



MANUEL TOMÁZINHO DOMINGUES

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

COMPORTAMENTO AO PUNÇOAMENTO DE LAJES FUNGIFORMES EM BETÃO COM AGREGADOS GROSSOS RECICLA- DOS

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Universidade NOVA de Lisboa
setembro, 2024

COMPORTAMENTO AO PUNÇOAMENTO DE LAJES FUNGIFORMES EM BETÃO COM AGREGADOS GROS- SOS RECICLADOS

MANUEL TOMÁZINHO DOMINGUES

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Orientador: António Manuel Pinho Ramos,
Professor Catedrático, Universidade NOVA de Lisboa

Coorientador: Rui Pedro César Marreiros,
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: José Nuno Varandas da Silva Ferreira,
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Arguentes: Carla Alexandra da Cruz Marchão,
Professora Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa
Rui Pedro César Marreiros,
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Orientador: António Manuel Pinho Ramos,
Professor Catedrático, Universidade NOVA de Lisboa

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Universidade NOVA de Lisboa
setembro. 2024

Copyright © Manuel Tomázinho Domingues, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais, irmã, namorada e Minnie

AGRADECIMENTOS

Neste espaço, gostaria de deixar uma palavra de agradecimento a todos que de alguma forma contribuíram para o sucesso desta etapa no meu percurso académico.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador científico, o professor Doutor António Pinho Ramos, pela dedicação, apoio e interesse.

Ao meu coorientador científico, o professor Doutor Rui Marreiros, pela disponibilidade e apoio demonstrado ao longo da realização desta dissertação.

Um agradecimento especial ao António Carvalho, ao Jorge Silvério e ao Vinícius Cordeiro pelo apoio durante a realização da minha dissertação.

Gostaria de agradecer à empresa MAPEI pelo fornecimento do aditivo e à empresa Zircum pelo fornecimento dos agregados reciclados.

Um agradecimento especial ao meu pai Fausto Domingues pelo transporte dos agregados naturais.

Queria agradecer à minha colega Tainara pelo mútuo apoio prestado durante a realização da minha dissertação.

Agradeço também aos meus colegas e amigos pela amizade e pelos bons momentos passados ao longo destes últimos anos.

Gostaria de agradecer aos meus pais, irmã e namorada, pelo apoio, pelos bons momentos, pela força, pelo carinho e por todos os ensinamentos alcançados ao longo da minha vida.

Por fim, queria agradecer à minha companheira de quatro patas, Minnie, que me acompanhou durante uma grande parte da minha vida, tendo estado sempre ao meu lado, quer nas longas noites de estudo quer na realização da minha dissertação.

“Scientists study the world as it is; engineers create the world that has never been.” (Theodore von Karman).

RESUMO

Atualmente, os efeitos das alterações climáticas têm vindo a afetar cada vez mais as nossas vidas, sendo por esse motivo necessário tomar medidas que ajudem à sustentabilidade do nosso planeta. Um dos componentes do fabrico de betão são os agregados, obtidos através de extração na superfície terrestre, levando à degradação da mesma. De modo a promover a sustentabilidade na construção civil, uma medida que pode, e deve ser tomada, é a reciclagem de betão e sua posterior utilização como agregados reciclados, garantindo assim uma economia circular. Estes agregados são provenientes de demolições de estruturas existentes, desconhecendo-se muitas vezes as suas características, o que ao incorporar estes agregados reciclados numa nova mistura de betão, poderá dificultar a previsão das suas características, nomeadamente a sua resistência à compressão.

Este trabalho foca-se no comportamento de lajes fungiformes, em especial da ligação laje-pilar, uma vez que o fenómeno de punçoamento é bastante afetado pelas propriedades mecânicas do betão. Deste modo foram construídas e testadas 3 lajes com uma espessura de 150 mm, utilizando betões com diferentes percentagens de incorporação de agregados grossos reciclados. A principal variável em estudo foi a percentagem de agregados grossos reciclados utilizados na mistura do betão, tendo sido construída uma laje de referência com apenas agregados naturais.

Após a análise dos resultados, verificou-se que a perda de resistência ao punçoamento das lajes com agregados grossos reciclados, em relação à laje de betão convencional foi de 10,5% para a laje com 50% dos agregados grossos reciclados e de 3,2% para a laje com 100% agregados grossos reciclados.

Palavras chave: Punçoamento, Betão reciclado, Agregados grossos reciclados, Agregados naturais, Lajes Fungiformes.

ABSTRACT

Currently, the effects of climate change have increasingly impacted our lives, making it necessary to take measures that contribute to the sustainability of our planet. One of the components in concrete manufacturing is aggregates, which are obtained through extraction from the Earth's surface, leading to its degradation. To promote sustainability in construction, one measure that can and should be taken is the recycling of concrete and its subsequent use as recycled aggregates, thus ensuring a circular economy. These aggregates come from the demolition of existing structures, often with unknown characteristics, which can complicate the prediction of properties, such as compressive strength, when incorporating these recycled aggregates into a new concrete mix.

This work focuses on the behavior of flat slabs, particularly the slab-column connection, as the phenomenon of punching is significantly affected by the mechanical properties of the concrete. To study this, three slabs with a thickness of 150 mm were constructed and tested, using concrete with different percentages of recycled coarse aggregates. The main variable under study was the percentage of recycled coarse aggregates used in the concrete mix, with a reference slab constructed using only natural aggregates.

After analyzing the results, it was observed that the loss of punching shear resistance in the slabs with recycled coarse aggregates, compared to the conventional concrete slab, was 10,5% for the slab with 50% recycled coarse aggregates and 3,2% for the slab with 100% recycled coarse aggregates.

Keywords: Punching Shear, Recycled concrete, Recycled coarse aggregates, Natural aggregates, Fungiform slabs.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	Considerações Gerais.....	29
1.2	Objetivos.....	30
1.3	Organização do documento	30
2	ESTADO DA ARTE	33
2.1	Introdução.....	33
2.2	Punçoamento.....	33
2.2.1	Rao H et al. (2012).....	33
2.2.2	Reis et al. (2015).....	36
2.2.3	Francesconi et al. (2016)	38
2.2.4	Mahmoud et al. (2018).....	41
2.2.5	Xiao et al. (2019)	43
2.2.6	Altaee e Khudair (2020).....	46
2.2.7	Sahoo e Singh (2021).....	48
2.2.8	Elsayed et al. (2021).....	51
2.2.9	Leelatanon et al. (2022).....	54
2.3	Normas.....	57
2.3.1	Eurocódigo 2 - NP EN 1992-1-1.....	57
2.3.2	ACI 318-2019.....	59
2.3.3	Novo Eurocódigo 2 (EC2).....	59

2.4	Flexão	61
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	63
3.1	Introdução.....	63
3.2	Materiais	63
3.2.1	Agregados.....	64
3.2.2	Armaduras.....	64
3.3	Constituição dos betões utilizados.....	66
3.3.1	Betão com agregados naturais	66
3.3.2	Betão com agregados reciclados	66
3.4	Descrição dos Modelos.....	67
3.4.1	Construção dos modelos.....	68
3.5	Sistema de Ensaio.....	71
3.6	Caracterização Mecânica	79
3.6.1	Resistência à Compressão do Betão	79
3.6.2	Resistência do Betão à Tração por Compressão Diametral.....	82
3.6.3	Ensaio de Abaixamento (Cone de Abrams).....	84
4	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	87
4.1	Introdução.....	87
4.2	Relação Carga - Deslocamento.....	87
4.3	Modos de Rotura.....	89
4.4	Deslocamentos Verticais.....	93
4.4.1	RCA1-0.....	93
4.4.2	RCA1-50	95
4.4.3	RCA1-100.....	98
4.4.4	Considerações Finais.....	101
4.5	Extensões na Armadura Longitudinal Superior.....	101
4.5.1	RCA1-0.....	101

4.5.2	RCA1-50	103
4.5.3	RCA1-100.....	104
4.5.4	Considerações Finais.....	106
4.6	Análise do Efeito da incorporação de Agregados Grossos Reciclados no Betão na Capacidade de Carga	106
4.6.1	Comparação dos valores experimentais entre modelos	106
4.6.2	Eurocódigo 2 - NP EN 1992-1-1.....	107
4.6.3	ACI 318-2019.....	108
4.6.4	Novo Eurocódigo 2.....	108
4.6.5	Resistência à Flexão	109
4.6.6	Considerações Finais.....	110
5	CONCLUSÕES.....	111
5.1	Introdução.....	111
5.2	Deslocamentos Verticais.....	111
5.3	Extensão na Armadura Longitudinal Superior.....	111
5.4	Influência dos Agregados Grossos Reciclados na Capacidade de Carga.....	112
6	BIBLIOGRAFIA.....	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Sistema de ensaio utilizado por Rao H et al. (2012)	35
Figura 2.2 - Sistema de ensaio utilizado por Reis et al. (2015)	37
Figura 2.3 - Sistema de ensaio utilizado por Francesconi et al. (2016).....	39
Figura 2.4 - Sistema de ensaio utilizado por Mahmoud et al. (2018).....	42
Figura 2.5 - Sistema de ensaio utilizado por Xiao et al. (2019).....	45
Figura 2.6 - Sistema de ensaio utilizado por Sahoo e Singh (2021)	50
Figura 2.7 - Sistema de ensaio utilizado por Elsayed et al. (2021).....	53
Figura 2.8 - Sistema de ensaio utilizado por Leelatanon et al. (2022).....	55
Figura 2.9 - Primeiro perímetro de controlo típico em torno da área carregada segundo o EC2 (2010)	58
Figura 2.10 - Rotura típica de uma laje fungiforme simplesmente apoiada com um pilar retangular	61
Figura 3.1 - Brita natural (a), areia (b) e brita reciclada (c).....	64
Figura 3.2 - Armadura.....	65
Figura 3.3 - Pormenorização da armadura superior (varões com $\phi 12$) com cotas em m.....	68
Figura 3.4 - Pormenorização da armadura inferior (varões com $\phi 10$) com cotas em m.....	69
Figura 3.5 - Corte transversal com cotas em cm	69
Figura 3.6 - Armadura da laje	70
Figura 3.7 - Sistema de Ensaio (dimensões em cm).....	71
Figura 3.8 - Cilindro Hidráulico	72
Figura 3.9 - Unidade de controlo e pressão hidráulica.....	72
Figura 3.10 - Zona do tubo antes e após a betonagem.....	73
Figura 3.11 - Sistema de fixação das células de carga	74
Figura 3.12 - Sistema de fixação da laje	74

Figura 3.13 - Posição e numeração dos defletómetros superiores e das células de carga com cotas em m.....	76
Figura 3.14 - Posição e numeração defletómetros inferiores com cotas em m.....	77
Figura 3.15 - Numeração e posição dos extensómetros.....	78
Figura 3.16 - Extensómetros.....	79
Figura 3.17 - Ensaio à compressão do betão em cubos.....	81
Figura 3.18 - Ensaio à tração do betão por compressão diametral.....	84
Figura 3.19 - Ensaio de Abaixamento (Cone de Abrams).....	85
Figura 4.1 - Deslocamentos verticais na face superior da laje em função da carga aplicada para cada modelo.....	88
Figura 4.2 - Deslocamentos verticais na face inferior da laje em função da carga aplicada para cada modelo.....	88
Figura 4.3 - Vista superior da laje RCA1-0 após a rotura.....	90
Figura 4.4 - Vista inferior da laje RCA1-0 após a rotura.....	90
Figura 4.5 - Vista superior da laje RCA1-50 após a rotura.....	91
Figura 4.6 - Vista inferior da laje RCA1-50 após a rotura.....	91
Figura 4.7 - Vista superior da laje RCA1-100 após a rotura.....	92
Figura 4.8 - Vista inferior da laje RCA1-100 após a rotura.....	92
Figura 4.9 - Evolução dos deslocamentos verticais com o aumento da carga vertical aplicada.....	93
Figura 4.10 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento N-S Superior.....	94
Figura 4.11 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento E-O Superior.....	94
Figura 4.12 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento N-S Inferior.....	95
Figura 4.13 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento E-O Inferior.....	95
Figura 4.14 - Evolução dos deslocamentos verticais com o aumento da carga vertical aplicada.....	96
Figura 4.15 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento N-S Superior.....	96
Figura 4.16 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento E-O Superior.....	97

Figura 4.17 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento N-S Inferior	97
Figura 4.18 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento E-O Inferior	98
Figura 4.19 - Evolução dos deslocamentos verticais com o aumento da carga vertical aplicada	99
Figura 4.20 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento N-S Superior.....	99
Figura 4.21 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento E-O Superior.....	100
Figura 4.22 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento N-S Inferior	100
Figura 4.23 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento E-O Inferior	101
Figura 4.24 - Extensões na armadura longitudinal superior da laje RCA1-0	102
Figura 4.25 - Extensão para os diferentes patamares de carga.....	103
Figura 4.26 - Extensões na armadura longitudinal superior da laje RCA1-50.....	103
Figura 4.27 - Extensão para os diferentes patamares de carga.....	104
Figura 4.28 - Extensões na armadura longitudinal superior da laje RCA1-100	105
Figura 4.29 - Extensão para os diferentes patamares de carga.....	105
Figura 4.30 - Comparação resultados experimentais	107

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedade dos betões utilizados por Rao H et al. (2012).....	34
Tabela 2.2 - Resultados obtidos por Rao H et al. (2012).....	35
Tabela 2.3 - Resultados obtidos por Reis et al. (2015).....	37
Tabela 2.4 - Resultado obtidos para a resistência ao punçoamento por Reis et al. (2015).....	38
Tabela 2.5 - Características mecânicas dos betões utilizado por Francesconi et al. (2016).....	39
Tabela 2.6 - Resultados obtidos por Francesconi et al. (2016) da carga aplicada até ao início da fendilhação e da carga última	40
Tabela 2.7 - Características do betão obtidos por Mahmoud et al. (2018).....	41
Tabela 2.8 - Resultados obtidos por Mahmoud et al. (2018) para a carga de fendilhação e da carga última de rotura por punçoamento	43
Tabela 2.9 - Características do betão obtidos por Xiao et al. (2019).....	44
Tabela 2.10 - Resultados obtidos por Xiao et al. (2019) para a carga última de rotura por punçoamento.....	45
Tabela 2.11 - Diminuição da resistência à compressão do betão registados por Altaee e Khudair (2020)	46
Tabela 2.12 - Carga de fendilhação e carga última de rotura por punçoamento obtidos experiencialmente por Altaee e Khudair (2020)	47
Tabela 2.13 - Momento de fendilhação (M_{cr}) e momento último de flexão (M_u) registados por Altaee e Khudair (2020).....	47
Tabela 2.14 - Resistência à compressão do betão obtida por Sahoo e Singh (2021).....	49
Tabela 2.15 - Carga última de rotura por punçoamento obtida por Sahoo e Singh (2021).....	51
Tabela 2.16 - Mistura e resistências à compressão obtidas no teste de provetes cilíndricos realizado por Elsayed et al. (2021)	52
Tabela 2.17 - Resultados obtidos por Elsayed et al. (2021).....	54

