	5,3
	35	0,6	3,0	2,7	3,1	4,2	5,3
	45	0,6	3,0	2,7	3,1	4,2	5,3
100	20	2,1	4,7	4,4	5,5	5,6	7,1
	25	2,1	4,7	4,4	5,5	5,6	7,1
	30	2,1	4,7	4,4	5,5	5,6	7,1
	35	2,1	4,7	4,4	5,5	5,6	7,1
	45	2,1	4,7	4,4	5,5	5,6	7,1
		Alinhado					
40	20	-	-	-	-	-	1,98
	25	-	-	-	-	-	1,98
	30	-	-	-	-	-	1,98
	35	-	-	-	-	-	1,98
	45	-	-	-	-	-	1,98
60	20	0,9	3,7	3,6	3,9	5,4	5,9
	25	0,9	3,7	3,6	3,9	5,4	5,9
	30	0,9	3,7	3,6	3,9	5,4	5,9
	35	0,9	3,7	3,6	3,9	5,4	5,9
	45	0,9	3,7	3,6	3,9	5,4	5,9
100	20	3,3	5,7	5,8	8,2	8,7	9,6
	25	4,8	> 5,7	> 5,8	> 8,2	> 8,7	> 9,6
	30	> 4,8	> 5,7	> 5,8	> 8,2	> 8,7	> 9,6
	35	> 4,8	> 5,7	> 5,8	> 8,2	> 8,7	> 9,6
	45	> 4,8	> 5,7	> 5,8	> 8,2	> 8,7	> 9,6

	Nível de controle alto
	Nível de controle médio
	Nível de controle baixo
	Sem controle

O padrão de distribuição escalonado intercalado não foi simulado para afastamento de 40 cm, pois a configuração de espaçadores resulta em modelo igual ao padrão alinhado de distribuição, para malhas com abertura máxima de 20 cm.

Ao analisar os resultados indicados na Tabela 50 foi realizada nova simulação, para afastamento entre espaçadores de 80 cm e a abertura de malha 10 cm, como forma de verificar se o padrão

alinhado ainda atende o nível analisado. A deformação resultante para esta configuração foi de 1,7 mm.

Desta forma, para malhas parcialmente amarradas, com diâmetro 8,0 mm, configurações com abertura máxima de 10 cm atenderam ao nível de controle alto, quando empregado o padrão de distribuição alinhado com afastamento máximo de 80 cm ou para padrão escalonado total ou intercalado com afastamento máximo de 100 cm.

Todas as malhas parcialmente amarradas, com abertura máxima de 15 cm conseguiram atender níveis de controle médio de execução, independente do padrão de distribuição aplicado, desde que tenha afastamento de 60 cm entre espaçadores (Tabela 50). Ao simular padrões com afastamento de 80 cm, não constantes na Tabela 50, as deformações plásticas são maiores que 4,0 mm.

Para nível baixo de controle, a malha parcialmente amarrada, 20x20 cm, simulada com afastamento entre espaçadores de 60 cm e padrão de distribuição alinhado, atende ao critério. Entretanto, as simulações realizadas para o mesmo padrão, mas com afastamento de 80 cm, excederam o limite, tendo deformação plástica de 9,3 mm.

Os padrões escalonado total e intercalado também atenderam ao nível de controle baixo, ao aplicar espaçadores com afastamento máximo de 100 cm.

Desta forma, malhas com abertura máxima de 20 cm e parcialmente amarradas atenderam ao nível de controle baixo quando utilizado padrão alinhado com afastamento de até 60 cm, ou padrão escalonado intercalado ou total com afastamento máximo de até 100 cm.

As malhas compostas por diâmetro 8,0 mm apresentaram resultados que atendem todos os níveis de controle, tanto para malhas com amarração total quanto para amarração parcial.

6.2.3 Panorama geral de cobertura e controle rigoroso de execução

A partir do mapeamento das deformações plásticas, provenientes das simulações computacionais, foram propostas diretrizes de uso dos espaçadores para o atendimento dos níveis de controle propostos nesse trabalho (Tabela 39).

O Quadro 7 apresenta um panorama geral de indicação para o uso de espaçadores em função da composição da malha, diâmetro de armadura e afastamento entre os espaçadores. As

especificações são recomendadas ao adotar um nível de controle alto, indicando uma tolerância de deformação plástica em até 2,0 mm. Este nível de controle pode estar associado à uma tolerância total de 5,0 mm, com controle rigoroso de execução. Os resultados consideram as deformações plásticas expostas nesse trabalho como forma de definição geral de uso dos espaçadores.

Quadro 7: Panorama de uso de espaçadores e composição de malha para $\Delta_a \leq 2,0$ mm

Diâmetro	Uso de espaçadores e composição de malha
Ø 5,0	Malhas totalmente amarradas: - não é possível usar tal configuração. Malhas parcialmente amarradas ¹ : - não é possível usar tal configuração.
Ø 6,3	Malhas totalmente amarradas: - abertura máxima de malha de 10 cm nas duas direções; - densidade de espaçadores mínima ² de 6,3 espaçadores/m ² ; - afastamento máximo entre espaçadores de 100 cm para distribuição escalonada intercalada ou total. Malhas parcialmente amarradas: - não é possível usar tal configuração.
Ø 8,0	Malhas totalmente amarradas: - abertura máxima da malha 20 cm nas duas direções; - densidade de espaçadores mínima de 4,9 espaçadores/m ² , para afastamento máximo entre espaçadores de 60 cm para todos os padrões de distribuição; - densidade de espaçadores mínima de 3,5 espaçadores/m ² para afastamento máximo entre espaçadores de 100 cm para distribuição escalonada intercalado ou total. Malhas parcialmente amarradas: - abertura máxima da malha 10 cm nas duas direções; - densidade de espaçadores de 3,5 espaçadores/m ² , para afastamento máximo entre espaçadores de 80 cm para todos os padrões de distribuição; - densidade de espaçadores mínima de 7,8 espaçadores/m ² para afastamento máximo entre espaçadores de 100 cm para distribuição escalonada intercalado ou total.
¹ todos os nós do perímetro amarrados e nós internos amarrados a cada 50 cm em cada barra, com padrão diagonal.	
² menor densidade correspondente aos padrões de distribuição testados que atendem ao nível de controle;	

Ao considerar uma tolerância de execução normal, de 10 mm, adotando um limite de deformação plástica das barras entre 2,0 e 4,0 mm, e admitindo as tolerâncias propostas em normas (ABNT NBR 14931, 2004; BS 7973-1, 2001) para fôrmas e espaçador. O Quadro 8 indica as condições que atendem este parâmetro de execução.

Quadro 8: Panorama de uso de espaçadores e composição de malha para $2,0 < \Delta_a \leq 4,0$ mm

Diâmetro	Uso de espaçadores e composição de malha
Ø 5,0	Malhas totalmente amarradas: - abertura máxima da malha 10 cm nas duas direções; - densidade de espaçadores mínima ¹ de 3,5 espaçadores/m ² ; - afastamento máximo entre espaçadores de 80 cm para padrão alinhado de distribuição; - densidade de espaçadores mínima de 6,3 espaçadores/m ² ; - afastamento máximo entre espaçadores de 100 cm para padrão escalonado total e intercalado de distribuição. Malhas parcialmente amarradas ² : - não é possível usar tal configuração.

(continua)

Quadro 8: Panorama de uso de espaçadores e composição de malha para $2,0 < \Delta_a \leq 4,0$ mm
(continuação)

Ø 6,3	<p>Malhas totalmente amarradas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - abertura máxima da malha 15 cm; - densidade de espaçadores mínima de 8,0 espaçadores/m²; - afastamento máximo entre espaçadores de 60 cm para padrões escalonado total e intercalado de distribuição. <p>Malhas parcialmente amarradas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - não é possível usar tal configuração.
Ø 8,0	<p>Malhas totalmente amarradas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - abertura máxima da malha 20 cm nas duas direções; - densidade de espaçadores mínima de 2,3 espaçadores/m²; - afastamento máximo entre espaçadores de 100 cm para todos os padrões de distribuição. <p>Malhas parcialmente amarradas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - abertura máxima da malha 15 cm; - densidade de espaçadores mínima de 5,5 espaçadores/m²; - afastamento máximo entre espaçadores de 60 cm para todos os padrões de distribuição.
<p>¹ menor densidade correspondente aos padrões de distribuição testados que atendem ao nível de controle;</p> <p>² todos os nós do perímetro amarrados e nós internos amarrados a cada 50 cm em cada barra, com padrão diagonal.</p>	

O Quadro 9 admite uma tolerância de execução maior ($\Delta_c = 15,0$ mm) como permitido na NBR 6118 (ABNT, 2014) e indicado na DIN 1045-1 (2008).

Quadro 9: Panorama de uso de espaçadores e composição de malha para $4,0 < \Delta_a \leq 9,0$ mm

Diâmetro	Uso de espaçadores e composição de malha
Ø 5,0	<p>Malhas totalmente amarradas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - abertura máxima da malha 15 cm; - densidade de espaçadores mínima¹ de 4,5 espaçadores/m²; - afastamento máximo entre espaçadores de 100 cm para padrão escalonado total ou intercalado de distribuição. <p>Malhas parcialmente amarradas²:</p> <ul style="list-style-type: none"> - abertura máxima da malha 10 cm; - densidade de espaçadores mínima de 11,3 espaçadores/m²; - afastamento máximo entre espaçadores de 100 cm para padrão escalonado total ou intercalado de distribuição.
Ø 6,3	<p>Malhas totalmente amarradas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - abertura máxima da malha 20 cm nas duas direções; - densidade de espaçadores mínima de 2,3 espaçadores/m²; - afastamento máximo entre espaçadores de 100 cm para todos os padrões de distribuição. <p>Malhas parcialmente amarradas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - abertura máxima da malha 10 cm nas duas direções; - densidade de espaçadores mínima de 6,3 espaçadores/m²; - afastamento máximo entre espaçadores de 100 cm para todos os padrões de distribuição.
Ø 8,0	<p>Malhas totalmente amarradas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - abertura máxima da malha 20 cm nas duas direções; - densidade de espaçadores mínima de 2,3 espaçadores/m²; - afastamento máximo entre espaçadores de 100 cm para todos os padrões de distribuição. <p>Malhas parcialmente amarradas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - abertura máxima da malha 20 cm; - densidade de espaçadores mínima 3,5 espaçadores/m²; - afastamento máximo entre espaçadores de 100 cm para padrão escalonado total ou intercalado de distribuição.
<p>¹ menor densidade correspondente aos padrões de distribuição testados que atendem ao nível de controle;</p> <p>² todos os nós do perímetro amarrados e nós internos amarrados a cada 50 cm em cada barra, com padrão diagonal.</p>	

Ao indicar uma maior tolerância de execução ($\Delta c = 15,0$ mm), todas as composições conseguem atender a especificação, considerando os diâmetros e amarrações testadas.

Destaca-se que ainda assim, a malha composta por diâmetro 5,0 mm, mesmo na hipótese menos desfavorável de deformação plástica e com maior tolerância, ainda não atinge em sua totalidade resultados adequados, onde malhas com abertura máxima de 20 cm não são consideradas.

Os quadros indicativos de uso de espaçadores permitem visualizar de uma forma mais abrangente o comportamento das malhas com diferentes diâmetros para o atendimento aos níveis de controle.

Ao especificar a tolerância permitida pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para um controle rigoroso de execução, de 5,0 mm, ou para execução normal, de 10 mm, nota-se que as composições usuais de armadura montadas em canteiro dificilmente atenderiam esta especificação. A indicação de malhas com diâmetro 5,0 mm e afastamento entre barras maiores, exigiriam um cobrimento maior, devido a deformação excessiva frente a carga de execução.

Malhas com diâmetro 5,0 e 6,3 mm não conseguem atender a deformação plástica de até 2,0 mm com armadura parcialmente amarrada. Nos métodos usuais de execução, a indicação das tolerâncias normativas não permitiria o contato dos operários com a armadura, considerando ainda, que a fôrma e o espaçador possuem uma deformação/desnivelamento somados em até 3,0 mm, o que dificilmente ocorre em obras com o uso de chapas de madeira, por exemplo.

Algumas normas internacionais, como a DIN 1045-1 (2008), indicam que a redução de 5,0 mm na especificação do cobrimento somente é permitida em elementos pré-moldados e parece ser mais coerente quando comparados os processos de execução entre os dois sistemas, pré-moldado e *in loco*.

De forma de uma solução mais simplificada, os panoramas de uso de espaçadores e composição de malhas dos Quadro 7 a 9 foram condensados e resumidos no Quadro 10.

Quadro 10: Panorama simplificado para uso de espaçadores e composição de malha, considerando níveis de controle de deformação plástica

Diâmetro da barra de aço	Recomendação de uso	Nível de controle	
Ø 5,0 mm	Não recomendado	Alto: $\Delta_a \leq 2,0$ mm	
	Malha ¹ : 10 cm Densidade ² : 3,5 espaçadores/m ² Distância ³ : 110 cm	Amarração total	Médio: $2,0 \text{ mm} < \Delta_a \leq 4,0$ mm
	Malha: 15 cm Densidade: 4,5 espaçadores/m ² Distância: 141 cm	Amarração total ⁴	Baixo: $4,0 \text{ mm} < \Delta_a \leq 9,0$ mm
Malha: 10 cm Densidade: 11,5 espaçadores/m ² Distância: 140 cm	Amarração parcial ⁵		
Ø 6,3 mm	Malha: 10 cm Densidade: 6,5 espaçadores/m ² Distância: 140 cm	Amarração total	Alto: $\Delta_a \leq 2,0$ mm
	Malha: 15 cm Densidade: 8,0 espaçadores/m ² Distância: 80 cm	Amarração total	Médio: $2,0 \text{ mm} < \Delta_a \leq 4,0$ mm
	Malha: 20 cm Densidade: 2,5 espaçadores/m ² Distância: 140 cm	Amarração total	Baixo: $4,0 \text{ mm} < \Delta_a \leq 9,0$ mm
	Malha: 10 cm Densidade: 6,5 espaçadores/m ² Distância: 140 cm	Amarração parcial	
Ø 8,0 mm	Malha: 20 cm Densidade: 5,0 espaçadores/m ² Distância: 80 cm	Amarração total	Alto: $\Delta_a \leq 2,0$ mm
	Malha: 10 cm Densidade: 3,5 espaçadores/m ² Distância: 110 cm	Amarração parcial	
	Malha: 20 cm Densidade: 2,5 espaçadores/m ² Distância: 140 cm	Amarração total	Médio: $2,0 \text{ mm} < \Delta_a \leq 4,0$ mm
	Malha: 15 cm Densidade: 5,5 espaçadores/m ² Distância: 80 cm	Amarração parcial	
	Malha: 20 cm Densidade: 2,5 espaçadores/m ² Distância: 140 cm	Amarração total	Baixo: $4,0 \text{ mm} < \Delta_a \leq 9,0$ mm
	Malha: 20 cm Densidade: 3,5 espaçadores/m ² Distância: 140 cm	Amarração parcial	
¹ afastamento máximo das barras de armadura nas duas direções da malha; l ² menor densidade correspondente aos padrões de distribuição testados que atendem ao nível de controle, considerada como o valor mínimo a ser atendido por qualquer outra distribuição; ³ distância máxima entre espaçadores em qualquer direção (raio de alcance); ⁴ todos os nós da malha de armadura amarrados. ⁵ todos os nós do perímetro amarrados e nós internos amarrados a cada 50 cm em cada barra, com padrão diagonal.			

A indicação simplificada foi dada em função da taxa mínima por m² (densidade) e distância máxima entre espaçadores, considerando o raio em torno do espaçador, ou seja, em qualquer direção, não fixando o padrão de distribuição. Como ressalva, as recomendações nos panoramas

foram geradas a partir dos padrões de distribuição propostos neste trabalho (alinhado, escalonado total e escalonado intercalado), não considerando uma distribuição aleatória de espaçadores, por exemplo. Caso sejam testadas outras distribuições, indica-se obedecer a densidade dos espaçadores para comparação de atendimento aos níveis de controle.

Cabe ressaltar que a NBR 14931 (ABNT, 2004) descreve que as tolerâncias para o sistema de fôrmas, quanto ao desnivelamento, são no mínimo de 5,0 mm, podendo atingir até 10,0 mm. Caso o sistema de fôrmas tenha o desnivelamento mínimo permitido, a tolerância para execução rigorosa normativa (ABNT 6118, 2014) já estaria totalmente consumida. Ainda, dependendo da dimensão do elemento estrutural, somente fôrmas compostas por materiais mais rígidos conseguiriam suprir essas tolerâncias de desnivelamento.

É imprescindível que as tolerâncias indicadas para diferentes sistemas, como armadura, fôrmas e espaçadores, nas respectivas normas, sejam propostas de forma conjunta, pois em conjunto afetam diretamente o desempenho da edificação, através do cobrimento das armaduras, por exemplo. Como base, o Instituto Americano dispõe de norma específica para indicação de tolerâncias dos diferentes sistemas que envolvem o projeto e a execução da edificação, a ACI 317 (2014).

Oliveira (2018), em levantamento de obra para verificação da espessura de cobrimento mínimo, aponta que 20% das medidas realizadas para malhas com diâmetro 6,3 mm, com abertura 10x13 cm, atendem as tolerâncias de execução normativas de 5,0 mm, enquanto 85% dos cobrimentos mínimos cumpriram as tolerâncias de 10,0 mm. Apesar do percentual indicar uma parcela de atendimento às tolerâncias normativas, o cobrimento nominal indicado em projeto foi de 15 mm. Com isso, a restrição das fôrmas pode impedir a deformação plástica da armadura, condição não abordada neste trabalho, já que as simulações computacionais realizadas iniciaram em cobrimento igual a 20 mm.

Os resultados para medição de cobrimento de Palm (2017) também indicam que mesmo com um controle de distribuição de espaçadores, nenhuma armadura com diâmetro 6,3 mm tem 100% dos resultados dentro da tolerância de execução de 10,0 mm.

De uma forma geral, as malhas compostas por barras de diâmetro 6,3 mm ainda não conseguem suprir as tolerâncias normativas, uma vez que a NBR 6118 (ABNT, 2014) coloca que em qualquer ponto do elemento estrutural, o cobrimento mínimo deve ser alcançado. Deste modo,

as simulações computacionais parecem representar o comportamento das malhas executadas em obras correntes.

Com a comparação entre as orientações normativas vigentes no Brasil e o levantamento da deformação plástica das barras para diferentes composições de armadura, fica clara a necessidade de detalhar as condições de tolerância de execução.

Na apresentação de resultados das simulações computacionais, fica evidente a influência do diâmetro da armadura na deformação plástica. A única norma presente neste trabalho, que associa as tolerâncias de execução com o diâmetro das barras, é a norma indiana. A IS 456 (2000) coloca como observação que para a classe de agressividade mais suave, quando usada barra maior que 12 mm na armadura, é permitida a redução de 5,0 mm do cobrimento nominal.

Toma-se como base, a orientação quanto à tolerância de execução da norma alemã DIN 1045-1 (2008) que possui tolerâncias de execução mais elevadas. A partir da indicação de cobrimento mínimo, a norma apenas indica a tolerância de 10,0 mm para a classe mais branda de agressividade. As demais classes de cobrimento possuem valor estipulado de 15,0 mm para tolerância de execução, sendo estes valores somente acrescidos ao cobrimento tabelado.

A partir das simulações computacionais, parece razoável indicar o uso de tolerância de execução de 15,0 mm, uma vez que somente a deformação plástica da armadura já indica uma grande parcela da perda do cobrimento e há maior abrangência de malhas para o atendimento neste nível. Apesar da recomendação do uso de uma tolerância de execução maior, ainda há necessidade de controle nos processos de montagem e execução, como a inspeção de desnivelamento do sistema de fôrmas como a distribuição dos espaçadores em padrão e afastamento definidos.

Quando correlacionado ao cobrimento de armadura, o controle de execução pode ser definido através do atendimento de fatores pertencentes a cada sistema. As atividades de controle dispostas no Quadro 11 foram atribuídas a partir da revisão bibliográfica, da observação em diferentes obras e da participação de trabalhos complementares com objetivo de levantamento de cobrimento executado. Destaca-se que as orientações de atividades de controle são adicionais às normas vigentes e visam a melhoria no desempenho das edificações.

Quadro 11: Etapas de controle de execução com foco no cobrimento de armadura

Item	Atividades de controle
Fôrmas	<ul style="list-style-type: none"> - Garantia da qualidade das chapas - Averiguação de planicidade das chapas (reutilização do jogo de fôrmas incluso) - Verificação da montagem (sobreposição das chapas e dos demais elementos) - Revisão de nivelamento do sistema de fôrmas após a montagem - Plano de reescoramento adequado
Armadura	<ul style="list-style-type: none"> - Análise de deformação das barras antes da montagem - Verificação de diâmetro da armadura - Supervisão na montagem e posicionamento - Inspeção de amarração da armadura conforme orientação de responsável técnico
Espaçadores	<ul style="list-style-type: none"> - Emprego de espaçadores com certificação - Apresentação de metodologia de disposição de espaçadores - Supervisão de distribuição de espaçadores por responsável - Uso de espaçadores adequados para o elemento estrutural a ser executado - Revisão de fixação e posicionamento dos espaçadores (exemplo: ao utilizar espaçador multiapoio para lateral da fôrma)
Execução	<ul style="list-style-type: none"> - Inspeção de execução do elemento estrutural antes da concretagem - Plano de movimentação de materiais para evitar cargas extras sobre a armadura no processo de montagem - Aplicação de plataformas de apoio para evitar contato entre operários e armadura (obrigatório em armaduras com diâmetro 5,0 mm) - Supervisão de responsável técnico nas etapas de lançamento e adensamento do concreto - Indicação de conformidade quanto a execução do elemento x cargas acidentais do processo executivo

Os níveis de controle para deformação plástica sugeridos nesta tese são aplicados a partir da combinação com as tolerâncias de outros sistemas que influenciam no cobrimento final. A possibilidade de alterar os níveis de controle, relacionados às tolerâncias de execução, são permitidos perante comprovação da conformidade dos demais sistemas.