Tabela 2.18 - Resultados obtidos por Leelatanon et al. (2022).....	56
Tabela 3.1 - Propriedades dos aços.....	65
Tabela 3.2- Composição do betão para a laje de referência	66
Tabela 3.3 - Composição do betão para a mistura com 50% agregados grossos reciclados...67	
Tabela 3.4 - Composição do betão para a mistura com 100% agregados grossos reciclados 67	
Tabela 3.5 - Resistência à compressão do betão após 28 dias de cura do betão	80
Tabela 3.6 - Média da resistência à compressão do betão de cada mistura após 28 dias de cura do betão.....	81
Tabela 3.7 - Resistência do betão à tração por compressão diametral.....	83
Tabela 3.8 - Resistência do betão à tração por compressão diametral média	83
Tabela 3.9 - Resultados do ensaio Cone de Abrams	85
Tabela 4.1 - Resistência ao Punçoamento segundo o Eurocódigo 2	107
Tabela 4.2 - Comparação do valor teórico e experimental	108
Tabela 4.3 - Resistência ao Punçoamento segundo a ACI 318-2019	108
Tabela 4.4 - Comparação do valor teórico e experimental	108
Tabela 4.5 - Resistência ao Punçoamento segundo o novo Eurocódigo 2.....	109
Tabela 4.6 - Comparação do valor teórico e experimental	109
Tabela 4.7 - Resistência à Flexão	109

GLOSSÁRIO

DEC	Departamento de Engenharia Civil
EC2	Eurocódigo 2
RCA	Recycled Coarse Aggregate
V_{cr}	Carga de fendilhação
$V_{cr,med}$	Carga média de fendilhação
V_{exp}	Carga última de rotura por punçoamento
$V_{exp,med}$	Carga última média de rotura por punçoamento
M_{cr}	Momento de fendilhação
M_u	Momento último de flexão
$f_{c,cubo}$	Tensão de rotura do betão à compressão em provetes cúbicos
f_c	Tensão de rotura do betão à compressão em provetes cilíndricos
d	Altura útil
d_{eff}	Altura útil efetiva
$V_{Rd,c}$	Valor de cálculo da resistência ao punçoamento de uma laje sem armadura de punçoamento
V_{flex}	Carga última de flexão de uma laje
f_y	Tensão de cedência à tração do aço
f_t	Tensão de rotura à tração do aço
$f_{ct,sp}$	Tensão de rotura do betão à tração por compressão diametral

ΔR_c	Diferença percentual entre a resistência ao punçoamento em comparação com a laje de referência
MPa	Megapascal
kN	Quilonewtons
mm	Milímetros
m	Metros
N	Newton
NR	Nervurado
SD	Ductilidade Especial
d_{eff}	Altura útil efetiva da laje
u_1	Primeiro perímetro de controlo típico em torno da área carregada
ρ_l	Percentagem de armadura de tração aderente
σ_c	Tensão normal crítica na secção crítica
A_c	Área de betão
N_{Ed}	Esforço normal
ACI	American Concrete Institute
v_c	Resistência ao corte
b_0	Comprimento do perímetro na secção crítica
k_{pb}	Coefficiente de punçoamento
D_{min}	Dimensão mínima do agregado
D_{max}	Dimensão máxima do agregado
l	Litros

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Os efeitos das alterações climáticas têm cada vez mais afetado o dia a dia das nossas vidas, sendo, portanto, necessário tomar medidas para as controlar. Uma vez que a indústria da construção civil é uma das mais poluidoras do mundo, é necessário tomar medidas para combater este problema. Uma das medidas que irá ser adotada é o uso de agregados grossos reciclados na composição de novos betões, substituindo assim uma percentagem dos agregados grossos naturais necessários para a composição do betão.

Com o uso de agregados grossos reciclados, provenientes da demolição de estruturas de betão e cujas características mecânicas possam ser desconhecidas, estimar o comportamento de um betão que contenha estes agregados poderá levar a incertezas em relação às suas propriedades mecânicas.

Nas lajes fungiformes, lajes que apoiam unicamente em pilares, pode acontecer um fenómeno chamado de punçoamento, que ocorre devido a uma elevada concentração de tensões de corte na zona da ligação laje-pilar, podendo levar ao colapso total da estrutura.

Pela análise de estudos realizados anteriormente, obtiveram-se resultados promissores, porque a resistência ao punçoamento não foi substancialmente alterada com a incorporação de agregados reciclados, continuando as normas em vigor a prever valores conservadores para a capacidade resistente.

Pretende-se continuar a estudar a ligação laje-pilar, em lajes constituídas por betões com agregados reciclados, para deste modo se obter mais resultados da resistência ao punçoamento destas lajes, para ser possível analisar a viabilidade da utilização deste tipo de agregados.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo estudar a ligação laje-pilar, utilizando agregados grossos reciclados na composição do betão da laje.

Com este trabalho, pretende-se estudar o comportamento da ligação laje-pilar, para perceber se é seguro começar a incorporar agregados reciclados na composição dos betões, aumentando a sustentabilidade na construção civil.

Pretende-se avaliar o comportamento da ligação laje-pilar usando diferentes percentagens de agregados grossos reciclados na composição do betão da laje, mantendo a percentagem de armadura longitudinal constante (1,0%).

Foram realizadas as seguintes etapas:

- Leitura e apontamentos de artigos científicos realizados anteriormente referentes ao comportamento da ligação laje-pilar, em que as lajes são constituídas por betões com diferentes percentagens de agregados grossos reciclados;
- Elaboração de 3 lajes constituídas por betões com diferentes percentagens de agregados grossos reciclados (0, 50 e 100%), mantendo a percentagem de armadura longitudinal constante (1,0%);
- Ensaios e análise dos resultados obtidos.

1.3 Organização do documento

O presente trabalho é constituído por cinco capítulos.

O primeiro capítulo consiste no capítulo introdutório, onde é apresentada uma breve introdução desta dissertação e os objetivos da mesma.

No segundo capítulo, é apresentado o resumo de vários trabalhos efetuados sobre a resistência ao punçoamento de lajes com agregados reciclados. São apresentados os modelos ensaiados (materiais, sistema de ensaio, entre outros) bem como as conclusões obtidas. Ainda no mesmo capítulo, são apresentadas as expressões necessárias para o cálculo da resistência ao punçoamento segundo as normas em vigor, bem como a resistência à flexão.

No terceiro capítulo é apresentado o programa experimental, onde são apresentados os materiais utilizados, a descrição do sistema de ensaio e a caracterização mecânica.

No quarto capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios realizados, nomeadamente, a relação Carga-Deslocamento, os modos de rotura, os deslocamentos verticais, a extensão na armadura longitudinal superior e os resultados da resistência ao

punçoamento obtidos, sendo estes resultados também comparados com os resultados esperados segundo as normas em vigor, anteriormente apresentadas no capítulo dois.

Por fim, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões obtidas na realização deste trabalho de investigação.

ESTADO DA ARTE

2.1 Introdução

O uso de agregados grossos reciclados na construção civil, é uma das medidas a tomar para controlar o desperdício na construção civil, aumentando assim a sustentabilidade deste setor. Os usos destes agregados trazem consigo diversos desafios, uma vez que as suas características poderão ser mais heterogêneas e se poderão desconhecer as propriedades do betão de onde foram obtidos os agregados grossos reciclados.

Uma das incertezas é a resistência das lajes ao punçoamento, cujo betão é constituído por agregados grossos reciclados, uma vez que a resistência do betão influencia bastante a ocorrência deste fenómeno.

Neste capítulo, são resumidos os trabalhos de investigação realizados por diversos autores, onde a resistência ao punçoamento em lajes compostas por betão com agregados grossos reciclados é avaliada.

2.2 Punçoamento

Nesta secção são apresentados os seguintes trabalhos experimentais: Rao H et al. (2012); Reis et al. (2015); Francesconi et al. (2016); Mahmoud et al. (2018); Xiao et al. (2019); Altaee & Khudair (2020); Sahoo & Singh (2021); Elsayed et al. (2021); Leelatanon et al. (2022).

2.2.1 Rao H et al. (2012)

Rao H et al. (2012) testaram a resistência ao punçoamento em lajes compostas por diferentes percentagens de agregados grossos reciclados (0, 20, 40, 60, 80 e 100%), tendo as lajes

1100 x 1100 x 50 mm³ de dimensão. Foram testadas 18 lajes, sendo 3 lajes por cada percentagem de agregados reciclados.

Foi utilizado um cimento Portland, areia fina de rio local utilizada como agregado fino, e agregados grossos naturais e reciclados. Os agregados reciclados eram provenientes de restos de betão da pista do aeroporto de Kadapa, Andhra Pradesh, India. Tanto os agregados grossos reciclados como os naturais tinham uma dimensão compreendida entre 4,75 e 20 mm.

Rao H et al. (2012) verificaram que com o aumento da percentagem de agregados reciclados, a resistência à compressão do betão diminui, como se pode observar na Tabela 2.1. Na Tabela 2.1 também é possível verificar a perda de resistência em relação à laje de referência.

Tabela 2.1 - Propriedade dos betões utilizados por Rao H et al. (2012)

Mistura	Agregados Reciclados (%)	$f_{c,cubo}$ (MPa)	Perda de resistência dos provetes cúbicos (%)	f_c (MPa)	Δf_c (%)
NCAC-S	0	43,3	-	34,4	-
RCAC-20-S	20	42,5	-1,8	33,5	-2,6
RCAC-40-S	40	41,0	-5,3	32,4	-5,8
RCAC-60-S	60	38,4	-11,3	30,9	-10,2
RCAC-80-S	80	35,5	-18,0	28,4	-17,4
RCAC-100-S	100	33,5	-22,6	26,4	-23,3

Rao H et al. (2012) utilizaram uma percentagem de armadura longitudinal igual em todas as lajes (0,63%), sendo o aço Fe-415 HYSD com 6 mm de diâmetro, estando a armadura igualmente distribuída em todas as direções. As lajes possuíam um recobrimento de 10 mm.

Como se pode observar na Figura 2.1, Rao H et al. (2012), durante os ensaios apoiaram simplesmente as lajes em todos os seus bordos. A carga foi aplicada no centro geométrico da laje, onde um macaco hidráulico exerceu uma força sobre uma chapa de aço com 100 x 100 x 20 mm³ de dimensão. A força aplicada ia sofrendo aumentos de 200 N, tendo-se registado a carga necessária para o início da fendilhação e a carga última de rotura por punçoamento. Os resultados podem ser observados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Resultados obtidos por Rao H et al. (2012)

Laje	V_{cr} (kN)	V_{exp} (kN)	ΔR_c (%)
NCAC-S	14,6	48,2	-
RCAC-20-S	14,2	47,2	-2,1
RCAC-40-S	14,2	45,8	-5,0
RCAC-60-S	13,4	44,6	-7,5
RCAC-80-S	12,8	42,8	-11,2
RCAC-100-S	12,2	41,4	-14,1



Figura 2.1 - Sistema de ensaio utilizado por Rao H et al. (2012)

Rao H et al. (2012) chegaram às seguintes conclusões:

- Com o aumento da percentagem de agregados grossos reciclados, a resistência à compressão do betão diminui (22,6% e 23,3% para provetes cúbicos e cilíndricos, respetivamente);
- Todas as lajes tiveram um comportamento idêntico na rotura, independentemente da percentagem de agregados grossos reciclados;
- Com o aumento da percentagem de agregados grossos reciclados ocorreu uma redução da resistência à rotura por punção (-14,1%).

2.2.2 Reis et al. (2015)

Reis et al. (2015) testaram a resistência ao punçamento em lajes compostas por diferentes percentagens de agregados grossos reciclados (0, 20, 50, 100%), tendo as lajes uma dimensão de 1100 x 1100 x 90 mm³. Foram testadas 2 lajes por cada percentagem de agregados reciclados, num total de 8 lajes.

Os agregados naturais tinham uma dimensão máxima de 22,4 mm. Os agregados grossos reciclados foram obtidos através da britagem de vigas de betão com 28 dias, onde a dimensão máxima dos agregados era de 22,4 mm e a resistência à compressão ao fim de 28 dias dos provetes cúbicos era de 42,8 MPa. Foi utilizado um cimento Portland 42,5 do tipo II.

Independentemente da percentagem de agregados grossos reciclados, a resistência à compressão do betão não sofreu grandes alterações, sendo da classe desejada C30/37.

As armaduras utilizadas foram similares em todas as lajes, tendo uma percentagem de armadura longitudinal superior de 0,93% ($\phi 8//75\text{mm}$) e inferior de 0,25% ($\phi 6//150\text{mm}$), promovendo uma rotura por punçamento em vez de uma rotura por flexão. O recobrimento das armaduras é de 10 mm.

Como se pode observar na Figura 2.2, durante os ensaios as lajes foram simplesmente apoiadas em oito suportes uniformemente distribuídos numa forma circular, estando esses suportes sobre quatro blocos largos de betão. Um macaco hidráulico foi aplicando uma força numa chapa metálica com 150 x 150 x 30 mm³ de dimensão, colocada ao meio da laje, simulando deste modo um pilar. A força aplicada inicialmente foi de 20 kN, sofrendo ciclos de carga e de descarga, com incrementos de 20 kN por cada ciclo. A velocidade da aplicação da força foi de 0,5 kN/s. As fendas iam sendo marcadas a vermelho, para deste modo ser possível observar o seu padrão. As lajes foram carregadas até à rotura.



Figura 2.2 - Sistema de ensaio utilizado por Reis et al. (2015)

Reis et al. (2015) verificaram que houve uma redução da rigidez da laje à medida que a percentagem de agregados grossos reciclados aumentou. Verificaram também que a carga necessária para o aparecimento das primeiras fendas foi diminuindo com o aumento da percentagem de agregados grossos reciclados, tendo uma diminuição mais acentuada para a laje composta exclusivamente por agregados grossos reciclados. Os resultados podem ser observados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Resultados obtidos por Reis et al. (2015)

Laje	V_{cr} (kN)	$V_{cr,med}$ (kN)	$V_{cr}/V_{cr,RC}$
RC-1	24,3	24,0	1,00
RC-2	23,7		
C20-1	23,9	23,4	0,97
C20-2	22,8		
C50-1	22,8	23,2	0,97
C50-2	23,6		
C100-1	19,6	19,1	0,79
C100-2	18,5		

Sendo $V_{cr}/V_{cr,RC}$ a comparação entre a carga média de fendilhação de referência (RC) com as restantes lajes.

Reis et al. (2015), verificaram que a resistência ao punçoamento não sofreu grandes alterações à medida que a percentagem de agregados grossos reciclados ia aumentando, tendo sido a

variação máxima de 4,8% verificada na laje C20. Os resultados podem ser observados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Resultado obtidos para a resistência ao punçamento por Reis et al. (2015)

Laje	f_c (MPa)	V_{exp} (kN)	$V_{exp,med}$ (kN)	ΔR_c (%)
RC-1	$37,1 \pm 1,6$	157,7	163,3	-
RC-2		168,9		
C20-1	$35,1 \pm 1,6$	158,6	155,4	-4,8
C20-2		152,2		
C50-1	$36,9 \pm 0,8$	163,6	169,2	+3,6
C50-2		174,8		
C100-1	$36,2 \pm 1,0$	161,8	160,1	-2,0
C100-2		158,3		

Reis et al. (2015) concluíram que:

- A resistência ao punçamento não sofreu alterações significativas com o aumento da percentagem de agregados grossos reciclados.

2.2.3 Francesconi et al. (2016)

Francesconi et al. (2016) testaram a resistência ao punçamento utilizando quinze lajes com diferentes percentagens de agregados grossos reciclados (0, 30, 50, 80 e 100%), tendo sido realizadas 3 lajes para cada percentagem de agregados grossos reciclados. As lajes tinham $1100 \times 1100 \times 50 \text{ mm}^3$ de dimensão.

O cimento utilizado foi o cimento Portland do tipo II/A-LL 42,5 R, o agregado natural fino utilizado foi uma areia calcária, tendo o agregado grosso uma dimensão máxima compreendida entre os 4 e os 12 mm. Os agregados grossos reciclados foram obtidos aleatoriamente de três sítios autorizados, localizados no Sul de Sardenha, não sendo possível conhecer as características do betão a partir do qual estes agregados foram obtidos. A armadura utilizada foi uma malha eletrosoldada constituída por varões de $\phi 5//100 \text{ mm}$ em aço B450A.

Francesconi et al. (2016), verificaram que com o aumento da percentagem de agregados grossos reciclados, as características mecânicas do betão foram reduzindo, existindo uma

diminuição da densidade e uma menor resistência à compressão do betão. Os resultados podem ser observados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Características mecânicas dos betões utilizado por Francesconi et al. (2016)

Mistura	Densidade (kg/m^3)	f_c (N/m^2)	Δf_c (%)
NC0	2403	71,1	-
RC1	2343	63,6	-10,5
RC2	2329	62,0	-12,8
RC3	2260	56,3	-20,8
RC4	2257	50,8	-28,6

Como se pode observar na Figura 2.3, Francesconi et al. (2016), durante os ensaios as lajes estavam simplesmente apoiadas num perfil metálico HEA 100 ao longo dos quatro bordos. A força foi aplicada no centro geométrico da laje sobre uma chapa metálica com 200 x 200 x 5 mm³ de dimensão. A força foi aplicada na chapa metálica através de macacos hidráulicos.



Figura 2.3 - Sistema de ensaio utilizado por Francesconi et al. (2016)

Após a realização dos ensaios, Francesconi et al. (2016) verificaram que a força necessária a aplicar até ao início da fendilhação e a carga última nas lajes com diferentes percentagens

de agregados grossos reciclados foi bastante similar às cargas aplicadas na laje de controlo (laje constituída unicamente por agregados naturais). Os resultados podem ser observados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Resultados obtidos por Francesconi et al. (2016) da carga aplicada até ao início da fendilhação e da carga última

Laje	V_{cr} (kN)	$V_{cr,med}$ (kN)	V_{exp} (kN)	$V_{exp,med}$ (kN)	ΔR_c (%)
NC0-1	17,0	18,8	72,5	68,7	-
NC0-2	21,5		68,7		
NC0-3	17,9		64,9		
RC1-1	17,9	19,7	64,9	70,0	+1,9
RC1-2	23,5		72,5		
RC1-3	17,9		72,5		
RC2-1	17,9	20,3	64,9	66,2	-3,6
RC2-2	21,5		68,7		
RC2-3	21,5		64,9		
RC3-1	14,2	16,7	68,7	68,7	0,0
RC3-2	17,9		64,9		
RC3-3	17,9		72,5		
RC4-1	17,9	19,1	68,7	70,0	+1,9
RC4-2	21,5		68,7		
RC4-3	17,9		72,5		

Francesconi et al. (2016) concluíram que:

- A utilização de agregados grossos reciclados reduz as características mecânicas do betão (-28,6%);
- Independentemente da percentagem de agregados grossos reciclados, ocorreu rotura por punçoamento em todas as lajes;
- A presença de agregados grossos reciclados não implica uma redução na resistência da laje, tendo sido observado que a resistência ao punçoamento é bastante similar à laje de referência (laje constituída unicamente por agregados naturais);

- O uso de agregados grossos reciclados deve ser incentivado, pois mesmo utilizando agregados reciclados provenientes de betão com características desconhecidas, consegue-se obter resultados semelhantes aos obtidos em lajes onde o betão é constituído unicamente por agregados naturais.

2.2.4 Mahmoud et al. (2018)

Mahmoud et al. (2018) testaram a resistência ao punçoamento de oito lajes, duas para cada percentagem diferente de agregados grossos reciclados (0, 30, 60, 100%). As lajes tinham todas as mesmas dimensões 1200 x 1200 x 100 mm. Uma das variáveis em estudo foi a influência da dimensão máxima do agregado, sendo utilizado duas dimensões diferentes (12,5 e 25 mm).

Para a construção das lajes utilizou-se um cimento Portland (CEM I 42,5 N), um adjuvante Sikament-163M, areia natural, agregados grossos naturais e reciclados com dimensão máxima de 12,5 e de 25 mm. Também foi utilizado um aço com 10 mm de diâmetro com uma tensão de cedência de 510 MPa. Os agregados grossos reciclados, foram obtidos de restos de provetes cúbicos de betão.

Mahmoud et al. (2018) registaram os seguintes valores para a resistência à compressão dos diferentes tipos de betão, testando a resistência de provetes cúbicos e cilíndricos. Os resultados podem ser observados na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Características do betão obtidos por Mahmoud et al. (2018)

Betão	$f_{c,cubo}$ (MPa)	$\Delta f_{c,cubo}$ (%)	f_c (MPa)
NCA-0%-12,5	44,7	-	37,2
RCA-30%-12,5	42,3	-5,4	35,0
RCA-60%-12,5	39,6	-11,4	32,5
RCA-100%-12,5	38,0	-15,0	31,1
NCA-0%-25	47,1	-	39,4
RCA-30%-25	43,0	-8,7	35,6
RCA-60%-25	41,5	-11,9	34,3
RCA-100%-25	40,7	-13,6	33,5

As lajes possuíam um recobrimento de 20 mm e tinham todas as mesmas armaduras nas duas direções, constituída por 11 varões de 10 mm. Para se poder observar com maior clareza a fendilhação das lajes, estas foram pintadas de branco.

Como se pode observar na Figura 2.4, durante os ensaios realizados por Mahmoud et al. (2018), as lajes estavam simplesmente apoiadas ao longo dos quatro bordos, estando apoiada sobre perfis metálicos. A força foi aplicada no centro da laje, utilizando um macaco hidráulico para exercer força sobre uma chapa metálica com 100 x 100 x 50 mm³ de dimensões. A força aplicada foi sofrendo aumentos sucessivos de 2 kN.

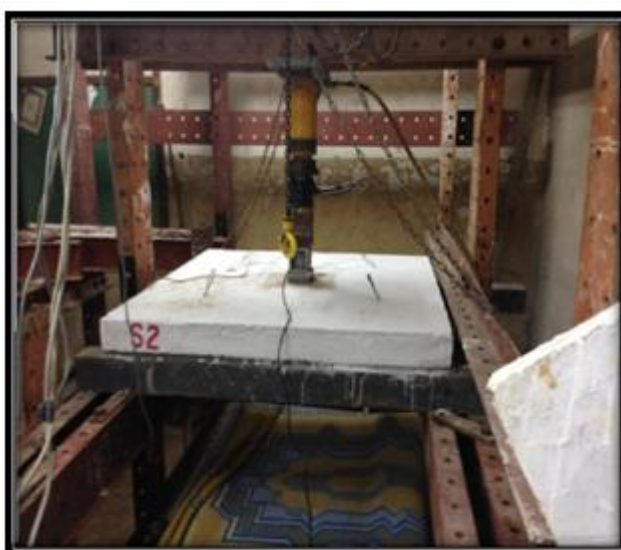


Figura 2.4 - Sistema de ensaio utilizado por Mahmoud et al. (2018)

Após os ensaios, Mahmoud et al. (2018) verificaram que tanto para as lajes com agregados grossos com uma dimensão máxima de 12,5mm e de 25 mm, o aumento da percentagem de agregados reciclados diminui a força aplicada necessária para o início da fendilhação. Verificaram também que, comparando as lajes com a mesma percentagem de agregados grossos reciclados, mas com diferentes granulometrias (12,5 e 25 mm), obtiveram uma maior resistência à fendilhação nas lajes com os agregados de 25 mm. Os mesmos resultados foram obtidos para a carga última de punção. Os resultados podem ser observados na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 - Resultados obtidos por Mahmoud et al. (2018) para a carga de fendilhação e da carga última de ruptura por punçoamento

Laje	Percentagem de agregados reciclados (%)	Dimensão dos agregados (mm)	V_{cr} (kN)	V_{exp} (kN)	ΔR_c (%)
S_1	0	12,5	115,8	157,5	-
S_3	30		105,1	153,0	-2,9
S_5	60		95,4	137,5	-12,7
S_7	100		85,5	122,0	-22,5
S_2	0	25	120,2	172,5	-
S_4	30		110,3	157,0	-9,0
S_6	60		100,1	140,5	-18,6
S_8	100		90,3	131,0	-24,1

Mahmoud et al. (2018) chegaram às seguintes conclusões:

- A resistência à compressão dos provetes cúbicos e cilíndricos diminuem com o aumento da percentagem de agregados grossos reciclados (15,0% e 13,6% para a laje com dimensão máxima de agregado de 12,5mm e 25 mm, respetivamente);
- A resistência ao punçoamento e à fendilhação diminui com o aumento da percentagem de agregados grossos reciclados (22,5% e 24,1% para a laje com dimensão máxima de agregado de 12,5mm e 25 mm, respetivamente);

2.2.5 Xiao et al. (2019)

Xiao et al. (2019) testaram a resistência ao punçoamento utilizando 8 lajes com diferentes percentagens de agregados grossos reciclados (0, 30, 50, 100%) e fibras de aço. As lajes tinham 1500 x 1500 x 120 mm³ de dimensão.

O cimento utilizado foi um cimento Portland (PO42,5). Os agregados finos utilizados foram uma areia média, enquanto os agregados grossos naturais utilizados foram cascalho calcário e os agregados grossos reciclados foram obtidos a partir de restos de betão com 30 MPa, tendo uma dimensão máxima dos agregados entre os 5 e os 25 mm. As fibras de aço utilizadas

tinham um comprimento de 50 mm e um diâmetro de 0,9 mm. Foram utilizadas duas quantidades de fibras diferentes (0,5 e 1 %).

Xiao et al. (2019) registaram os seguintes valores para a resistência à compressão dos diferentes tipos de betão, testando a resistência de provetes cúbicos, tais como os valores do módulo de elasticidade. Os resultados podem ser observados na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Características do betão obtidos por Xiao et al. (2019)

Betão	$f_{c,cubo}(MPa)$	$\Delta f_{c,cubo}(\%)$	Módulo de elasticidade (GPa)
RAC0	52,3	-	37
RAC30-0%	44,7	-14,5	35
RAC50-0%	39,0	-25,4	30
SFRAC50-0,5%	42,8	-18,2	32
SFRAC50-1%	43,7	-16,4	31
RAC100-0%	37,1	-29,1	27
SFRAC100-0,5%	38,0	-27,3	23
SFRAC100-1%	40,9	-21,8	25

O aço utilizado por Xiao et al. (2019) foi HRB335, com $f_{yk} = 335$ MPa e com um diâmetro de 12 mm. As lajes tinham um recobrimento de 15 mm.

Como se pode ver na Figura 2.5, durante a realização dos ensaios as lajes encontravam-se simplesmente apoiadas em todo o contorno. A força foi aplicada no centro da laje, onde um macaco hidráulico exerceu pressão sobre uma secção tubular metálica, com o seu interior preenchido por betão, simulando um pilar, tendo uma área de 200×200 mm². A força exercida pelo macaco hidráulico foi sofrendo aumentos até à rotura da laje.