O processo construtivo precisa de supervisão constante para liberação das etapas seguintes, como meio de não interferir no cobrimento final. Como exemplo, a CRSI (2018) salienta que espaçadores não tem objetivo de apoiar o mangote para concretagem, reiterando o cuidado com o processo construtivo.

Além das atividades de controle propostas, a indicação de responsável técnico para a inspeção e supervisão de todas as etapas executivas da estrutura se faz necessária como forma de garantir o controle de execução, independentemente do nível de controle.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como objetivo principal o estudo de uma diretriz para orientar o uso de espaçadores em lajes maciças de concreto armado por meio de análise de um dos fatores principais que influenciam na obtenção do cobrimento, a deformação plástica das armaduras submetidas às cargas de execução.

Este estudo foi instigado a partir da publicação de diversos trabalhos que indicam que a espessura de cobrimento não é alcançada após a execução da estrutura, mesmo com intervenção e aplicação de metodologia de posicionamento de espaçadores.

Apesar da norma de execução NBR 14931 (ABNT, 2004) já indicar o uso de passarelas para evitar o tráfego de operários e equipamentos sobre a armadura durante a execução, nenhum levantamento *in loco* da execução de estruturas de concreto aqui descrito ou consultado aponta o uso deste procedimento na execução.

Assim, prever deformações e compará-las com as indicações normativas de projeto para o cobrimento parece ser uma alternativa mais real, considerando o tráfego de operários sobre a armadura, uma vez que a recomendação normativa não é uma realidade vista em obra.

7.1 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos e as análises realizadas ao longo desta pesquisa dizem respeito exclusivamente às amostras avaliadas. Fica evidente que os resultados atingidos em apenas uma pesquisa não podem ser tomados como conclusivos acerca de espessuras de cobrimento executadas. Salienta-se que somente a análise de deformação plástica não garante a espessura de cobrimento por completo.

Através da averiguação efetuada na presente pesquisa foi possível concluir que:

- a) lajes com armaduras compostas por menores diâmetros e com amarração parcial (menos pontos de amarração) tendem a sofrer maior deformação plástica, assim como quando é utilizado um padrão de distribuição de espaçadores com menores densidades. Sob mesma condição de carga e amarração, quanto maior o afastamento entre barras na malha de armadura e quanto maior for a altura do espaçador, maior será a deformação plástica e o efeito prejudicial sobre o cobrimento de armadura;

- b) a necessidade de um padrão de distribuição exequível e de fácil entendimento em obra é essencial para o correto posicionamento dos dispositivos. Sugerir um método inspirado na amarração de armadura para a colocação dos espaçadores mostrou-se uma alternativa adequada, ao considerar as recomendações internacionais de distribuição escalonada;
- c) o software SAP 2000 mostrou-se capaz de estimar deformações plásticas, desde que se reproduza as características do aço, como tensão de escoamento do material e definição de rótulas plásticas, uma vez que o comportamento das malhas foi semelhante ao verificado experimentalmente, sendo a maior diferença entre resultados computacionais e experimentais de 1,48 mm;
- d) os níveis de controle para tolerância de execução indicaram ser um bom parâmetro para análise das malhas e através dos mapeamentos, foi possível estabelecer indicações de uso dos espaçadores. Ao identificar que diversos sistemas (armaduras, fôrmas, espaçador) influenciam na obtenção do cobrimento e no cumprimento das tolerâncias de execução, as indicações de tolerâncias individuais para cada sistema devem estar inter-relacionadas nas normas correspondentes, como as de projeto e de execução;
- e) a definição de níveis de controle da execução da estrutura, com seus correspondentes limites para a deformação plástica das armaduras, permitiu a identificação de configurações de diâmetro de barra, abertura de malha, forma de amarração, disposição e espaçamento máximo dos espaçadores que atendem a esses limites, como mostrado nos Quadros 7 a 10. Por exemplo, malhas com barras de diâmetro 5,0 mm mostraram-se críticas ao não atender ao critério de controle (de execução) alto, independentemente da abertura da malha, tipo de amarração, disposição ou afastamento entre espaçadores.

É necessário evidenciar que o cobrimento de armadura é um fator essencial para a previsão de vida útil e alcance do desempenho, porém segue negligenciado em especificação de projeto e em canteiro de obra.

Com a estimativa de deformação plástica é possível prever o comportamento da armadura indicada em projeto e associá-la às tolerâncias de execução da obra. Esta previsão somente é possível quando acompanhada de registro de qualidade e acompanhamento de outros sistemas intervenientes. Ao considerar o método usual de execução, com malhas parcialmente amarradas, fôrmas com chapas de madeira, uso de espaçadores plásticos e contato dos operários

com a armadura, parece ser mais indicado o uso de 15,0 mm para tolerância de projeto, para atendimento de mais configurações para as deformações plásticas propostas.

Notabiliza-se a necessidade de propor atividades de controle de execução em relação às tolerâncias de execução preconizadas em norma de projeto e execução para orientação e supervisão.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As seguintes sugestões para trabalhos futuros são apresentadas como forma de maior abrangência do tema e melhoria nas etapas de especificação e execução do cobrimento de armadura:

- a) efetuar simulações para diferentes tipos de lajes, como lajes cogumelo, além de considerar os demais elementos estruturais, como vigas e pilares, utilizando os fatores influentes no cobrimento apresentados nesta pesquisa com adição de novos parâmetros;
- b) realizar simulações e análise de armadura superior em lajes já que o cobrimento é indicado para todas as faces do elemento estrutural para verificação de funcionamento estrutural;
- c) expandir as diretrizes propostas para execução em obra, observando a metodologia de amarração das malhas e de distribuição de espaçadores, associando com os cobrimentos mínimos obtidos;
- d) aprofundar o conhecimento em relação à influência do sistema de fôrmas na tolerância de execução para análise de cobrimento quanto ao desnivelamento, qualidade das chapas e escoramentos;
- e) mapear processos construtivos, analisando as fontes de erro de espessura de cobrimento como forma de refinar o controle de execução e relacionar aos níveis de tolerância;
- f) realizar estudo com abordagem de cobrimentos superiores ao especificado em projeto, para análise na influência do funcionamento estrutural do elemento, considerando as tolerâncias de execução normativas;
- g) sintetizar os dados gerados por diferentes pesquisas dentro do tema como forma de melhorar as prescrições normativas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMATTI, D. S. **Análise da eficiência de espaçadores no concreto armado: impacto da corrosão por íons cloreto em diferentes condições de exposição.** 130 f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2016.

AGUIAR, J. E. de. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis.** 168 f. Dissertação de Mestrado. Programada de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

ALZYOUD, S. **Effect of reinforcement spacers on concrete microstructure and durability.** 2015, 182 f. Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, London, 2015.

ALZYOUD, S; WONG, H. S; BUENFELD, N. R. **Influence of reinforcement spacers on mass transport properties and durability of concrete structures.** Cement and Concrete Research. vol 87. 31-44, 2016.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 201** Guide to durable concrete: reported by ACI Committee 201. ACI Materials Journal, 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318.** Building Code Requirements for Structural Concrete. ACI Committee, 2014.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 117.** Specifications for Tolerances for Concrete Construction and Materials. ACI Committee, 2014.

ANDRADE, J. J. O. **Contribuição da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos.** 2001, 256 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ANGST, U. M; GEIKER, M. R; MICHEL, A; GEHLEN, C; WONG, H. ISGOR, O. B; ELSENER, B; HANSSON, C. M; FRANÇOIS, R; HORNBOSTEL, K; POLDER, R; ALONSO, M. C; SANCHEZ, M; CORREIA, M.J; CRIADO, M; SANGÜÉS, A; BUENFELD, N. **The steel-concrete interface.** Materials and Structures. v. 153. 143, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL (ABECE). **Recomendações para elaboração de projetos estruturais de edifícios em concreto.** São Paulo, 2008.

Disponível em: http://abece.com.br/WEB/download/pdf/Recomendacoes_concreto.pdf.

Acesso em: Abril, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931:** Execução de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15575:** Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3600**: Concrete structures. Sydney: Standards Australia Limited, 2009.

AWOYERA, P. O; ARUM, C. AKINWUMI, I. I. **Significance of concrete cover to reinforcement in structural elementar varying temperatures**. InternacionaI Journal of Scientific & Engineering Research. v. 5, n. 6, p. 1120-1124. 2014.

BARBOSA, M. C. **Estimativa da vida útil de estrutura de concreto armado imediatamente após sua execução**. 170 f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2009.

BAROGHEL-BOUNY, V; CAPRA, B; LAURENS, S. Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. Ed. J.P. 615 p. Cap.9. tradução: O. Cascudo. São Paulo: IBRACON, 2014.

BARROS, T. C. M. F. **Estudo experimental da influência da interface espaçador/concreto na corrosão de armaduras desencadeada por ions cloreto**. 130 f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2018.

BENEDETTI, K. **Sensibilidade da segurança de vigas e lajes de concreto armado a erros de execução**. 2013. 198 f. (Trabalho de conclusão de curso - TCC) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

BORBA JÚNIOR, J. C. **Agressividade ambiental em zona de atmosfera marinha: estudo da deposição de cloretos e sua concentração em concretos na região sudeste**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federam do Espírito Santo. Vitória, 2011.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). **BS 7973-1**: Spacers and chairs for steel reinforcement and their specification – Part 1: Product performance requirements. UK, 2001.

_____. **BS 7973-2**: Spacers and chairs for steel reinforcement and their specification – Part 2: Fixing and application of spacers and chairs and tying of reinforcement. UK, 2001.

_____. **BS 8110-1**: Structural use of concrete – Code of practice for design and construction. UK, 1997.

_____. **BS 8500-1: Concrete Complementary British Standard to BS EN 206-1 – Part 1: Method of specifying and guidance for the specifier.** UK, 2006.

BUREAU OF INDIAN STANDARDS. **IS 456: Plain and Reinforced Concrete – Code of Practice.** New Delhi: Bureau of Indian, 2000.

CAMPOS, A. M. R. **Estudo da agressividade do ar atmosférico de Fortaleza/CE.** 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2016.

CAMPOS, D. **Cobrimento de armadura em estruturas de concreto armado: análise comparativa entre valores antes, durante e depois da concretagem.** 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

CAMPOS FILHO, A. **Projeto de lajes maciças de concreto armado.** Notas de aula, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://chasqueweb.ufrgs.br/~americo/eng01112/lajes.pdf>. Acesso em setembro de 2018.

CLARK, L. A. SHAMMAS-TOMA, M. G. K.; SEYMOUR, D. E.; PALLETT, O. F.; MARSH, B. K. **How can we get the cover we need?** The Structure Engineer. Journal of the Institution of Structural Engineers. Volume 75, Nº 17. UK, 2007.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (CEB). **Bulletin d'Information No. 201 — Spacers, chairs and tying of steel reinforcement.** Lausanne: Comité Euro-International du Béton, 1990.

COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN (CPH). **EHE 08 – Instrucción Española del Hormigón Estructural. Capítulo XIII – Ejecución.** España, 2008.

CONCRETE REINFORCING STEEL INSTITUTE (CRSI). **Manual of Standard Practice.** 29 ed. 196 p. USA, 2018.

CONCRETE REINFORCING STEEL INSTITUTE (CRSI). **RB4.1.** CRSI Standard for Supports for Reinforcement Used in Concrete. 25p. USA, 2016.

CUI, Z; ALIPOUR, A. **Concrete cover cracking and service life prediction of reinforced concrete structures in corrosive environments.** Construction and Building Materials. v. 159. 652-671, 2018.

DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul.** 1988. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

DAL MOLIN, D. C. C; MASUERO, A. B; ANDRADE, J. J. O; POSSAN, E; MASUERO, J. R; MENNUCCI, M. M. Contribuição à Previsão da Vida Útil de Estruturas de Concreto In: KAZMIERCZAK, C. S., FABRICIO, M. M (Org). **Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras: Materiais e Sustentabilidade.** São Carlos: Scienza, 2016.

DANICA, G. **Concrete cover to reinforcement according to Eurocode**. Zbornik Radova Građevinskog Fakulteta. Vol 27. p. 41-56. Serbia, 2015.

DEVI, V. S. **Durability properties of multiple blended concrete**, In: Construction and Building Materials. v. 179. 649-660, 2018.

EUROPEAN STANDARD. **EN 206-1:2000**. Part 1: Specification, performance, production and conformity. Brussels, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings. **EN 1992-1.1**. Brussels: CEN, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **ENV 13670-1**: Execution of concrete structure: Part 1 – Geral. Brussels, 2000.

FREIBERGER, L. G. **Cobrimento de armaduras em estruturas de concreto armado: análise comparativa entre os valores especificados em projeto e os executados em obras no município de Santa Rosa**. 63 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUI. Santa Rosa, 2015.

GHIGGI, A. C. **A influência da distribuição de espaçadores no cobrimento de armaduras em estruturas de concreto armado**. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Curso de Engenharia Civil. Universidade do Vale do Taquari. Lajeado, 2018.

GUZMÁN, S; GÁLVEZ, J. C. **Modelling of concrete cover cracking due to non-uniform corrosion of reinforcing steel**. In: Construction and Building Materials. v. 155. 1063-1071, 2017.

HALFEN. **Spacers**. Catálogo técnico. Disponível em: <https://www.halfen-moment.com/products/reinforcement-product/spacer/>. Acesso em 15/10/2019.

HELENE, P. **Vida Útil das Estruturas de Concreto**. In: CONGRESSO IBERO AMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 4, CONGRESSO DE CONTROLE DA QUALIDADE. v. 1, p. 1-30. Porto Alegre. Proceedings. Porto Alegre: COM PAT-97, 1997.

HELENE, P. Introdução. In: RIBEIRO, D. V. (Org.). **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado**: Teoria, Controle e Métodos de Análise. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

INSTITUTO BOLIVIANO DE NORMALIZACIÓN Y CALIDAD (IBNORCA). **CBH 87**: Hormigón armado. La Paz, 1987.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS. **UNIT 1050**: Proyecto y ejecución de estructuras de hormigón em masa o armado. Uruguay, 2005.

KHALAF, J; HUANG, Z. **The bond behaviour of reinforced concrete members at elevated temperatures**. Fire Safety Journal. v. 103. 19-33, 2019.

LORENSINI, R. V. **Avaliação probabilística da deterioração de estruturas em concreto armado**. Dissertação. 2006. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

MARAN, A. P. **Análise da influência da distribuição de espaçadores na garantia da espessura de cobrimento especificada em lajes de concreto armado**. 123 f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2015.

MARAN, A. P.; MENNA BARRETO, M. F. F.; ROHDEN, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C.; MASUERO, J. R. **Assessment of cover to reinforcement in slabs using different spacer and tying distances**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. v. 8, n. 5, p. 625-643, 2015.

MARSH, B. **Specification and achievement of cover to reinforcement**. In: Advanced Concrete Technology. Set. Vol 1, Pages 1-9, 2003.

MATHER, B. **Concrete durability**. Cement & Concrete Composites. Vol 26. 2004.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. **Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto**. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Ibracon, 2008.

MEDEIROS, M. H. F.; ROCHA, F. C.; MEDEIROS-JUNIR, R. A.; HELENE, P. **Corrosion potential: influence of moisture, water-cement ratio, chloride content and concrete cover**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. v. 10, n. 4, p. 864-885, 2017.

MENESES, R. S.; MORO, J. M.; AVELDAÑO, N. F.; ORTEGA, N. F. **Influencia del espesor del recubrimiento de elementos de hormigón armado expuestos a procesos de corrosión y sometidos a cargas externas**. Revista ALCONPAT, v. 6, n. 2, p. 129-144, 2016.

MENNA BARRETO, M. F. F. **Avaliação de desempenho de espaçadores plásticos: proposição e avanço de métodos de avaliação**. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2014.

MENNA BARRETO, M. F. F.; MARAN, A. P.; DAL MOLIN, D. C. C.; MASUERO, J. R.; ALVES, R. Z. **Influência do diâmetro da armadura no cobrimento final em lajes de concreto armado**. Anais do Congresso Brasileiro de Concreto, 56, 2014, Natal. São Paulo: IBRACON, 2014.

MENNA BARRETO, M. F. F.; MARAN, A. P.; DAL MOLIN, D. C. C.; MASUERO, J. R. **Cover to steel in reinforced concrete structures and their spacers: Concrete cover thickness and plastic spacers**. 1 ed., LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018.

MIGLIAVACCA, D. M.; TEIXEIRA, E. C.; GERVASONI, F.; CONCEIÇÃO, R. V.; RODRIGUEZ, M. T. R. **Characterization of wet precipitation by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) in the metropolitan area of Porto Alegre, Brazil**. Journal of Hazardous Materials. Vol 171. p 230-240. Brazil, 2009.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **NR 18: Condições e meio ambiente de trabalho na indústria da construção**. 2011.

MONTEIRO, A. V; GONÇALVES, A; GULIKERS, J; JACOBS, F. Basis for the statistical evaluation of measured cover depths in reinforced concrete structures. In: BEUSHAUSEN, H; LUCO, L. F. (Orgs.). **Performance-based specifications and control of concrete durability**. 1 ed. Springer, 2015. Cap.9, p. 206-234.

MOTA, J. M; BARBOSA, F. R; COSTA E SILVA, A. J; FRANCO, A. P. G; CARVALHO, J. R. **Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido ao ataque de íons cloreto**. Anais do Congresso Brasileiro de Concreto, 54, 2012, Maceió. São Paulo: IBRACON, 2012.

MUSLIM, F; WONG, H. S; BUENFELD, N. R. **The interface bond strength between reinforcement spacer and concrete**. In: Young Researchers' Forum IV – Innovation in Construction Materials. 85-88, UK, 2018.

NEW ZEALAND STANDARD. **NZS 3101-1**. Concrete structures standard. Part 1 – The design of concrete structures. Wellington, 2006.

NEW ZEALAND STANDARD. **NZS 3109**. Concrete construction. Wellington, 1997.

NORMA TÉCNICA DE EDIFICACIÓN **E.060 CONCRETO ARMADO**. Peru, 2009.

NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN (NABau). **DIN 1045-1**. Concrete, reinforced and prestressed concrete structures – Part 1: Design and construction. Berlin, 2008.

NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN (NABau). **DIN 4102**. Fire testing to building material. Berlin, 1998

NOORTWIJK, J. M. V.; FRANGOPOL, D. M. Two probabilistic life-cycle maintenance models for deteriorating civil infrastructures. **Probabilistic Engineering Mechanics**, v. 19, p. 345-359, 2004.

OLIVEIRA, A. B. **Cobrimento de armaduras de estruturas de concreto armado: levantamento de critérios adotados na utilização de espaçadores**. Trabalho de Conclusão de Curso. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2014.

OLIVEIRA, G. S. **Avaliação da influência da distribuição de espaçadores e da tolerância de execução no cobrimento de concreto às armaduras de lajes: análise em obra**. Trabalho de Conclusão de Curso. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2018.

OTIENO, M.; IKOTUN, J.; BALLIM, Y. **Experimental investigations on the influence of cover depth and concrete quality on time to cover cracking due to carbonation-induced corrosion of steel in RC structures in an urban, inland environment**. In: Construction and Building Materials. v. 198. 172-181, 2019.

PACHECO, F. **Investigação da relação entre os parâmetros de projeto das estruturas de concreto armado visando à durabilidade**. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Vale do rio dos Sinos – UNISINOS. São Leopoldo, 2016.

PALM, V. **Análise experimental da influência da distribuição de espaçadores em lajes de concreto armado, quanto à espessura de cobrimento.** 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2017.

PEIXOTO, B. L. F; GOMES, M. de L. B. **Ganhos em produtividade decorrente de inovação tecnológica na construção civil: o uso dos distanciadores plásticos no sub-setor de edificações.** XXVI ENEGEP. Fortaleza, 2006.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano.** 2010. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PROCEQ SA. **Profoscope: Instruções Operacionais – Detector de barras de reforço e medidor da camada.** São Paulo, 2008.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. **LNEC E469:** Espaçadores para armaduras de betão armado. Lisboa, 2006.

RIBEIRO, D.V. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: RIBEIRO, D. V. (Org.). **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado:** Teoria, Controle e Métodos de Análise. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

ROSTAM, S. **Service life design of concrete structures** – A challenge to designers as well as to owners. Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing). Vol 6, no 5. Denmark, 2005.

SAJIDH, M. M; SUHOOTHI, A. C. M. **Evaluation of concrete cover distribution pattern for RCC slab to achieve its designed requirements.** International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. v. 7. n. 9, 148-156, 2017.

SHAW, C. **The long term durability of plastic spacers in reinforced concrete: a case study.** In: International Congress on Concrete. 7, 2008.

SILVA, O. S. P. **Cobrimento de armaduras em estruturas de concreto armado: análise comparativa entre o valor especificado em projeto e o em execução em obras na cidade de Porto Alegre.** 86 f. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

TANG, S.W; YAO, Y; ANDRADE, C; LI, Z.J. **Recent durability studies on concrete structure.** Cementand Concrete Research. v. 78. 143-154, 2015.