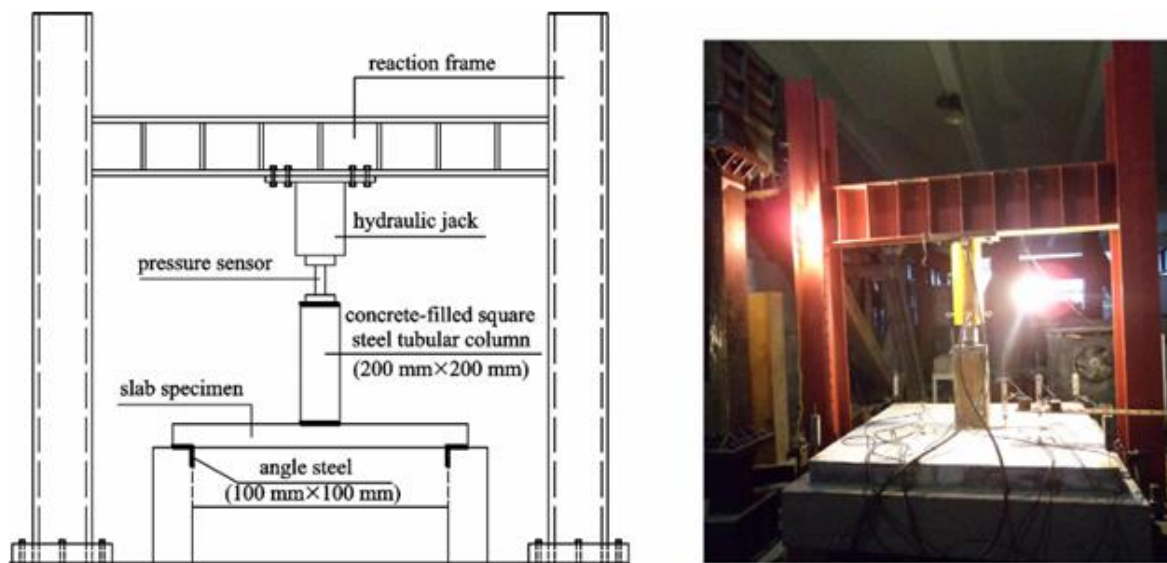


Figura 2.5 - Sistema de ensaio utilizado por Xiao et al. (2019)

Xiao et al. (2019), após a realização dos ensaios, verificaram que com o aumento da percentagem de agregados grossos reciclados, a carga última de rotura por punçamento vai reduzindo. Para a mesma percentagem de agregados grossos reciclados, mas com diferentes percentagens de fibras de aço, verificaram a carga última de rotura por punçamento aumentou com o aumento da percentagem de fibras de aço. Os resultados podem ser observados na Tabela 2.10.

Tabela 2.10 - Resultados obtidos por Xiao et al. (2019) para a carga última de rotura por punçamento

Tipo de betão utilizado	V_{exp} (kN)	ΔR_c (%)
RAC0	320,0	-
RAC30-0%	313,4	-2,1
RAC50-0%	307,1	-4,0
SFRAC50-0,5%	366,8	+14,6
SFRAC50-1%	370,6	+15,8
RAC100-0%	303,4	-5,2
SFRAC100-0,5%	331,2	+3,5
SFRAC100-1%	350,2	+9,4

Xiao et al. (2019) chegaram às seguintes conclusões:

- A adição de fibras de aço melhora a resistência à rotura da laje por punçoamento em 7-15% e a mesma resistência diminui com o aumento da percentagem de agregados grossos reciclados;
- Com a adição das fibras de aço, a ductilidade e deformação da laje também é melhorada.

2.2.6 Altaee e Khudair (2020)

Altaee & Khudair (2020) testaram a resistência ao punçoamento e à flexão de lajes utilizando diferentes percentagens de agregados grossos reciclados (0, 25, 50 e 75%). Foram testadas 14 lajes, tendo uma dimensão em planta de 800 x 800 mm², onde a espessura da laje e a quantidade de armadura eram variáveis. As lajes foram agrupadas em 3 grupos, onde as lajes do G1 e G2 foram dimensionadas para sofrer uma rotura por punçoamento, enquanto as lajes do G3 foram dimensionadas para terem uma rotura por flexão.

Altaee & Khudair (2020) utilizaram um cimento Portland e agregados finos naturais. Os agregados grossos naturais e reciclados possuíam a mesma granulometria. Os agregados grossos reciclados foram obtidos através do esmagamento de cubos de betão provenientes de outros projetos, dividindo-se em duas granulometrias (10 a 14 mm e 5 a 10 mm). Foi utilizado um adjuvante para permitir a auto-compactação do betão (HRWR, Glenium 51). Foram utilizados varões com diferentes diâmetros (ϕ 8 mm, ϕ 10 mm e ϕ 12 mm).

Altaee & Khudair (2020) verificaram que com o aumento da percentagem de agregados grossos reciclados, houve uma diminuição da resistência à compressão do betão, comparando com um betão constituído exclusivamente por agregados naturais. Os resultados podem ser observados na Tabela 2.11.

Tabela 2.11 - Diminuição da resistência à compressão do betão registados por Altaee e Khudair (2020)

Percentagem de agregados	$f_{c,cubo}$
25%	8,62%
50%	13,54%
75%	19,12%

As lajes foram pintadas com uma tinta de água branca, para deste modo ser mais fácil identificar as fendas na laje.

Altaee & Khudair (2020) após a realização dos ensaios, verificaram que com o aumento da percentagem de agregados grossos reciclados, a resistência ao punçoamento (G1 e G2) e à flexão (G3) foram diminuindo, estando os resultados apresentados nas Tabelas 2.12 e 2.13, respetivamente.

Tabela 2.12 - Carga de fendilhação e carga última de rotura por punçoamento obtidos experiencialmente por Altaee e Khudair (2020)

Grupo	Laje	Aço	Agregados reciclados (%)	Espessura (mm)	V_{cr} (kN)	V_{exp} (kN)
G1	2W6 0%	9 ϕ 12	0	100	45	160
	2W9 50%		50	100	35	145
	2W5 0%		0	100	57	200
	2W8 50%		50	100	50	192,5
	2W18 0%		0	100	73	275
	2W20 50%		50	100	62	270
G2	2W7 0%	17 ϕ 12	0	150	110	405
	2W10 50%		50	150	95	360
	2W11 0%	17 ϕ 10	0	150	105	360
	2W12 50%		50	150	92,5	335

Tabela 2.13 - Momento de fendilhação (M_{cr}) e momento último de flexão (M_u) registados por Altaee e Khudair (2020)

Grupo	Laje	Aço	Agregados reciclados (%)	Espessura (mm)	M_{cr} (kNm)	M_u (kNm)
G3	2W1 0%	9 ϕ 8	0	120	7,4	20,8
	2W2 25%		25	120	6,6	19,8
	2W3 50%		50	120	6,1	18,3
	2W4 75%		75	120	5,6	16,8

Altaee & Khudair (2020) chegaram às seguintes conclusões:

- As propriedades do betão foram diminuindo à medida que a percentagem de agregados grossos reciclados aumentou;
- A fendilhação inicia-se mais cedo nas lajes com maior percentagem de agregados grossos reciclados em comparação com as lajes constituídas unicamente por agregados naturais;
- A resistência ao punçoamento diminuí com o aumento das percentagens de agregados grossos reciclados (1,8%);
- Existe uma maior deflexão nas lajes onde há uma maior percentagem de agregados grossos reciclados.

2.2.7 Sahoo e Singh (2021)

Sahoo & Singh (2021) testaram a resistência ao punçoamento de 18 lajes com diferentes percentagens de agregados grossos reciclados (0, 50, 100%) utilizando betões com diferentes resistências à compressão (normal, média e alta). As lajes tinham 1200 x 1200 x 100 mm³ de dimensão.

O cimento utilizado foi cimento Portland respeitando as normas IS 8112-1989, areia fina de rio, agregados grossos naturais provenientes da britagem de rochas e agregados grossos reciclados provenientes de restos de betão com propriedades desconhecidas. Ambos os agregados grossos tinham uma dimensão máxima de 12,5 mm. Foram utilizados varões de aço de 6 e 10 mm de diâmetro, com uma tensão de cedência de 487 MPa.

Como referido anteriormente, Sahoo & Singh (2021) utilizaram três composições diferentes de betão, obtendo assim diferentes resistências à compressão, normal (N), média (M) e alta (H), obtendo resistências à compressão de 28, 43 e 60 MPa, respetivamente. Os resultados podem ser observados na Tabela 2.14.

Tabela 2.14 - Resistência à compressão do betão obtida por Sahoo e Singh (2021)

Mistura	f_c (MPa)	Δf_c (%)
N0	29,8	-
N50	28,4	-4,7
N100	29,4	-1,3
M0	43,7	-
M50	43,5	-0,5
M100	43,0	-1,6
H0	61,2	-
H50	56,8	-7,2
H100	58,0	-5,2

As lajes possuíam um recobrimento de 15 mm. A face inferior da laje tinha uma percentagem de armadura longitudinal de 1,16% ($\phi 10//90$ mm) nas duas direções e a face superior uma percentagem de armadura longitudinal de 0,21% ($\phi 6//180$ mm) nas duas direções.

Como se pode observar na Figura 2.6, durante os ensaios realizados por Sahoo & Singh (2021), as lajes encontravam-se simplesmente apoiadas em oito apoios igualmente espaçados. A carga era aplicada no centro da laje. A carga seria aplicada usando um 500 kN MTS aplicando-a numa chapa metálica com $150 \times 150 \times 30 \text{ mm}^3$ de dimensão. A carga ia aumentando progressivamente até se atingir a rotura da laje por punçoamento. As lajes foram também pintadas com uma tinta branca, para deste modo ser mais fácil observar a abertura de fendas.



Figura 2.6 - Sistema de ensaio utilizado por Sahoo e Singh (2021)

Sahoo & Singh (2021) verificaram que o aumento da percentagem de agregados grossos reciclados não influencia a resistência à compressão do betão nem a resistência ao punçoamento. Verificaram que a resistência ao punçoamento é maior quanto maior for a resistência à compressão do betão. Os resultados podem ser observados na Tabela 2.15.

Tabela 2.15 - Carga última de rotura por punçoamento obtida por Sahoo e Singh (2021)

Laje	V_{exp} (kN)	$V_{exp,med}$ (kN)	ΔR_c (%)
N0-1	205,2	207,3	-
N0-2	209,4		
N50-1	211,5	214,2	+3,3
N50-2	217,0		
N100-1	218,9	224,4	+8,2
N100-2	230,0		
M0-1	259,3	254,7	-
M0-2	250,1		
M50-1	252,6	254,2	-0,2
M50-2	255,8		
M100-1	257,1	258,6	+1,5
M100-2	260,1		
H0-1	248,1	258,1	-
H0-2	267,3		
H50-1	252,4	260,0	+0,7
H50-2	267,5		
H100-1	263,4	267,0	+3,4
H100-2	270,4		

Sahoo & Singh (2021) chegaram às seguintes conclusões:

- A resistência à compressão do betão tem uma maior influência na resistência ao punçoamento do que a substituição de agregados naturais por agregados reciclados.

2.2.8 Elsayed et al. (2021)

Elsayed et al. (2021) testaram a resistência ao punçoamento utilizando lajes com agregados grossos reciclados com diferentes percentagens de substituição (0, 25, 50 e 100%) e restos de borracha proveniente de pneus de automóveis com diferentes percentagens (0, 10 e 20%). Foram testadas doze lajes com 1000 x 1000 x 100 mm³ de dimensão.

Os materiais utilizados foram cimento Portland (CEM I 42,5 N), areia e agregados finos locais, agregados grossos naturais e reciclados e restos de borracha. Os agregados grossos

reciclados foram obtidos pela britagem de provetes de betão provenientes de testes de laboratório. A dimensão máxima dos agregados grossos naturais e reciclados é de 22,4 mm enquanto as dimensões dos restos de borracha possuíam dimensões entre 0,18 e 2,80 mm. Foram também utilizados dois tipos diferentes de aço, um com diâmetro de 6 mm com uma tensão de cedência de 298 MPa e outro com diâmetro de 12 mm com uma tensão de cedência de 531 MPa.

Elsayed et al. (2021) utilizaram diferentes misturas de betão, obtendo os seguintes resultados para a resistência à compressão de provetes cilíndricos. Os resultados podem ser observados na Tabela 2.16.

Tabela 2.16 - Mistura e resistências à compressão obtidas no teste de provetes cilíndricos realizado por Elsayed et al. (2021)

Mistura	Agregados Reciclados (%)	Restos de borracha (%)	f_c (MPa)	Δf_c (%)
RC0-CR0	0	0	27,6	-
RC0-CR10	0	10	24,2	-12,3
RC0-CR20	0	20	22,1	-19,9
RC25-CR0	25	0	25,8	-6,5
RC20-CR10	25	10	22,8	-17,4
RC25-CR20	25	20	21,0	-23,9
RC50-CR0	50	0	24,9	-9,8
RC50-CR10	50	10	22,7	-17,8
RC50-CR20	50	20	20,5	-25,7
RC100-CR0	100	0	24,6	-10,9
RC100-CR10	100	10	22,1	-19,9
RC100-CR20	100	20	19,7	-28,6

As lajes testadas por Elsayed et al. (2021) possuíam um recobrimento de 20 mm. As lajes eram armadas em ambas as direções com $\phi 12//190$ mm. Possuíam um pilar quadrado centrado na laje, com 100 mm de lado e uma altura de 150 mm. A armadura do pilar era constituída por uma armadura longitudinal de $4\phi 12$ e cintas de $\phi 6$. As lajes foram pintadas com uma tinta branca, para o ser mais fácil identificar e visualizar o aparecimento de fendas.

Como se pode ver na Figura 2.7, durante a realização dos testes, as lajes estavam simplesmente apoiadas em todos os bordos. A força seria exercida sobre o eixo do pilar utilizando um macaco hidráulico que iria provocar uma deflexão na laje à velocidade de 0,25 mm/min.



Figura 2.7 - Sistema de ensaio utilizado por Elsayed et al. (2021)

Elsayed et al. (2021) verificaram que a combinação da utilização de restos de borracha com a utilização de agregados grossos reciclados, tem uma influência negativa na resistência à compressão do betão. Os betões que possuem uma maior combinação de restos de borracha e uma maior percentagem de agregados grosso reciclados, tiveram uma maior redução na resistência à compressão, sendo essa redução de 28,3%. A utilização de 10% e 20% de restos de borracha na constituição do betão, provocaram uma diminuição da sua resistência à compressão em 13,5% e 19,4%, respetivamente, em comparação com um betão convencional. Em todas as lajes, as primeiras fendas formaram-se à volta do pilar. A resistência à rotura por punçoamento, não sofreu uma grande diminuição entre as lajes com agregados naturais e as lajes que possuíam uma percentagem de agregados grossos reciclados até 50%. A incorporação de restos de borracha teve um comportamento negativo na resistência ao punçoamento, acentuando-se com o aumento da percentagem de agregados grossos reciclados.

Elsayed et al. (2021) numeraram as lajes seguindo a ordem das misturas que foram apresentadas anteriormente na Tabela 2.16. Os resultados podem ser observados na Tabela 2.17.