TAKATA, L. T. **Aspectos executivos e a qualidade de estruturas de concreto armado: estudo de caso.** 2009. 149 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

TANESI, J; DA SILVA, M. G; GOMES, V. **Guidelines for the development of concrete performance-based specifications in Brazil.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 5, n. 2, p. 219-228, 2012.

TUUTTI, K. **Corrosion of Steel in Concrete.** Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm, Suecis, 1982. 469 p.

ÜNLÜĞLU, E; TOPÇU, I. B; YALAMAN, B. **Concrete cover effect on reinforced concrete bars exposed to high temperatures.** Construction and Building Materials, v. 21. 1155-1160, 2007.

VAQUERO, J. **Separadores para hormigón estructural.** Zuncho n.13. Septiembre, 2007.

WEBER, L. F. L. **Cobrimento de armadura em estruturas de concreto armado: análise comparativa entre os valores projetados e executados nas obras do Vale do Taquari.** 2014. 97 f. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2014.

YALCINER, H; EREN, O. SENSOY, S. **An experimental study on the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of concrete cover, strength and corrosion level.** Cement and Concrete Research. Vol 42. 643-655, 2012.

ZEIN-ALABIDEEN, H. M. **Concrete in the hot and severe environment of the Arabian Gulf Region.** In: Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES, 26.,2001, Singapore. Singapore Concrete Structures, 119-131, 2001.

ZHANG, Y; SU, R. K. L. **Corner cracking model for non-uniform corrosion-caused deterioration of concrete covers.** Construction and Building Materials. Vol 234. 117410, 2020.

APÊNDICE A: Relatório de busca

O relatório de busca apresentado como exemplo foi executado pela plataforma Compendex, com busca inicial por palavra-chave *concrete cover* ou *reinforcement cover* (cobrimento), englobando os campos de assunto, título e resumo, onde foram encontrados os seguintes resultados:

- a) *Concrete cover*: 16.022 arquivos
- b) *Reinforcement cover*: 15.254 arquivos

Após a combinação entre palavras-chave deste trabalho, como deformação plástica e espaçadores junto com cobrimento, registra-se os seguintes trabalhos encontrados:

- a) Busca combinada *concrete cover* + *spacer* (cobrimento + espaçador): 23 arquivos
1. **Quality assurance of concrete structures analysis of in-situ concrete cover**
Sirivivatnanon, V. (CSIRO Div of Building, Sydney); Cao, H.T. Source: *Transactions of the Institution of Engineers, Australia. Civil engineering*, v CE33, n 2, p 111-118, Apr 1991
 2. **Case 2: Lacking concrete cover in joints between precast elements - Delivery or assembly defect?** (Fall 2: Fehlende U̇berdeckung in der Stoßfuge bei Fertigteilen - Liefer- oder Einbaumangel?)
Krell, Jürgen (Krell-Consult, Hilden, Germany) Source: *Betonwerk und Fertigteil-Technik/Concrete Plant and Precast Technology*, v 74, n 2, p 129-130, 2008 Language: German
 3. **Spacers for elements made of textile reinforced concrete**
Hartung, Ilko (Institute of Joining and Welding (Ifs), TU Braunschweig, Germany); Böhm, Stefan; Dilger, Klaus; Mott, Rebecca; Brameshuber, Wolfgang Source: *3rd International fib Congress and Exhibition, Incorporating the PCI Annual Convention and Bridge Conference: Think Globally, Build Locally, Proceedings*, 2010, *3rd International fib Congress and Exhibition, Incorporating the PCI Annual Convention and Bridge Conference: Think Globally, Build Locally, Proceedings*
 4. **Influence of reinforcement spacers on mass transport properties and durability of concrete structures**
Alzyoud, S. (Concrete Durability Group, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, London; SW7 2AZ, United Kingdom); Wong, H.S.; Buenfeld, N.R. Source: *Cement and Concrete Research*, v 87, p 31-44, September 1, 2016
 5. **Corrosion of stainless steel fittings in concrete barrages**
Erdmann, Brenton (SA Water, Australia); Vince, Paul Source: *50th Annual Conference of the Australasian Corrosion Association 2010: Corrosion and Prevention 2010*, p 776-787, 2010, *50th Annual Conference of the Australasian Corrosion Association 2010: Corrosion and Prevention 2010*

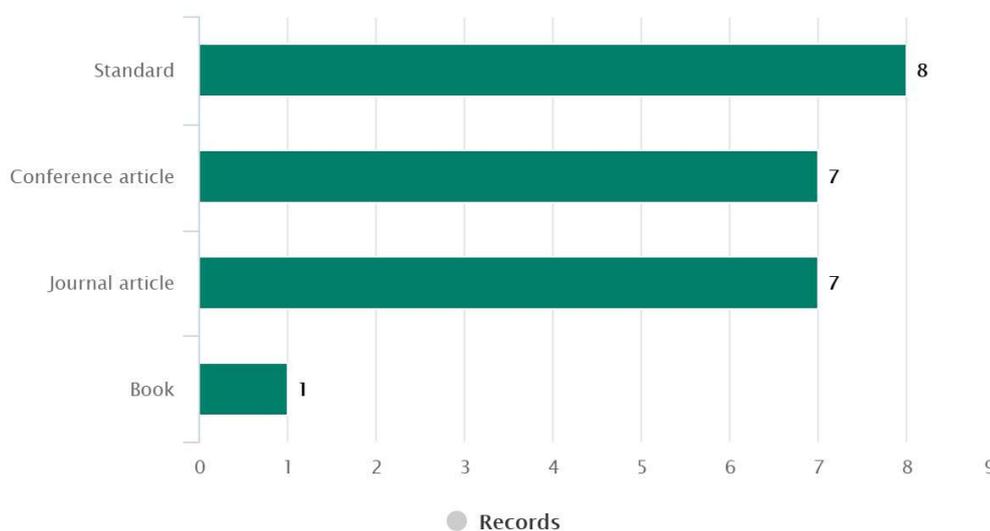
6. **Spacers for reinforcement**
Anon Source: *Concrete (London)*, v 28, n 3, p 27-30, May-Jun 1994
7. **Cover to reinforcement - Getting it right**
Shaw, C. Source: *Proceedings of the International Conference on Application of Codes, Design and Regulations*, p 147-154, 2005, *Application of Codes, Design and Regulations - Proceedings of the International Conference*
8. **Standard Specification for Compression Testing Machine Requirements for Concrete Masonry Units, Related Units, and Prisms**
Source: *Standard Specification for Compression Testing Machine Requirements for Concrete Masonry Units, Related Units, and Prisms*, 2016
Status: Inactive - Historical, revision
9. **Standard Specification for Compression Testing Machine Requirements for Concrete Masonry Units, Related Units, and Prisms**
Source: *ASTM International*, 2010
Status: Inactive - Historical, new
10. **ORTHOGONAL DETECTION TECHNIQUE FOR DETERMINATION OF SIZE AND COVER OF EMBEDDED REINFORCEMENT.**
Tam, C.T. Source: *Journal of the Institution of Engineers, Malaysia*, v 22, p 6-16, Jun 1977
11. **Cover to reinforcement - Getting it right**
Shaw, Chris Source: *Structural Engineer*, v 85, n 4, p 31-35, February 20, 2007
12. **A field study of critical chloride content in reinforced concrete with blended binder**
Tang, L. (Division of Building Technology, Chalmers University of Technology, S-412 96 Gothenburg, Sweden); Utgenannt, P. Source: *Materials and Corrosion*, v 60, n 8, p 617-622, August 2009
13. **Keep your cover with side form spacers**
Source: *Aberdeen's Concrete Construction*, v 42, n 6, p 513, Jun 1997
14. **Standard Specification for Compression Testing Machine Requirements for Concrete Masonry Units, Related Units, and Prisms**
Source: *Standard Specification for Compression Testing Machine Requirements for Concrete Masonry Units, Related Units, and Prisms*, 2019
Status: Active - Revision
15. **Standard Specification for Compression Testing Machine Requirements for Concrete Masonry Units, Related Units, and Prisms**
Source: *Standard Specification for Compression Testing Machine Requirements for Concrete Masonry Units, Related Units, and Prisms*, 2018
Status: Inactive - Historical, revision
16. **Standard Specification for Compression Testing Machine Requirements for Concrete Masonry Units, Related Units, and Prisms**
Source: *ASTM International*, 2011
Status: Inactive - Historical, revision
17. **Experimental study on mix design of chloride resistant cementitious spacers**
Huang, Chen (School of Civil Engineering and Transportation, South China University

- of Technology, Guangzhou; 510640, China); Guo, Wenying; Yang, Yibo; Zhao, Hui; Li, Zhenjie; Li, Jiankuan; Bao, Jianyong; Wang, Hengchang Source: *Key Engineering Materials*, v 629-630, p 351-357, 2015
18. **Spacers and chairs for steel reinforcement and their specification. Fixing and application of spacers and chairs and tying of reinforcement**
Source: *Spacers and chairs for steel reinforcement and their specification. Fixing and application of spacers and chairs and tying of reinforcement*, p 1-21, October 16, 2001
Status: Active - Confirmed
 19. **Spacers and chairs for steel reinforcement and their specification. Product performance requirements**
Source: *Spacers and chairs for steel reinforcement and their specification. Product performance requirements*, p 1-17, October 16, 2001
Status: Active - Confirmed
 20. **Standards for spacers - what standards?**
Crotaz, Anthony (Hy-Ten Reinforcement Ltd) Source: *Concrete (London)*, v 30, n 2, p 21-22, Mar-Apr 1996
 21. **DEVELOPMENT OF 715 MM DIA. VIBROFORM PILES FOR THE DOCKLANDS LIGHT RAILWAY.**
Anon Source: *Ground Engineering*, v 19, n 3, p 22-23, Apr 1986
 22. **Execution of steel structures and aluminium structures.** Technical requirements for cold-formed structural steel elements and cold-formed structures for roof, ceiling, floor and wall applications (Exécution des structures en acier et des structures en aluminium - Partie 4 : Exigences techniques pour éléments et structures en acier formés à froid pour applications en toiture, plafond, paroi verticale et plancher)
Source: *Execution of steel structures and aluminium structures. Technical requirements for cold-formed structural steel elements and cold-formed structures for roof, ceiling, floor and wall applications*, p 1-99, December 19, 2018
Status: Active - Definitive
 23. **Advanced Textile Materials, Part 1**
Qian Xiaoming; Liu Huawu Source: *Trans Tech Publications Ltd*, 2012 Publication date: August 08, 2012
Database: Knovel (www.knovel.com)

A classificação de tipos do documento e o país de origem estão expostos respectivamente nas figuras a seguir.