Tabela 2.17 - Resultados obtidos por Elsayed et al. (2021)

Laje	V_{exp} (kN)	ΔR_c (%)
S01	181,4	-
S02	174,1	-4,02
S03	165,8	-8,6
S04	177,7	-2,0
S05	158,0	-12,9
S06	152,0	-16,2
S07	169,8	-6,4
S08	153,0	-15,7
S09	151,2	-16,6
S10	157,3	-13,3
S11	139,1	-23,3
S12	135,1	-25,5

Elsayed et al. (2021) concluíram que:

- Há uma degradação das propriedades do betão à medida que há um aumento quer da percentagem de agregados grossos reciclados quer dos restos de borracha visto que há uma diminuição da resistência à compressão como da resistência à rotura por punçoamento;
- Uma substituição até 10% dos agregados finos por restos de borracha não tem uma grande influência na resistência ao punçoamento;
- Uma combinação da incorporação de restos de borracha com agregados grossos reciclados tem um comportamento negativo na resistência ao punçoamento;
- Uma mistura utilizando 25% de agregados grossos reciclados e 10% de restos de borracha é um ótimo rácio para a composição do betão, onde a redução do comportamento da laje é aceitável.

2.2.9 Leelatanon et al. (2022)

Leelatanon et al. (2022) testaram a resistência ao punçoamento de lajes utilizando diferentes percentagens de agregados grossos reciclados (25, 50, 75 ,100%). Foram testadas dez

lajes com $1500 \times 1500 \times 100 \text{ mm}^3$ de dimensão. Foram também utilizadas duas percentagens de armadura longitudinais diferentes (0,8 e 1,5%).

Os betões foram dimensionados para ter uma resistência à compressão de 28 MPa após 28 dias. Foi utilizado um cimento Portland do tipo I (OCP), agregados grossos naturais e reciclados, agregados finos e um aditivo super-plastificante. Os agregados grossos reciclados foram obtidos através de resíduos de provetes de betão cilíndricos com uma resistência à compressão de 30 MPa. A dimensão máxima dos agregados era de 19 mm. As armaduras tinham $\phi 12$ onde a tensão de cedência era 568 MPa e a tensão última era 660 MPa.

Leelatanon et al. (2022) dividiram as lajes em dois grupos consoante a percentagem de armadura longitudinal. As lajes com uma percentagem de armadura longitudinal de 0,8% eram armadas nas duas direções com $\phi 12//200 \text{ mm}$ enquanto as lajes com uma percentagem de armadura longitudinal de 1,5% eram armadas nas duas direções com $\phi 12//100 \text{ mm}$.

Como se pode observado na Figura 2.8, durante os ensaios realizados por Leelatanon et al. (2022) as lajes estavam simplesmente apoiadas, sendo a carga aplicada num pilar de betão com $200 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$ de dimensão situado no centro da laje, através de um macaco hidráulico que ia aumentando a carga aplicada continuamente até à rotura da laje.

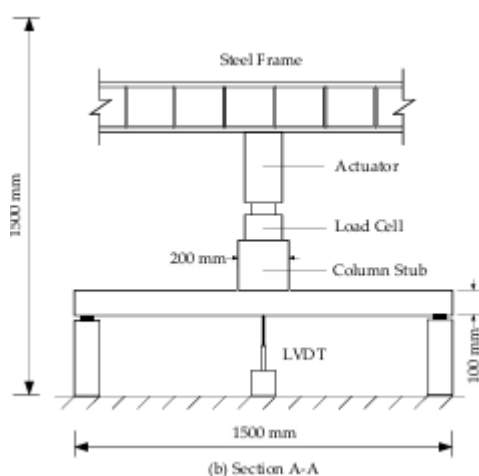


Figura 2.8 - Sistema de ensaio utilizado por Leelatanon et al. (2022)

Como esperado por Leelatanon et al. (2022), as lajes sofreram rotura por punçoamento. As lajes com uma menor percentagem de armadura longitudinal tinham áreas de fendas mais severas. Os resultados podem ser observados na Tabela 2.18.

Tabela 2.18 - Resultados obtidos por Leelatanon et al. (2022)

Laje	Agregados reciclados (%)	Porcentagem de armadura longitudinal (%)	f_c (MPa)	Δf_c (%)	V_{cr} (kN)	V_{exp} (kN)	ΔR_c (%)
RCA-0-10	0	1,5	28,1	-	76,8	260,9	-
RCA-25-10	25	1,5	27,2	-3,2	70,0	245,3	-6,0
RCA-50-10	50	1,5	24,3	-13,5	62,0	217,8	-16,5
RCA-75-10	75	1,5	23,1	-17,8	61,0	214,8	-17,7
RCA-100-10	100	1,5	22,2	-21,0	59,0	217,5	-16,6
RCA-0-20	0	0,8	26,5	-	65,1	180,0	-
RCA-25-20	25	0,8	24,5	-7,5	58,5	164,0	-8,9
RCA-50-20	50	0,8	23,5	-11,3	57,6	159,8	-11,2
RCA-75-20	75	0,8	24,1	-9,1	58,1	159,9	-11,2
RCA-100-20	100	0,8	22,3	-15,8	54,2	150,4	-16,4

Leelatanon et al. (2022) chegaram às seguintes conclusões:

- A resistência ao punçamento das lajes com 100% de agregados grossos reciclados foi mais baixa do que as lajes com apenas agregados naturais, havendo uma

redução da resistência de 16,6% e 16,4% tendo em conta a percentagem de armadura longitudinal (1,5 e 0,8%), respetivamente;

- Duplicando a percentagem de armadura longitudinal, há um aumento da resistência ao punçoamento de 45%.

2.3 Normas

Neste subcapítulo, será apresentado a formulação necessária para o cálculo da resistência da laje ao punçoamento sem armadura de punçoamento, de acordo com o Eurocódigo 2 (2010), com a norma Americana (2019) e de acordo com o novo Eurocódigo 2 (2023).

2.3.1 Eurocódigo 2 - NP EN 1992-1-1

2.3.1.1 Distribuição das ações e primeiro perímetro de controlo

De acordo com o EC2 (2010), poderá considerar-se que o primeiro perímetro de controlo, u_1 , é definido a uma distância $2,0d$ da área carregada.

Admite-se que a altura útil da laje é constante e poderá ser calculada utilizando a equação (2.1).

$$d_{eff} = \frac{(d_y + d_z)}{2} \quad (2.1)$$

em que d_y e d_z são as alturas úteis da armadura em duas direções ortogonais. A Figura 2.9 apresenta o primeiro perímetro de controlo típico em torno da área carregada (u_1).

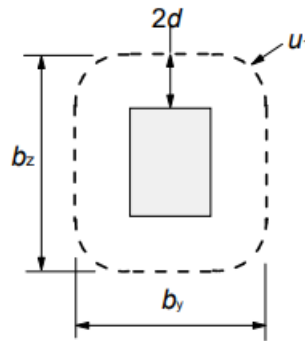


Figura 2.9 - Primeiro perímetro de controlo típico em torno da área carregada segundo o EC2 (2010)

2.3.1.2 Resistência ao punçamento de lajes sem armadura de punçamento

De acordo com o EC2 (2010), a resistência ao punçamento de uma laje deverá ser avaliada de acordo com a equação (2.2).

$$V_{Rd,c} = (C_{Rd,c} * k * (100 * \rho_l * f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 * \sigma_{cp}) * b_0 * d \geq (v_{min} + k_1 * \sigma_{cp}) * b_0 * d \quad (2.2)$$

em que:

$$f_{ck} = 0.8 * f_{c,cubo}, \text{ com } f_{c,cubo} \text{ em MPa} \quad (2.3)$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad \text{com } d \text{ em mm} \quad (2.4)$$

$$\rho_l = \sqrt{\rho_{ly} * \rho_{lz}} \leq 0,02 \quad (2.5)$$

ρ_{ly}, ρ_{lz} referem-se às armaduras de tração aderentes nas direções y e z, respetivamente. Os valores ρ_{ly} e ρ_{lz} deverão ser calculados como valores médios numa largura de laje igual à largura do pilar acrescida de 3d para cada lado;

$$\sigma_{cp} = (\sigma_{cy} + \sigma_{cz})/2 \quad (2.6)$$

em que:

σ_{cy}, σ_{cz} tensões normais no betão na secção crítica nas direções y e z (MPa, positivas se de compressão):

$$\sigma_{c,y} = \frac{N_{Ed,y}}{A_{cy}} \text{ e } \sigma_{c,z} = \frac{N_{Ed,z}}{A_{cz}} \quad (2.7)$$

$N_{Ed,y}, N_{Ed,z}$ esforços normais nas faixas de laje sobre pilares interiores e esforço normal na secção de controlo para pilares de bordo. O esforço poderá ser resultante de uma ação exterior ou do pré-esforço;

A_c área de betão associada ao esforço N_{Ed} considerado.

Os valores de $C_{Rd,c}$, v_{min} e k_l a utilizar são 0,18, 0,65 e 0,1, respetivamente.

2.3.2 ACI 318-2019

Segundo a norma americana (2019) a resistência ao punçoamento pode ser calculada pela equação (2.8).

$$V = v_c * b_0 * d \quad (2.8)$$

Em que,

v_c é a resistência ao corte

b_0 é o comprimento do perímetro na secção crítica

d é a altura efetiva

A resistência ao corte v_c pode ser calculado utilizando a equação (2.9) (unidades em MPa e mm).

$$v_c = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,33 * \sqrt{f_c} \\ 0,17 * \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) * \sqrt{f_c} \\ 0,083 * \left(\frac{\alpha_s d}{b_0} + 2\right) * \sqrt{f_c} \end{array} \right. \quad (2.9)$$

Em que,

α_s é igual a 40, 30 ou 20 dependendo da localização do pilar interior, bordo e canto, respetivamente.

b_0 é o comprimento do perímetro de controlo localizado a uma distância de 0,5d de cada ponto do perímetro do pilar

β_c é o rácio entre o lado maior e o lado menor da secção do pilar

2.3.3 Novo Eurocódigo 2 (EC2)

Segundo o novo Eurocódigo 2 (2023), a resistência ao punçoamento é calculada pela equação (2.10).

$$V = v_c * b_0 * d * \eta_\tau \quad (2.10)$$

Em que,

v_c é a resistência ao corte

b_0 é o comprimento do perímetro na secção crítica

d é a altura efetiva

η_τ é um coeficiente que tem em conta a quantidade de agregados reciclados, calculada pela equação (2.11).

$$\eta_\tau = 1 - 0.2 * \frac{\text{quantidade de agregados reciclados}}{\text{quantidade total de agregados}} \quad (2.11)$$

A resistência ao corte v_c pode ser calculado utilizando a equação (2.12).

$$v_c = 0,6 * k_{pb} * \left(100 * \rho_L * f_c * \frac{d_{ag}}{d} \right)^{\frac{1}{3}} \leq 0,5 * \sqrt{f_c} \quad (2.12)$$

Em que,

k_{pb} é um coeficiente de punçoamento sendo calculado pela equação (2.13).

$$1 \leq k_{pb} = 3,6 * \sqrt{1 - \frac{b}{b_0}} \leq 2,5 \quad (2.13)$$

em que,

b é o comprimento do perímetro da face do pilar

b_0 é o comprimento do perímetro que se encontra a uma distância de $0,5*d$ de cada ponto do perímetro do pilar

d_{ag} depende do tipo de betão e das propriedades dos agregados sendo calculado utilizando as equações (2.14) e (2.15).

$$16 \text{ mm} + D_{min} \leq 40 \text{ mm para betões com } f_c \leq 60 \text{ MPa} \quad (2.14)$$

$$16 \text{ mm} + D_{min} \left(\frac{60}{f_c} \right)^2 \leq 40 \text{ mm para betões com } f_c > 60 \text{ MPa} \quad (2.15)$$

2.4 Flexão

Segundo Jürgen Einpaul, (2016), a resistência à flexão de uma laje simplesmente apoiada com um pilar retangular central (Figura 2.10), pode ser calculada segundo a equação (2.16).

$$V_{flex} = 8 * \left[\frac{B}{2 * (b_{q1} + b_{q2})} \right] * m_{R,average} \quad (2.16)$$

Onde,

$$m_{R,average} = \rho_{average} * f_y * d_{average}^2 * \left(1 - \frac{\rho_{average} * f_y}{2 * f_{cp}} \right) \quad (2.17)$$

$$f_{cp} = \eta_{fc} * f_c \quad (2.18)$$

$$\eta_{fc} = (30/f_c)^{1/3} \leq 1 \quad (2.19)$$

$$\rho_{average} = \sum A_s/B * d_{average} \quad (2.20)$$

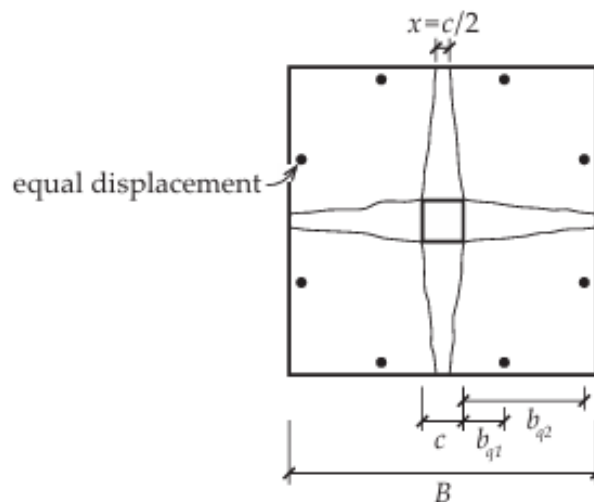


Figura 2.10 - Rotura típica de uma laje fungiforme simplesmente apoiada com um pilar retangular

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Neste capítulo, apresentam-se os modelos ensaiados e o sistema de ensaio. Foram efetuados vários estudos no passado com o objetivo de estudar a ligação laje-pilar onde as lajes são constituídas por betões com diferentes percentagens de agregados grossos reciclados. O que difere as lajes em estudo desta dissertação dos restantes trabalhos é a espessura da laje ser superior às anteriormente estudadas.

As lajes foram construídas e testadas no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Nova School of Science and Technology.

3.2 Materiais

Os materiais necessários para a construção das lajes foram as armaduras, os agregados grossos naturais e reciclados, os agregados finos, água corrente, aditivo MAPEI XTEND 300 R e cimento Portland 42,5 R do tipo II.

As misturas foram realizadas numa betoneira de eixo inclinado da marca IRBAL, com uma capacidade de mistura máxima de 230l.