Search: (((concrete cover) WN ALL) AND ((spacer) WN ALL))

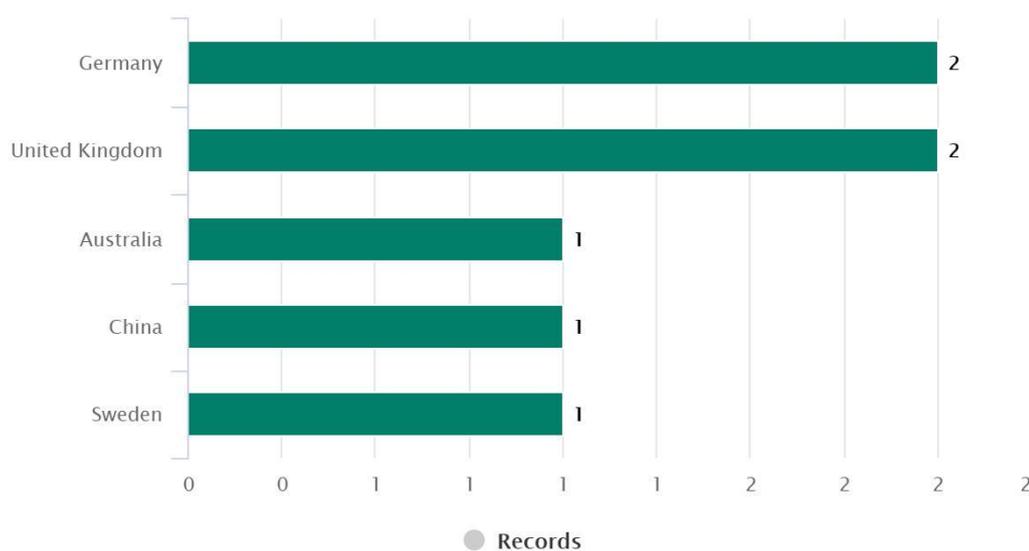
Click to limit your results



provided by Engineering Village ©2020 Reed Elsevier

Search: (((concrete cover) WN ALL) AND ((spacer) WN ALL))

Click to limit your results



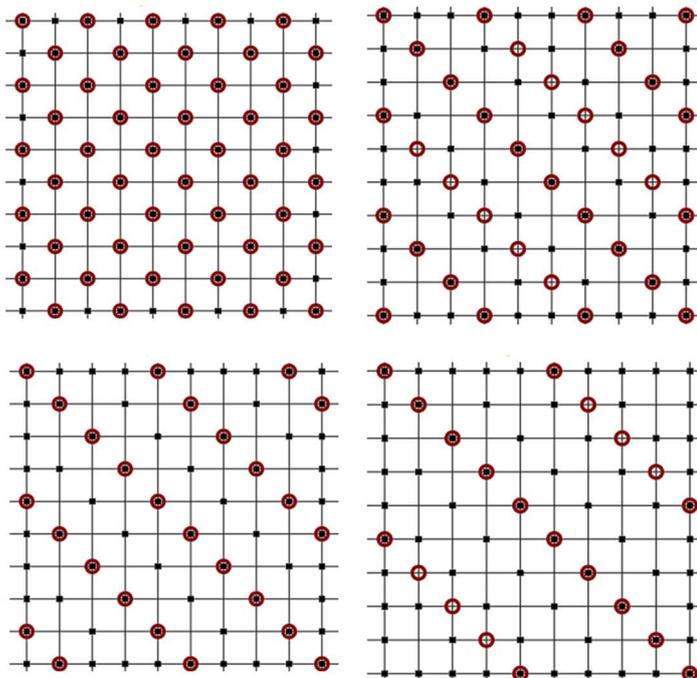
provided by Engineering Village ©2020 Reed Elsevier

Relatório de busca realizado em janeiro/2020.

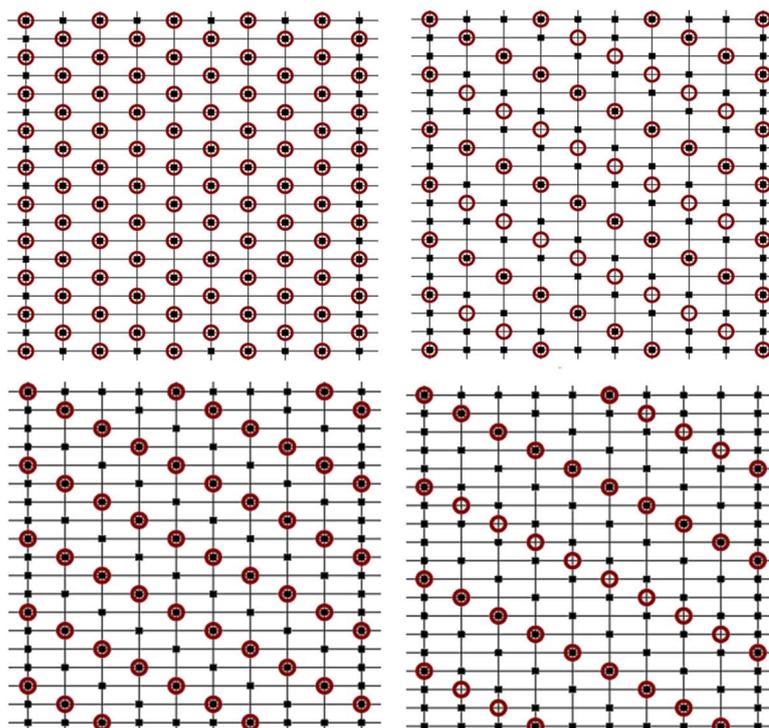
APÊNDICE B:

Distribuição de espaçadores (máximo de 40 cm; 60 cm; 80 cm; 100 cm, respectivamente) para as malhas com todas as barras apoiadas por espaçadores.