Para a compactação do betão utilizaram-se dois vibradores elétricos portáteis com agulha, funcionando em simultâneo, reduzindo a presença de ar dentro do betão, tornando o betão mais compacto e resistente.

3.2.1 Agregados

Os agregados finos (areia) tinham uma dimensão máxima de 4 mm enquanto os agregados grossos naturais tinham uma dimensão máxima de 16 mm e os agregados grossos reciclados uma dimensão máxima de 14 mm.

A Figura 3.1 é referente aos agregados utilizados nas diferentes misturas, sendo a primeira imagem referente à brita natural, a segunda imagem referente à areia e a última imagem referente à brita reciclada.



Figura 3.1 - Brita natural (a), areia (b) e brita reciclada (c)

3.2.2 Armaduras

Foram utilizados varões com diferentes diâmetros (10 e 12 mm) e espaçamentos diferentes para as armaduras superiores e inferiores. Os aços utilizados nas armaduras eram do tipo A500 NR SD. A Tabela 3.1 apresenta as propriedades dos aços utilizados.

Tabela 3.1 - Propriedades dos aços

Diâmetro (mm)	f_y (MPa)	f_t (MPa)
10	545	644
12	563	646

A Figura 3.2 apresenta uma foto da armadura da laje.



Figura 3.2 - Armadura

Independentemente do tipo de mistura de betão, as percentagens de armadura superior e inferior não sofreram quaisquer alterações.

3.3 Constituição dos betões utilizados

Foram utilizadas três composições diferentes de betão, sendo uma constituída unicamente por agregados naturais enquanto as outras tinham incorporado na sua composição diferentes percentagens de agregados grossos reciclados, uma com 50% e outra com 100%.

3.3.1 Betão com agregados naturais

O betão com agregados naturais foi preparado no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Nova School of Science and Technology. A quantidade de cada constituinte da amassadura do betão convencional apresenta-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2- Composição do betão para a laje de referência

Laje RCA1-0	
Areia	616 kg/m ³
Brita	856 kg/m ³
Cimento Portland 42,5 R do tipo II	288 kg/m ³
MAPEI XTEND 300 R	2,29 l/m ³
Água	128 l/m ³

3.3.2 Betão com agregados reciclados

Do mesmo modo que foi preparado o betão convencional, o betão com agregados reciclados foi preparado no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Nova School of Science and Technology.

Independentemente da percentagem de agregados grossos reciclados, a quantidade de areia, cimento e aditivo na mistura manteve-se inalterada, variando apenas a quantidade e o tipo de agregados grossos utilizados tal como a quantidade de água utilizada.

As Tabelas 3.3 e 3.4 apresentam a quantidade de cada constituinte por m³ de betão para a mistura com 50% e 100% de agregados grossos reciclados, respetivamente.

Houve a necessidade de aumentar a quantidade de água na mistura da laje RCA1-100, visto que a mistura estava muito seca, daí a necessidade de melhorar a sua trabalhabilidade.

Tabela 3.3 - Composição do betão para a mistura com 50% agregados grossos reciclados

Laje RCA1-50	
Areia	616 kg/m ³
Brita Natural	428 kg/m ³
Brita Reciclada	428 kg/m ³
Cimento Portland 42,5 R do tipo II	288 kg/m ³
MAPEI XTEND 300 R	2,29 l/m ³
Água	128 l/m ³

Tabela 3.4 - Composição do betão para a mistura com 100% agregados grossos reciclados

Laje RCA1-100	
Areia	616 kg/m ³
Brita Reciclada	856 kg/m ³
Cimento Portland 42,5 R do tipo II	288 kg/m ³
MAPEI XTEND 300 R	2,29 l/m ³
Água	157 l/m ³

3.4 Descrição dos Modelos

O programa experimental é constituído pelo ensaio de 3 lajes, com uma geometria octogonal com 2200 mm x 2200 mm de dimensão em planta e uma espessura de 150 mm, simulando a zona de ligação da laje ao apoio. As lajes foram ensaiadas até à rotura através do carregamento vertical no centro geométrico da laje, sendo o carregamento efetuado na superfície inferior da laje, utilizando um macaco hidráulico com uma chapa de aço quadrada incorporada, mantendo deste modo a superfície plana ao longo do ensaio.

As variáveis em estudo foram as percentagens de agregados grossos reciclados, mantendo-se constante a quantidade de armadura.

A betonagem das lajes começou com a laje sem agregados reciclados, seguidamente a laje onde o betão continha 50% de agregados grossos reciclados e finalmente a laje onde o betão continha 100% de agregados grossos reciclados.

As lajes foram denominadas consoante a quantidade de agregados grossos reciclados que constituía o betão RCA1-0, RCA1-50 e RCA1-100, onde RCA corresponde a "Recycled

Coarse Aggregate" (Agregados Grossos Recicladados), o 1 à percentagem geométrica de armadura e os algarismos que se seguem correspondem à percentagem de agregados grossos reciclados que constitui a mistura de betão da laje.

3.4.1 Construção dos modelos

Os modelos foram construídos de modo semelhante, contendo a mesma quantidade de armadura, distinguindo-se apenas na composição do betão.

As armaduras para as três lajes foram construídas de igual forma, tendo uma armadura inferior e superior constituída por varões de 10 e de 12 mm de diâmetro, respetivamente. A armadura inferior da laje é constituída por $22\phi 10 // 0,1$ m (em cada direção), enquanto a armadura superior possui um menor espaçamento na zona central da laje (zona de maiores momentos) $10\phi 12 // 0,1$ m (em cada direção) e nas zonas mais laterais $3\phi 12 // 0,2$ m (em cada lado e direção).

As Figuras 3.3 e 3.4 apresentam a pormenorização da armadura superior e inferior da laje, respetivamente.

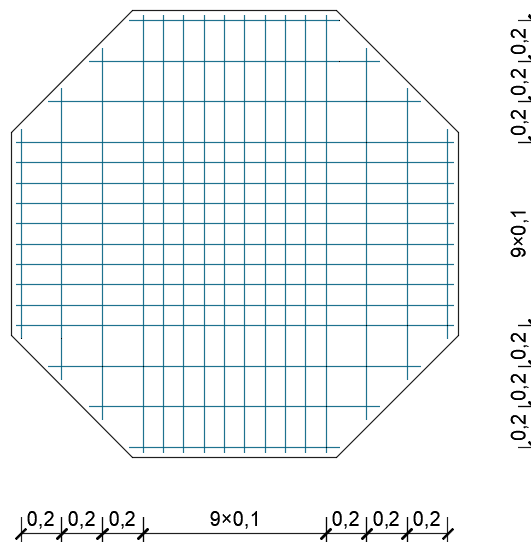


Figura 3.3 - Pormenorização da armadura superior (varões com $\phi 12$) com cotas em m

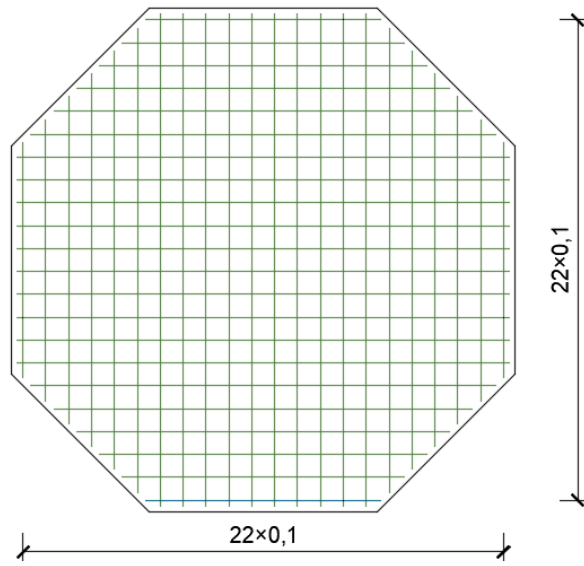


Figura 3.4 - Pormenorização da armadura inferior (varões com $\phi 10$) com cotas em m

A Figura 3.5 apresenta a secção de corte transversal da laje.

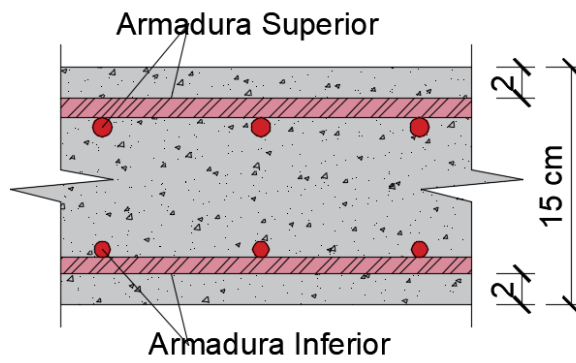


Figura 3.5 - Corte transversal com cotas em cm

A Figura 3.6 mostra a armadura da laje já colocada na cofragem e pronta a ser betonada.



Figura 3.6 - Armadura da laje

Previamente à betonagem, tanto os agregados como o cimento foram pesados no dia anterior, deixando apenas a pesagem da água e a dosagem de aditivo para serem preparados no dia da betonagem. O aditivo (MAPEI XTEND 300 R) foi adicionado na água, para deste modo, como irá ser indicado, estar presente em cada fase em que se adiciona água para a preparação da amassadura. Para cada amassadura, inicialmente, foi colocado um pouco de água na betoneira, para deste modo quando se colocasse os agregados, os mesmo pudessem estar húmidos. Após a colocação dos agregados, foi adicionado mais um pouco de água e deixou-se misturar durante cerca de 2 minutos, para que deste modo houvesse um reajustamento da brita e da areia, reduzindo os espaços vazios entre os agregados. Seguidamente acrescentou-se o cimento e o resto da água, deixando a betoneira a amassar durante 10 minutos. Após este período começou-se o processo de betonagem, onde se encheu um carrinho de mão com betão, sendo depois levado com auxílio de um empilhador até ao local de betonagem.

Uma vez que, para cada betonagem foi necessário efetuar várias amassaduras, pois a capacidade de amassadura da betoneira era inferior ao volume da laje, foram realizadas várias amassaduras de betão, tendo sido necessário betonar provetes cúbicos e cilíndricos em cada amassadura para efetuar a caracterização mecânica do betão.

3.5 Sistema de Ensaio

A força que a laje transmite ao pilar foi simulada recorrendo a um macaco hidráulico (ENERPAC RRH 1006 com 990 kN de capacidade máxima e 160 mm de curso máximo) que exerceu uma força numa chapa quadrada de aço metálica (simulando o pilar) com 50 mm de espessura e 250 mm de lado. O carregamento foi possível através de uma unidade de controlo e pressão hidráulica (WALTER+BAI AG tipo NSPA 700/DIG 200), que aplicou a força a uma velocidade de carga constante de 0,113 bar/s, ou seja 0,161 kN/s.

A Figura 3.7 apresenta um esquema legendado do sistema de ensaio utilizado.

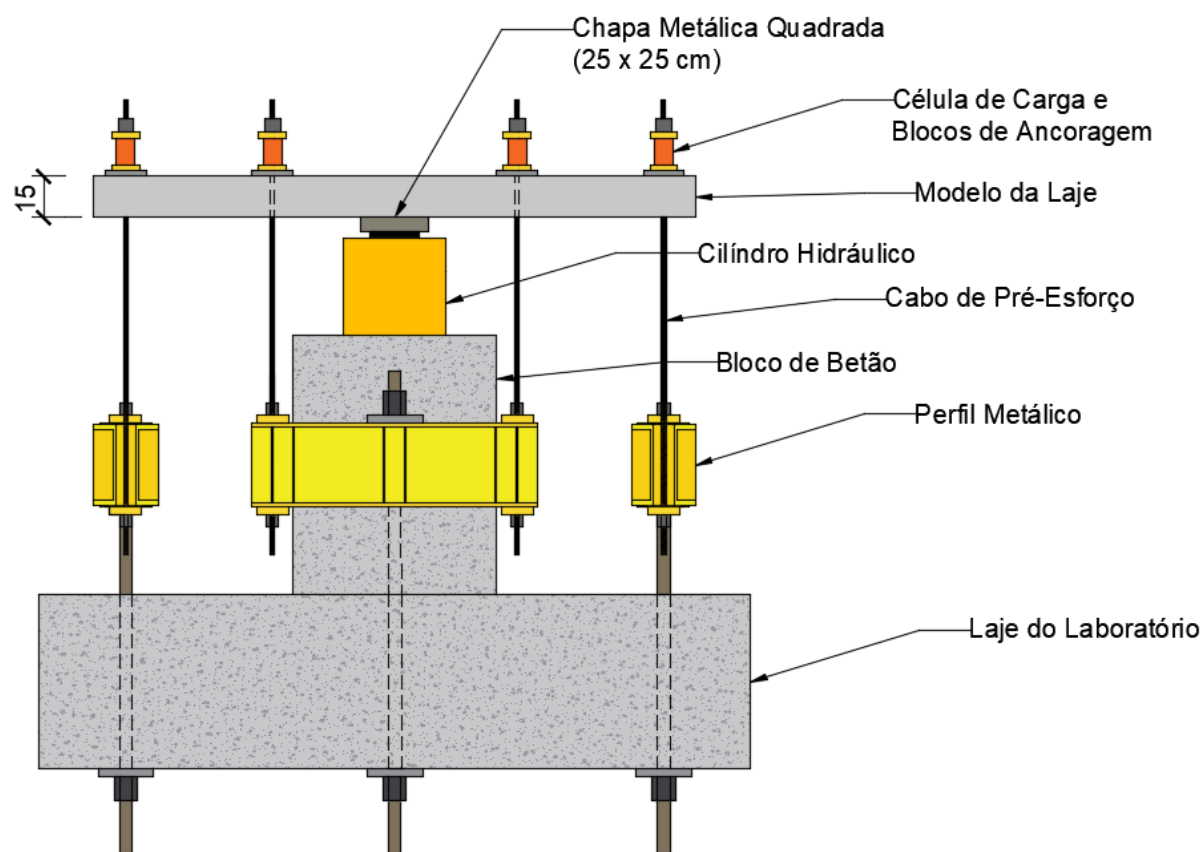


Figura 3.7 - Sistema de Ensaio (dimensões em cm)

As Figuras 3.8 e 3.9 são referentes ao cilindro hidráulico e à unidade de controlo e pressão hidráulica utilizados no ensaio, respetivamente.