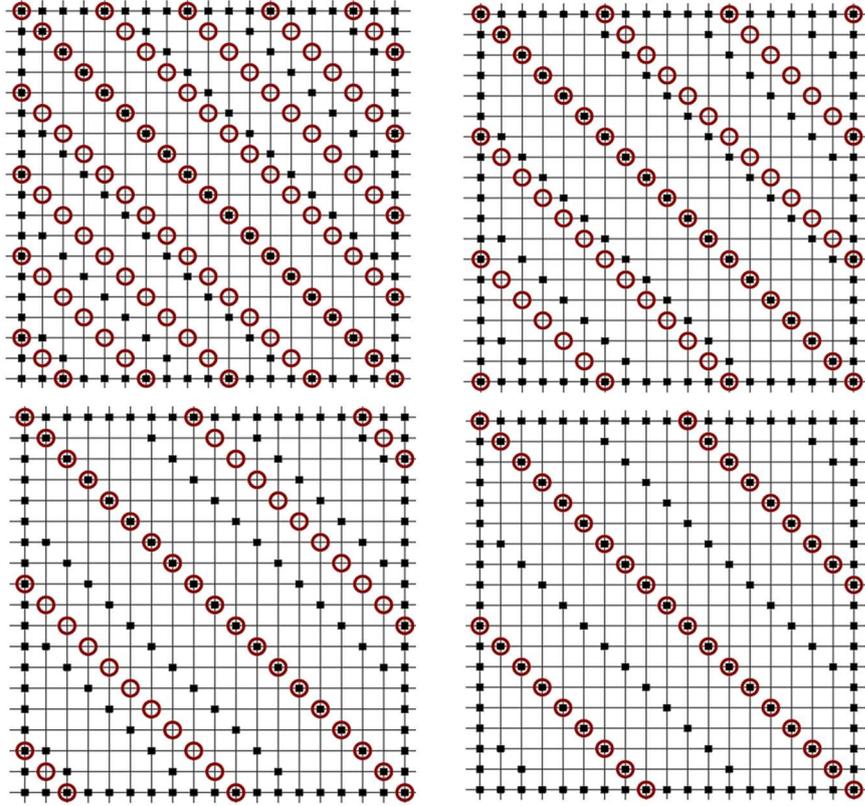
- MALHA 20X20 cm



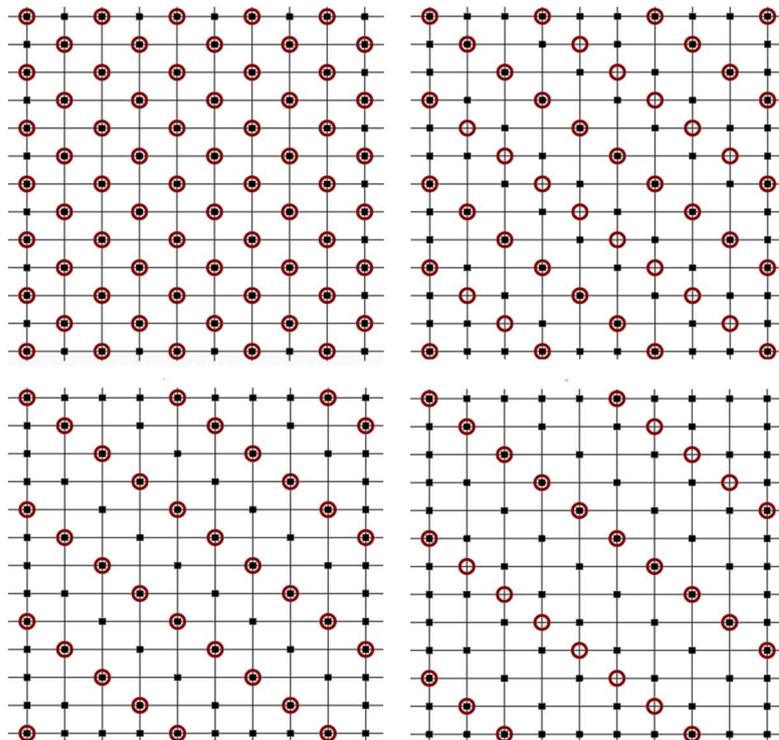
- MALHA 10X20 cm



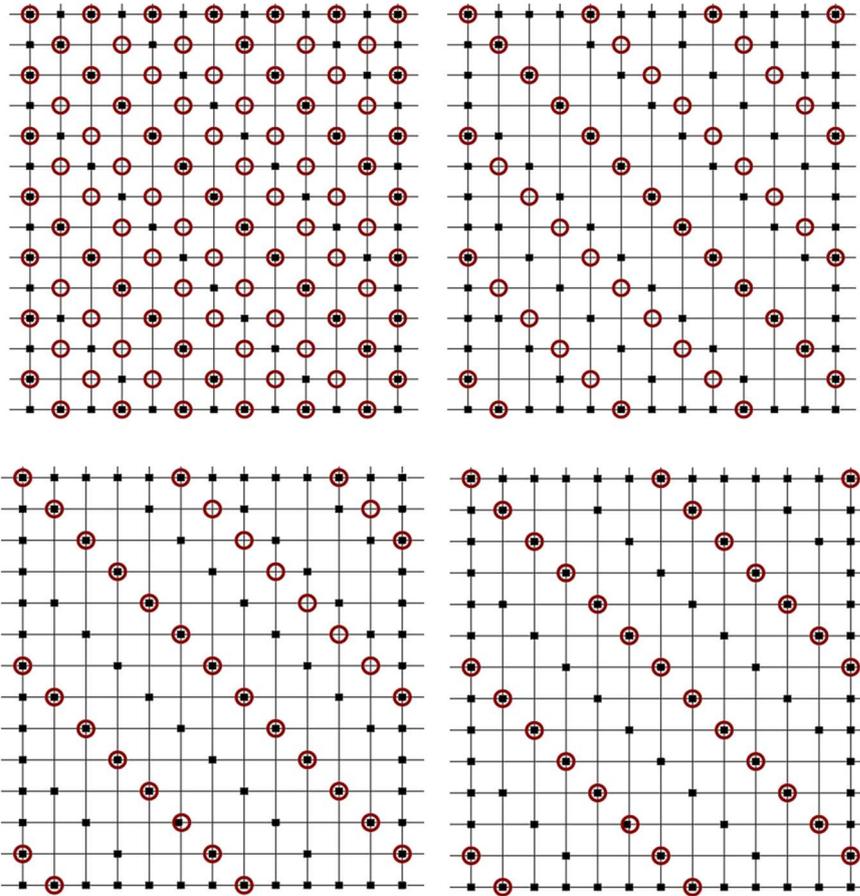
- MALHA 10x10 cm



- MALHA 20X15 cm



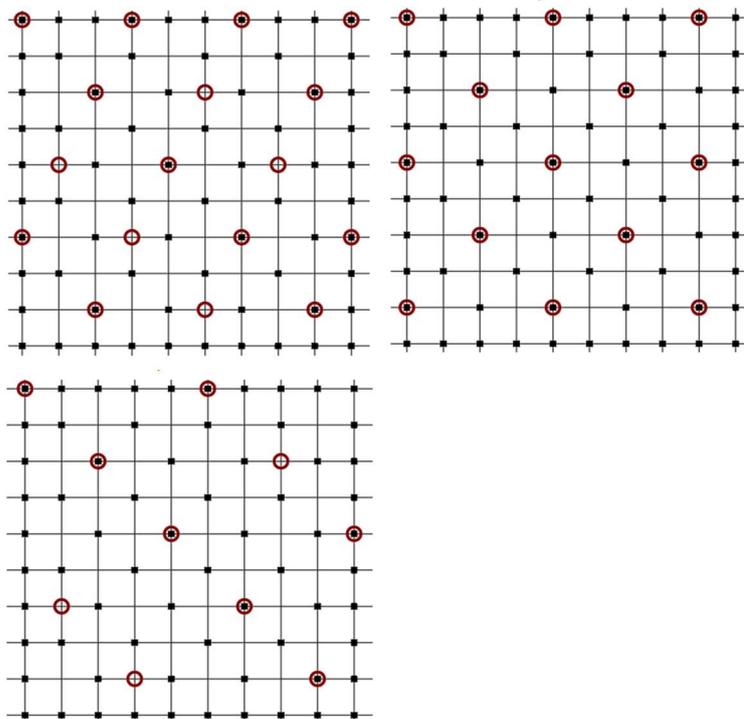
- MALHA 15X15 cm



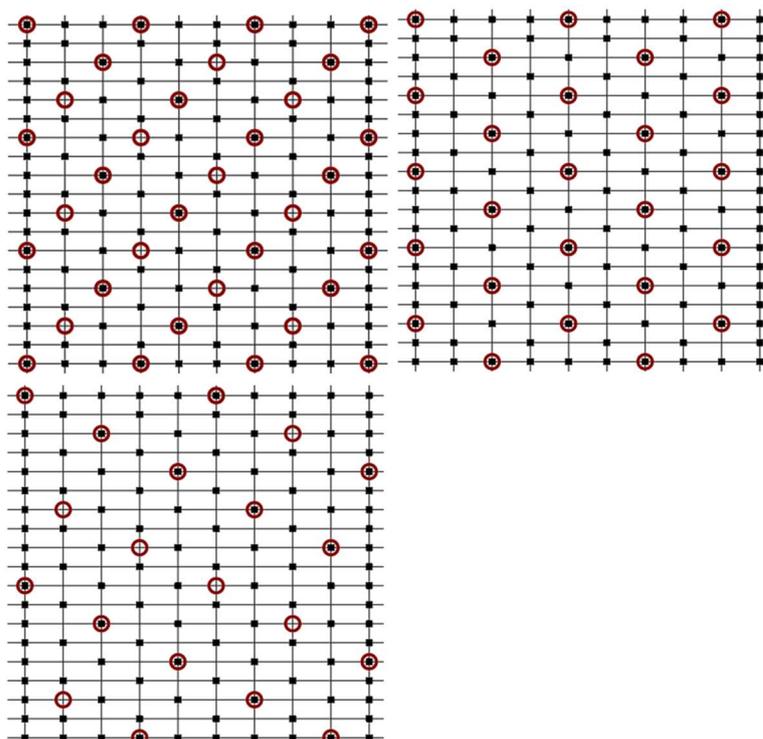
APÊNDICE C:

Distribuição de espaçadores (máximo de 40 cm; 60 cm; 80 cm; 100 cm, respectivamente) para as malhas com as barras alternadas apoiadas por espaçadores.

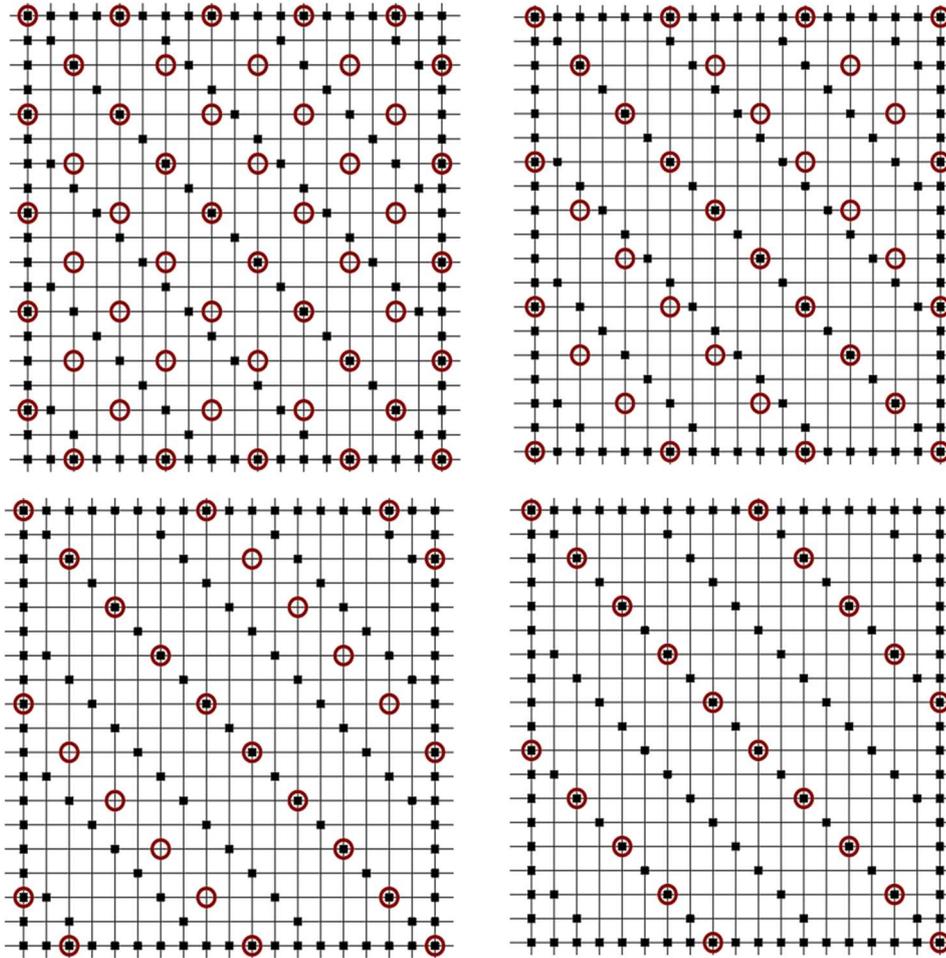
- MALHA 20X20 cm



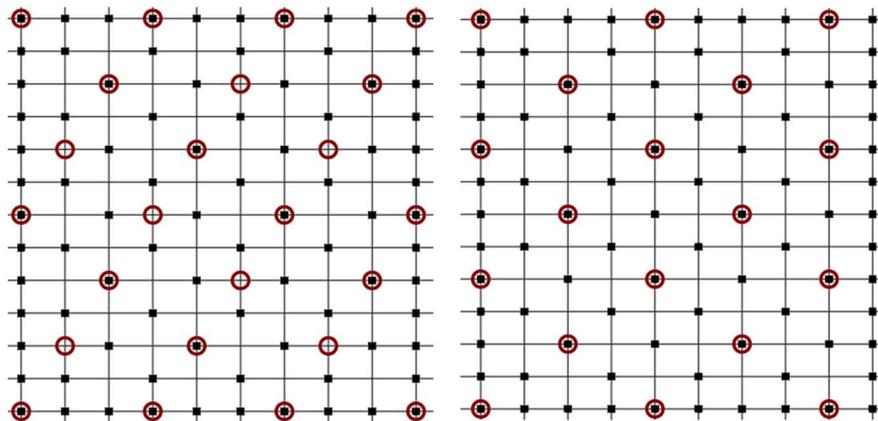
- MALHA 10x20 cm



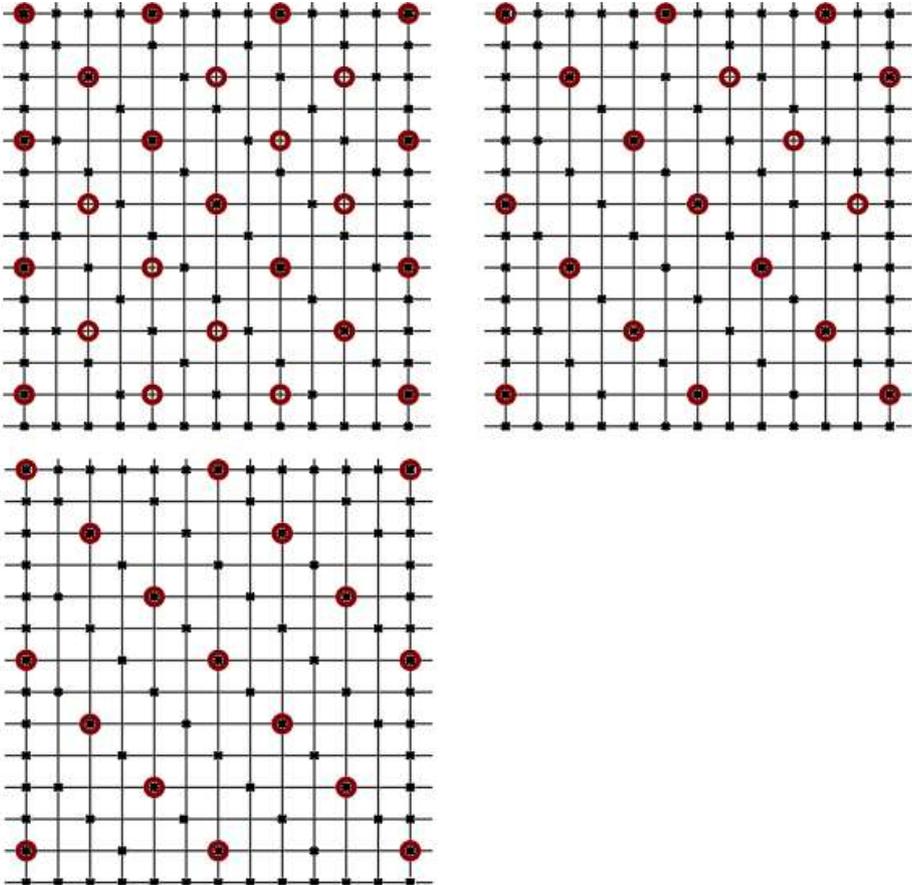
- MALHA 10x10 cm



- MALHA 20x15 cm



- MALHA 15X15 cm



APÊNDICE D: Planilha de análise de deformação plástica
 Malha 10 x 20 cm; diâmetro 5,0 mm; amarração total e aplicação 1 de carga

Cobrimento (mm)	Padrão de Distribuição Distribuição de Espaçadores (cm)	Alinhado																																					
		40					60					80					100																						
		Deslocamento Livre					Deslocamento Livre					Deslocamento Livre					Deslocamento Livre																						
		23,222					30,632					39,063					42,319																						
20	Plástico	10,193	14,980	18,700	20,140	20,000	19,160	10,114	14,767	18,220	19,642	20,000	19,913	10,283	15,089	18,754	20,170	20,330	20,000	10,195	14,957	18,568	20,020	20,247	20,000														
	Elástico	8,629	12,473	15,388	17,186	17,909	17,796	8,636	12,420	15,308	17,185	18,180	18,604	8,566	12,372	15,277	17,134	18,034	18,309	8,529	12,349	15,289	17,204	18,188	18,572														
	Deformação Residual	1,564	2,506	3,312	2,954	2,091	1,364	1,479	2,348	2,912	2,457	1,820	1,309	1,718	2,717	3,477	3,036	2,296	1,691	1,666	2,609	3,279	2,817	2,060	1,429														
25	Plástica	11,624	17,183	21,785	24,221	24,408	23,578	12,075	17,809	22,482	24,729	25,219	25,000	12,106	17,884	22,622	24,963	25,555	25,416	11,720	17,288	21,780	24,026	24,813	25,000														
	Elástica	9,831	14,342	17,913	20,297	21,457	21,563	10,177	14,774	18,426	20,942	22,354	22,923	10,042	14,665	18,383	20,989	22,503	23,192	9,746	14,239	17,863	20,436	22,009	22,863														
	Deformação Residual	1,793	2,841	3,872	3,924	2,951	2,014	1,899	3,035	4,055	3,787	2,865	2,077	2,065	3,219	4,239	3,974	3,052	2,224	1,974	3,050	3,918	3,590	2,804	2,137														
30	Plástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA																						
	Elástico																					13,647	20,215	25,799	29,099	30,193	30,336	13,331	19,748	25,166	28,277	29,515	29,938	13,467	19,953	25,458	28,697	30,000	30,453
	Deformação Residual																					1,986	3,139	4,240	4,224	3,200	2,239	2,268	3,476	4,753	4,419	3,515	2,690	2,321	3,542	4,645	4,579	3,688	2,865
35	Plástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA																						
	Elástico																					14,646	21,752	27,937	32,011	33,911	34,808	14,779	21,954	28,218	32,360	34,295	35,214						
	Deformação Residual																					2,429	3,662	4,808	4,937	4,041	3,138	2,413	3,641	4,795	4,927	4,011	3,089						
45	Plástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA																						
	Elástico																					16,002	23,802	30,715	35,647	38,397	40,124												
	Deformação Residual																					2,532	3,765	4,897	5,100	4,243	3,348												
x	Padrão de Distribuição	Escalonado Total																																					
	Deslocamento Livre	15,74					17,982					19,168					20,003																						
	Plástico	8,610	12,609	15,819	16,130	14,754	12,633	9,585	14,087	17,554	18,644	17,743	16,003	10,007	14,729	18,423	19,730	19,027	17,473	10,299	15,173	19,015	20,457	19,904	18,500														
20	Elástico	7,234	10,292	12,236	13,163	12,799	11,490	8,022	11,527	14,043	15,356	15,475	14,626	8,362	12,060	14,781	16,305	16,633	15,988	8,591	12,422	15,284	16,956	17,439	16,952														
	Deformação Residual	1,375	2,317	3,583	2,967	1,955	1,143	1,563	2,561	3,512	3,287	2,268	1,377	1,645	2,669	3,642	3,425	2,394	1,485	1,708	2,751	3,730	3,501	2,465	1,548														
	Plástica	SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA																						
Elástica	SEM CONTATO COM A FÔRMA																					SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA												
Deformação Residual																																SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA		
30						Plástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA																						
	Elástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA																				SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA												
	Deformação Residual																															SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA		
35	Plástico						SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA																						
	Elástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA																				SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA												
	Deformação Residual																															SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA		
45	Plástico						SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA																						
	Elástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA																				SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA												
	Deformação Residual																															SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA		
x	Padrão de Distribuição						Escalonado Intercalado																																
	Deslocamento Livre	24,06					24,569					25,925																											
	Plástico	10,122	14,872	18,552	20,009	20,000	19,354	10,138	14,886	18,546	19,988	20,000	19,383	10,044	14,743	18,341	19,806	20,000	19,632																				
20	Elástico	8,568	12,410	15,348	17,206	18,037	18,092	8,562	12,383	15,294	17,127	17,942	17,997	8,447	12,231	15,135	17,003	17,917	18,149																				
	Deformação Residual	1,555	2,462	3,203	2,803	1,963	1,262	1,575	2,503	3,252	2,862	2,059	1,386	1,598	2,512	3,207	2,803	2,083	1,484																				
	Plástica	11,710	17,319	21,970	24,456	24,804	24,207	11,999	17,750	22,542	25,159	25,598	25,052	11,965	17,689	22,426	24,871	25,366	25,000																				
25	Elástica	9,839	14,406	18,067	20,579	21,913	22,250	10,138	14,833	18,609	21,222	22,636	23,028	9,949	14,572	18,300	20,902	22,362	22,883																				
	Deformação Residual	1,871	2,914	3,903	3,877	2,891	1,958	1,862	2,917	3,933	3,937	2,962	2,024	2,016	3,117	4,127	3,970	3,004	2,117																				
	Plástico	CONFIGURAÇÃO = AO PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO ALINHADO 40 CM					SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA																						
Elástico	12,589																					18,650	23,767	26,736	27,562	27,403													
Deformação Residual	2,046																					3,141	4,172	4,188	3,236	2,309													
35	Plástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA																						
	Elástico																					SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA							
	Deformação Residual																																				SEM CONTATO COM A FÔRMA		
45	Plástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA																						
	Elástico																					SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA					SEM CONTATO COM A FÔRMA							
	Deformação Residual																																				SEM CONTATO COM A FÔRMA		

*medidas de deformação plástica em mm

Malha 10 x 20 cm; diâmetro 6,3 mm; amarração total e aplicação 1 de carga

Cobrimento (mm)	Padrão de Distribuição	Alinhado																							
		40						60						80						100					
		Deslocamento Livre						Deslocamento Livre						Deslocamento Livre						Deslocamento Livre					
		9,811						14,371						18,737						26,276					
20	Plástico	5,374	7,921	9,958	11,18	11,52	11,22	6,734	9,974	12,72	14,65	15,66	16,01	7,157	10,66	13,73	16,06	17,6	18,51	7,09	10,57	13,6	15,91	17,42	18,31
	Elástico	4,717	6,876	8,579	9,705	10,23	10,24	6,013	8,837	11,21	13,01	14,22	14,89	6,473	9,619	12,37	14,49	16,26	17,42	6,347	9,433	12,13	14,39	15,91	17,03
	Deformação Residual	0,657	1,045	1,379	1,475	1,284	0,981	0,721	1,137	1,506	1,636	1,441	1,119	0,684	1,044	1,358	1,57	1,345	1,09	0,744	1,133	1,473	1,511	1,512	1,286
25	Plástica	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Elástica	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Deformação Residual	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
30	Plástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Elástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Deformação Residual	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
35	Plástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Elástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Deformação Residual	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
45	Plástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Elástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Deformação Residual	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
x	Padrão de Distribuição	Escalonado Total																							
	Deslocamento Livre	5,925						7,474						7,991						8,673					
	Plástico	3,671	5,281	6,379	6,758	6,447	5,661	4,266	6,211	7,62	8,251	8,108	7,435	4,437	6,474	7,979	8,704	8,649	8,056	4,535	6,626	8,19	8,979	8,992	8,469
20	Elástico	3,371	4,788	5,735	6,117	5,942	5,317	3,783	5,427	6,605	7,217	7,264	6,844	3,937	5,668	6,936	7,639	7,775	7,441	4,037	5,824	7,153	7,92	8,123	7,859
	Deformação Residual	0,3	0,492	0,644	0,641	0,505	0,344	0,484	0,784	1,015	1,034	0,844	0,591	0,499	0,806	1,043	1,065	0,874	0,615	0,498	0,801	1,038	1,059	0,868	0,61
	Plástica	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
25	Elástica	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Deformação Residual	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Plástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
30	Elástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Deformação Residual	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Plástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
35	Elástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Deformação Residual	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Plástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
45	Elástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Deformação Residual	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Plástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
x	Padrão de Distribuição	Escalonado Intercalado																							
	Deslocamento Livre	10,948						11,138						12,214											
	Plástico	5,373	7,915	9,952	11,21	11,66	11,51	5,441	8,025	10,11	11,41	11,89	11,76	5,728	8,472	10,73	12,22	12,89	12,95	5,728	8,472	10,73	12,22	12,89	12,95
20	Elástico	4,799	7,007	8,769	9,969	10,59	10,71	4,841	7,079	8,873	10,1	10,75	10,9	5,118	7,517	9,483	10,89	11,73	12,06	5,118	7,517	9,483	10,89	11,73	12,06
	Deformação Residual	0,574	0,908	1,183	1,245	1,074	0,799	0,6	0,946	1,234	1,306	1,141	0,862	0,61	0,955	1,246	1,324	1,167	0,892	0,61	0,955	1,246	1,324	1,167	0,892
	Plástica	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
25	Elástica	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Deformação Residual	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Plástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
30	Elástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Deformação Residual	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Plástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
35	Elástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Deformação Residual	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Plástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
45	Elástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Deformação Residual	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					
	Plástico	SEM CONTATO COM A FÔRMA												SEM CONTATO COM A FÔRMA						SEM CONTATO COM A FÔRMA					

*medidas de deformação plástica em mm