Figura 3.8 - Cilindro Hidráulico



Figura 3.9 - Unidade de controle e pressão hidráulica

Para simular uma zona de momentos negativos da laje junto aos apoios, o deslocamento da laje foi restringido nas extremidades em 8 pontos, mas a sua rotação foi permitida. Previamente, na colocação da armadura na cofragem, foram colocados 8 tubos de PVC (1 em cada apoio) para deste modo poder ser colocado um cordão de aço de alta resistência.

A Figura 3.10 é referente á zona do tubo referida anteriormente, antes e após a betonagem, respetivamente.



Figura 3.10 - Zona do tubo antes e após a betonagem

Na face superior da laje, foi colocada em cada apoio uma chapa aço com $150 \times 150 \times 20 \text{ mm}^3$ sobre uma camada de gesso, para que deste modo a chapa de aço ficasse nivelada e se garantisse que toda a chapa estivesse apoiada. Após a secagem do gesso, a chapa de aço foi atravessada por um cordão de aço de alta resistência após o qual foi colocada uma célula de carga (foram utilizadas 6 células de carga do tipo CLC-200KNA e 2 do tipo CLC-300KNA) para que deste modo fosse possível verificar a carga vertical aplicada. Sobre a célula de carga foi colocado uma chapa de aço com $100 \times 100 \times 20 \text{ mm}^3$ onde posteriormente foi fixa por um sistema de cilindro e cunhas.

A Figura 3.11 demonstra este sistema de fixação previamente descrito.



Figura 3.11 - Sistema de fixação das células de carga

Na face inferior da laje, o cordão de aço de alta resistência foi fixado a um perfil metálico, onde na face inferior do perfil foi utilizada para a fixação uma chapa de aço com 100x100x20 mm³ e um sistema de cilindro e cunhas.

A Figura 3.12 apresenta uma vista geral do sistema de fixação da laje para a realização do ensaio.



Figura 3.12 - Sistema de fixação da laje

Para a monitorização dos deslocamentos verticais da laje, foram colocados na face superior da mesma 11 defletómetros elétricos da TML. Para que a rugosidade da laje não influenciasse as leituras, foram coladas com silicone chapas quadradas de acrílico na superfície superior da laje, ficando deste modo em contacto com as pontas dos defletómetros.

Na face inferior da laje utilizaram-se 5 defletómetros de fio SPD-50-3. Estes defletómetros foram conectados a uma base magnética, estando a ponta dos defletómetros presa a um

camarão previamente colocado na laje com recurso a uma bucha de plástico, sendo então possível medir os deslocamentos da face inferior da laje.

Os defletómetros D11, D4, D2 e D1 foram colocados na direção Este-Oeste, perpendicularmente à maior altura útil da armadura longitudinal superior, enquanto os defletómetros D5, D6, D8, D9 e D10 foram colocados na direção Norte - Sul segundo a maior altura útil da armadura longitudinal superior.

O defletómetro D3 foi colocado no centro geométrico da laje.

Os defletómetros D15 e D16 foram colocados na direção Este-Oeste, perpendicularmente à maior altura útil da armadura longitudinal inferior, enquanto os defletómetros D12, D13 e D14 foram colocados na direção Norte - Sul segundo a maior altura útil da armadura longitudinal inferior. Uma vez que, devido ao posicionamento do macaco hidráulico que não permitia a colocação de um defletómetro no centro geométrico da laje, foi colocado o mais próximo possível do mesmo.

As Figuras 3.13 e 3.14 mostram a posição dos defletómetros e das células de carga, estando as suas cotagens em metros.

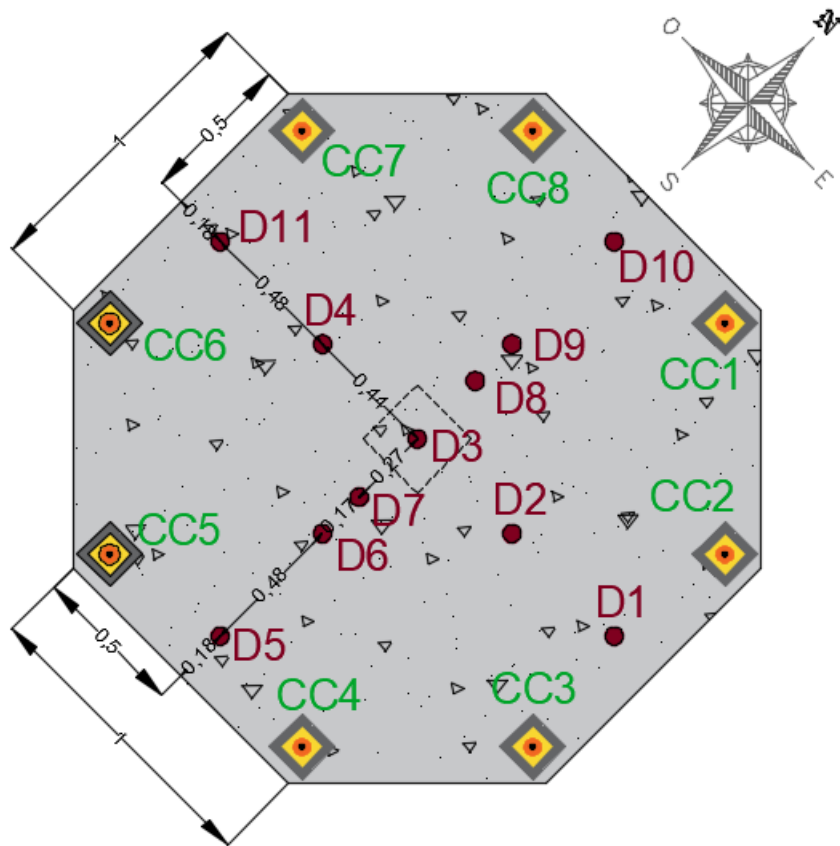


Figura 3.13 - Posição e numeração dos defletômetros superiores e das células de carga com cotas em m

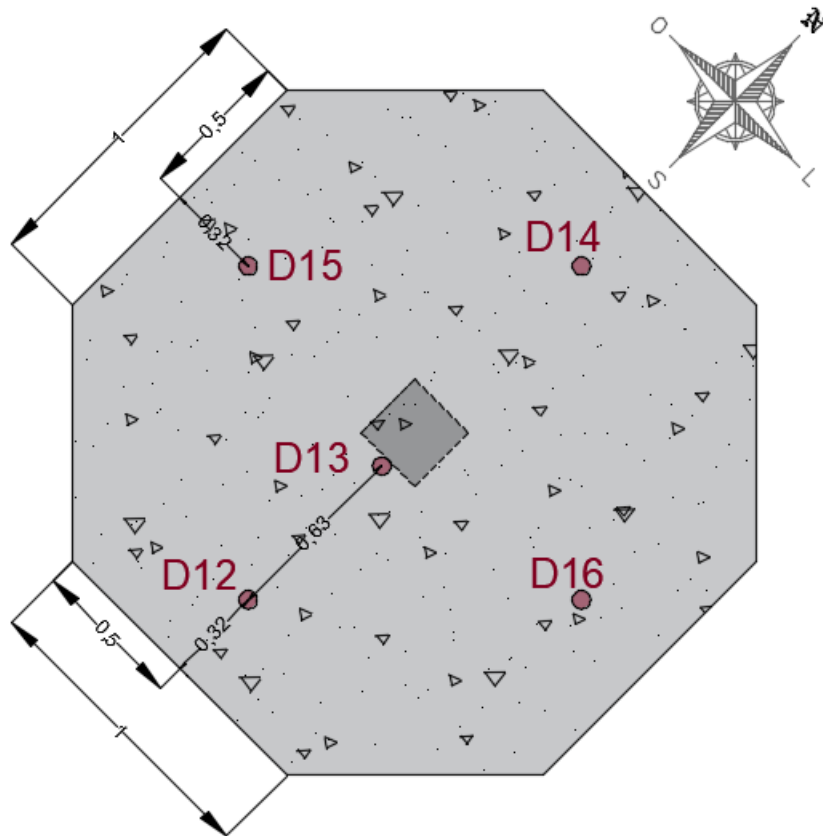


Figura 3.14 - Posição e numeração defletômetros inferiores com cotas em m

Para a medição das extensões das armaduras foram colocados extensômetros elétricos do tipo FLAB-5-11-5LJC-F em alguns varões da armadura superior. Foram colocados dois extensômetros por cada varão, tendo sido colados no varão em posições diametralmente opostas.

A Figura 3.15 e 3.16 mostra o posicionamento dos extensômetros na armadura superior.

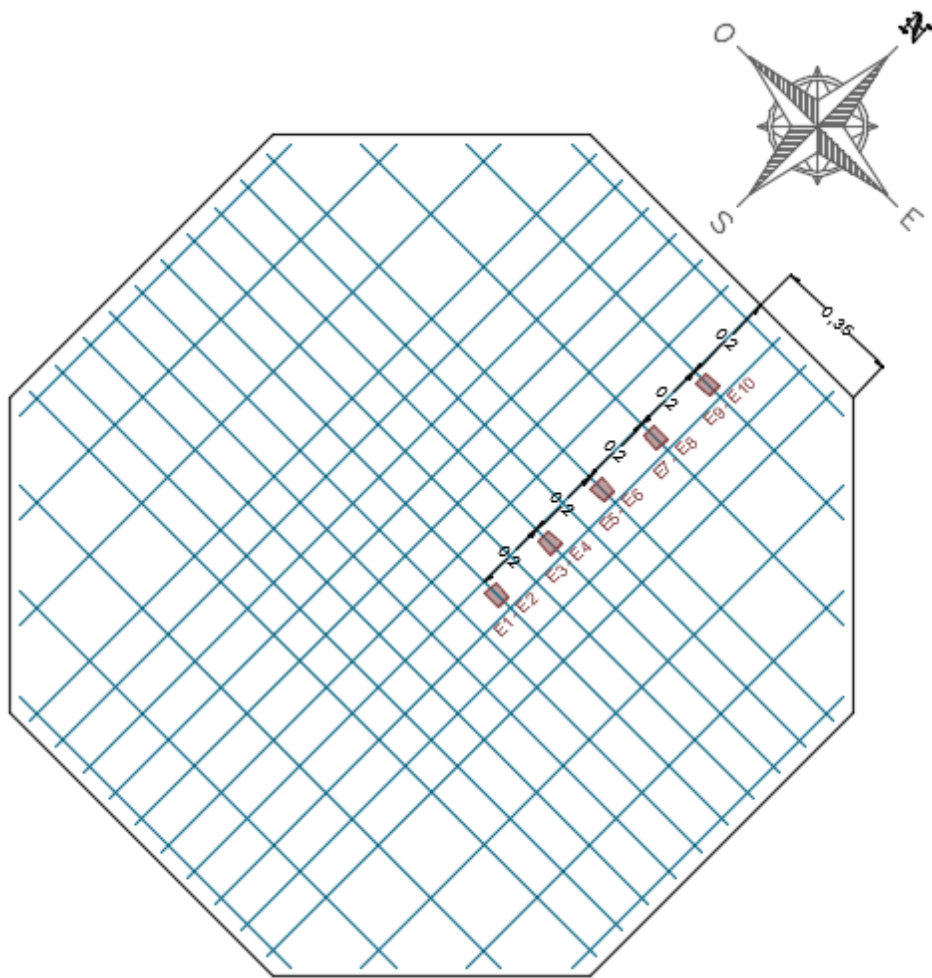


Figura 3.15 - Numeração e posição dos extensómetros



Figura 3.16 - Extensómetros

3.6 Caracterização Mecânica

Para a caracterização mecânica das misturas de betão, foram realizados ensaios de compressão do betão e ensaios de tração do betão por compressão diametral.

Foram testados provetes cúbicos com 150 mm de lado nos ensaios de resistência à compressão do betão e provetes cilíndricos com diâmetro de 150 mm e 300 mm de altura nos ensaios de resistência do betão à tração por compressão diametral.

Foi também realizado um ensaio de abaixamento (cone de Abrams) para deste modo ser possível verificar a sua consistência e fluidez.

Os provetes foram preparados e curados seguindo as normas NP EN 12390-1 e NP EN 12390-2.

Todos os ensaios foram realizados após 28 dias de cura do betão.

3.6.1 Resistência à Compressão do Betão

Os ensaios para a determinação da resistência à compressão dos provetes cúbicos de betão, foram realizados numa prensa FORM-TEST do tipo BETA2-300E com uma capacidade máxima de 3000 kN. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma NP EN 12390-3.

Nos ensaios dos provetes cúbicos, duas das faces lisas dos provetes foram deixadas em contacto com os pratos da prensa, para que deste modo a tensão aplicada pela prensa fosse igualmente distribuída em toda a face do provete.

Os valores das resistências à compressão do betão com uma diferença superior a 15% da resistência à compressão do betão média foram desprezados.

Na Tabela 3.5 são apresentados os valores obtidos para as resistências à compressão do betão dos vários provetes cúbicos para as diferentes misturas.

Tabela 3.5 - Resistência à compressão do betão após 28 dias de cura do betão

Mistura	$f_{c,cubo}$ (MPa)
RCA1-0	48,3
	55,3
	56,1
RCA1-50	46,4
	48,6
	48,7
	48,9
	47,6
	48,4
	48,5
	53,1
	41,8
RCA1-100	39,2
	38,6
	35,9
	35,0
	36,6
	36,9
	34,0

Na Tabela 3.6 são apresentados os valores médios da resistência à compressão do betão de cada mistura.

Tabela 3.6 - Média da resistência à compressão do betão de cada mistura após 28 dias de cura do betão

Mistura	$f_{c,cubo}$ (MPa)	Perda de resistência dos provetes cúbicos (%)
RCA1-0	53,2	-
RCA1-50	48,0	-9,8
RCA1-100	36,6	-31,2

Houve uma perda significativa da resistência à compressão do betão da mistura RCA1-100 quando comparada com a laje RCA1-0 (-31,2%). Esta perda de resistência pode ser devido ao aumento da quantidade de água na mistura RCA1-100, uma vez que o aumento da quantidade de água reduz a resistência à compressão do betão.

Na Figura 3.17, pode-se observar um cubo após ter sido realizado o ensaio à compressão do betão.



Figura 3.17 - Ensaio à compressão do betão em cubos

3.6.2 Resistência do Betão à Tração por Compressão Diametral

Os ensaios realizados para a determinação da resistência do betão à tração por compressão diametral, foram realizados tendo em conta a norma EN 12390-6 (2000).

Este ensaio não foi realizado na mistura RCA-0 pois como apenas existiam poucos cilindros disponíveis, e uma vez que este ensaio possui uma grande dispersão de resultados, decidiu-se não o realizar.

Tendo em conta a força de rotura, o cálculo da resistência do betão à tração por compressão diametral teve em conta a norma EN 12390-6 (2000), calculando-se através da equação (3.1).

$$f_{ct,sp} = \frac{2 * P_{sp}}{\pi * L_{sp} * d_{sp}} \quad (3.121)$$

Onde,

P_{sp} é a força máxima de rotura

L_{sp} é o comprimento da superfície de contato entre os pratos da prensa e o provete

d_{sp} é o diâmetro da superfície circular do provete

Na Tabela 3.7 são apresentados os valores obtidos para as resistências do betão à tração por compressão diametral dos vários provetes das diferentes amassaduras.

Tabela 3.7 - Resistência do betão à tração por compressão diametral

Mistura	$f_{ct,sp}$ (MPa)
RCA1-50	4,6
	4,5
	2,9
	4,7
	3,1
	3,9
RCA1-100	1,8
	2,5
	3,2
	1,8
	2,9
	2,5

Na Tabela 3.8 são apresentados os valores médios da resistência do betão à tração por compressão diametral de cada mistura de betão.

Tabela 3.8 - Resistência do betão à tração por compressão diametral média

Mistura	$f_{ct,sp}$ (MPa)
RCA1-50	3,9
RCA1-100	2,4

Na Figura 3.18 é possível observar a rotura de um provete cilíndrico após o ensaio à tração do betão por compressão diametral.



Figura 3.18 - Ensaio à tração do betão por compressão diametral

3.6.3 Ensaio de Abaixamento (Cone de Abrams)

O ensaio de abaixamento foi realizado segundo a norma NP EN 12350-2.

Os resultados obtidos para o abaixamento de cada amassadura encontram-se presente na Tabela 3.9. Não foi realizado este ensaio para a quarta amassadura da mistura RCA1-0, pois ocorreu um problema com a pesagem da água necessária para a amassadura, tendo a mesma ficado muito líquida.

Tabela 3.9 - Resultados do ensaio Cone de Abrams

Mistura	Abaixamento (mm)
RCA1-0	200
	205
	152
	149
RCA1-50	34
	38
	29
	33
	53
	96
RCA1-100	35
	36
	94
	67
	111

A Figura 3.19 demonstra partes do processo do ensaio de Cone de Abrams.



Figura 3.19 - Ensaio de Abaixamento (Cone de Abrams)

ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Introdução

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos nos ensaios dos modelos de laje descritos no capítulo anterior, bem como a sua análise. Foram analisadas a relação carga-deslocamento, os modos de rotura, deslocamentos verticais e a extensão na armadura longitudinal superior para os diferentes modelos de laje construídos.

4.2 Relação Carga - Deslocamento

Como referido na secção 3.3.5, foram instalados 11 defletómetros na face superior da laje e 5 defletómetros na face inferior da mesma, permitindo determinar os deslocamentos na laje. A posição e numeração dos defletómetros foi descrita na mesma secção.

Nas Figuras 4.1 e 4.2 são apresentados os gráficos com a evolução dos deslocamentos verticais em função da carga vertical aplicada. O deslocamento foi obtido através da média dos deslocamentos nos pontos mais distantes do centro. Ou seja, para a face superior da laje foi calculada a média dos deslocamentos nos defletómetros D1, D5, D10 e D11, subtraindo o deslocamento obtido no defletómetro central D3, enquanto para a face inferior da laje foi calculada a média dos deslocamentos nos defletómetros D12, D14, D15 e D16 subtraindo o deslocamento obtido no defletómetro mais central D13.

A carga aplicada foi calculada através da soma da força lida em cada uma das oito células de carga montadas na face superior da laje, como descrito e numerado na secção 3.3.5, tendo em conta o peso próprio da laje e o peso do sistema de ensaio.

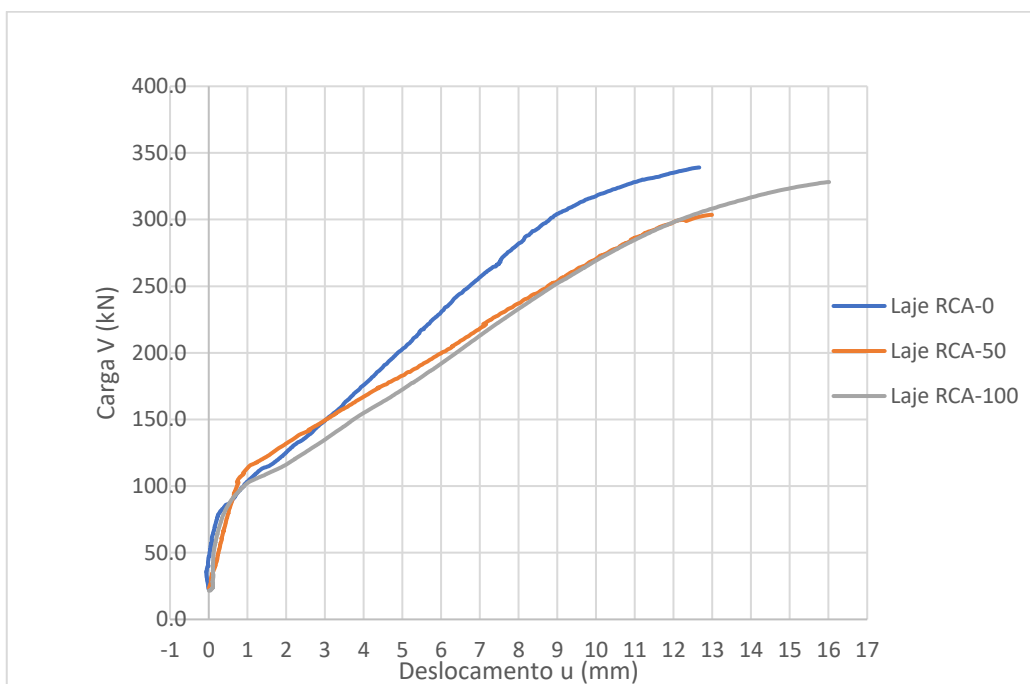


Figura 4.1 - Deslocamentos verticais na face superior da laje em função da carga aplicada para cada modelo

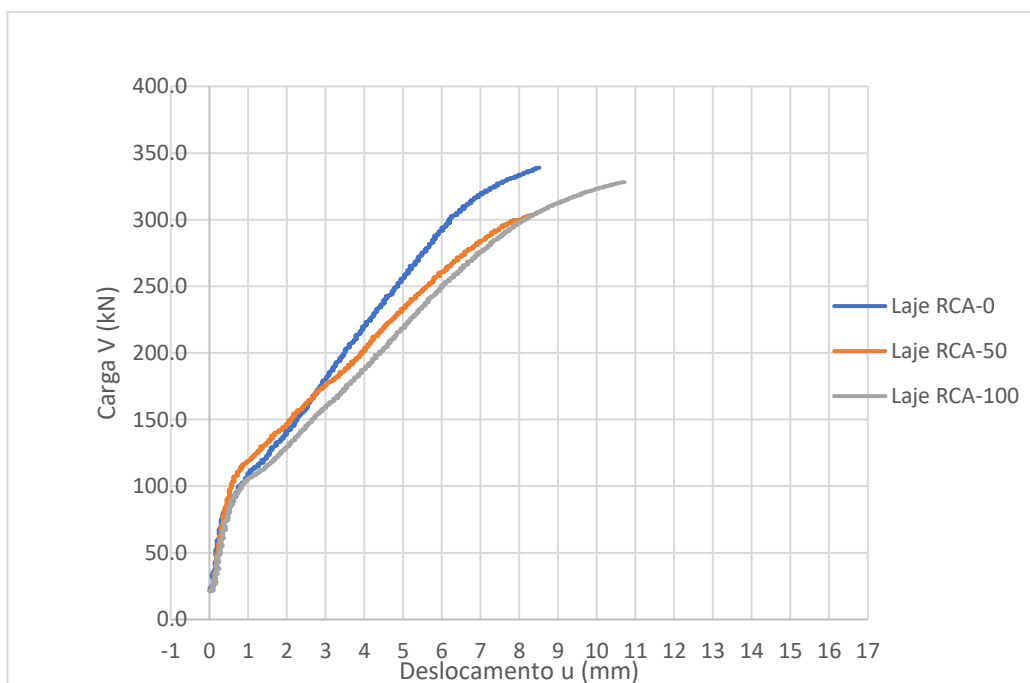


Figura 4.2 - Deslocamentos verticais na face inferior da laje em função da carga aplicada para cada modelo

Nas Figura 4.1 e 4.2, é possível observar três fases distintas: a primeira fase correspondendo a um comportamento elástico, representado por um trecho linear, onde não se verificou abertura de fendas; a segunda fase corresponde à fase linear posterior ao início da abertura

de fendas por flexão na laje, onde a resistência à tração do betão já foi atingida, diminuindo a rigidez da laje, onde existe o aumento da abertura das fendas e uma rigidez constante, representada por um troço reto no gráfico, mas com um declive menor do que a primeira fase; a terceira e última fase corresponde a uma fase plástica, onde há uma redução gradual da rigidez até ocorrer a rotura da laje.

Verifica-se uma redução da rigidez da laje na segunda fase (após o início da fendilhação), especialmente com o aumento da percentagem de agregados grossos reciclados, traduzido por um menor declive das retas no gráfico.

A rigidez após início da fendilhação é semelhante nas lajes com incorporação de agregados reciclados, sendo inferior à da laje de referência.

Também foi possível verificar que o início da fendilhação (transição da primeira fase para a segunda fase) para a laje RCA1-50 ocorre para uma maior força aplicada na laje, do que os restantes modelos, verificando-se também uma menor rigidez inicial, traduzida por um menor declive inicial.

4.3 Modos de Rotura

Todas as lajes tiveram uma rotura de punçoamento típica de lajes fungiformes sujeitas a forças verticais concentradas. Inicialmente verificou-se o aparecimento de fendas radiais, seguidas das fendas tangencias e finalmente uma fenda circunferencial cuja fissura foi aumentando, ocorrendo a rotura por punçoamento quando houve a penetração da chapa de aço na face inferior da laje.

As Figuras 4.3, 4.5 e 4.7 correspondem às vistas superiores das lajes após a rotura para as lajes RCA1-0, RCA1-50 e RCA1-100, respetivamente, enquanto as Figuras 4.4, 4.6 e 4.8 correspondem às vistas inferiores das lajes após a rotura, seguindo a mesma ordem.

Na Figura 4.6 e 4.8 é possível verificar uma zona de má vibração do betão, verificando-se espaços vazios entre os agregados, embora na Figura 4.8 esta zona seja menor.



Figura 4.3 - Vista superior da laje RCA1-0 após a rotura



Figura 4.4 - Vista inferior da laje RCA1-0 após a rotura



Figura 4.5 - Vista superior da laje RCA1-50 após a rotura



Figura 4.6 - Vista inferior da laje RCA1-50 após a rotura



Figura 4.7 - Vista superior da laje RCA1-100 após a rotura



Figura 4.8 - Vista inferior da laje RCA1-100 após a rotura

4.4 Deslocamentos Verticais

No presente capítulo, irão ser apresentadas as deformadas obtidas para cada laje, incluindo também as deformadas para cada patamar de carga com um incremento de 50 kN, até ser atingida a carga de rotura.

4.4.1 RCA1-0

Na Figura 4.9, apresentam-se os deslocamentos absolutos verticais para a laje RCA1-0 ao longo do ensaio. Tendo em consideração o peso próprio do modelo de 21,5 kN, a curva apenas se inicia neste nível de carga. Para este modelo, verificou-se que o maior deslocamento foi de 15,23 mm, para uma carga aplicada de 339,1 kN.

As Figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 apresentam os deslocamentos relativos do modelo nas direções N-S e E-O, tanto para a parte inferior do modelo, como para a parte superior do mesmo, sofrendo incrementos de 50 kN até ser atingida a carga máxima. Pode-se observar que houve uma ligeira rotação de corpo rígido na direção N-S, pois para a carga de 50 kN os defletómetros nos extremos da laje registaram um abaixamento da laje (defletómetro D5) enquanto o defletómetro D10 registou uma subida da laje. Esta rotação poderá ter ocorrido devido a uma má fixação dos varões do sistema de ensaio.

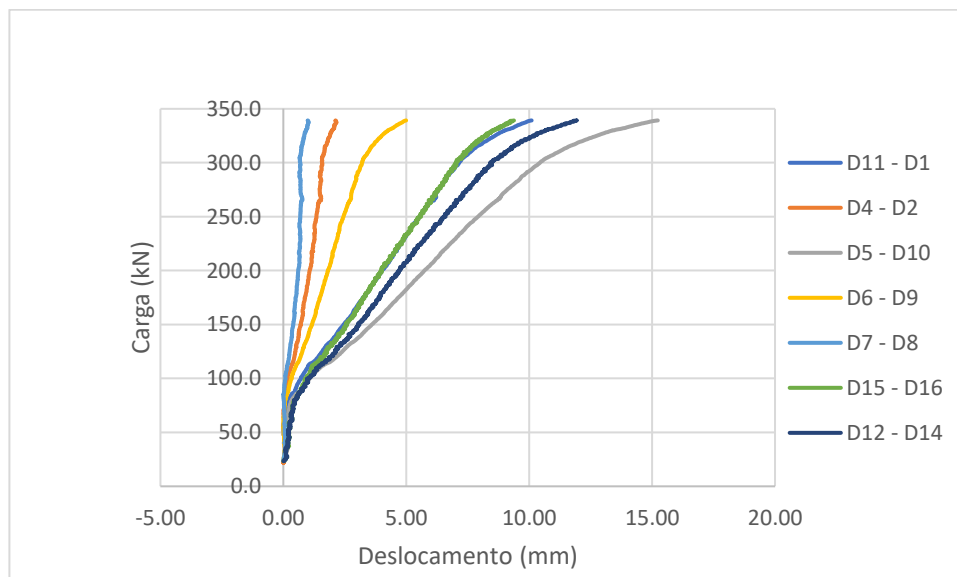


Figura 4.9 - Evolução dos deslocamentos verticais com o aumento da carga vertical aplicada

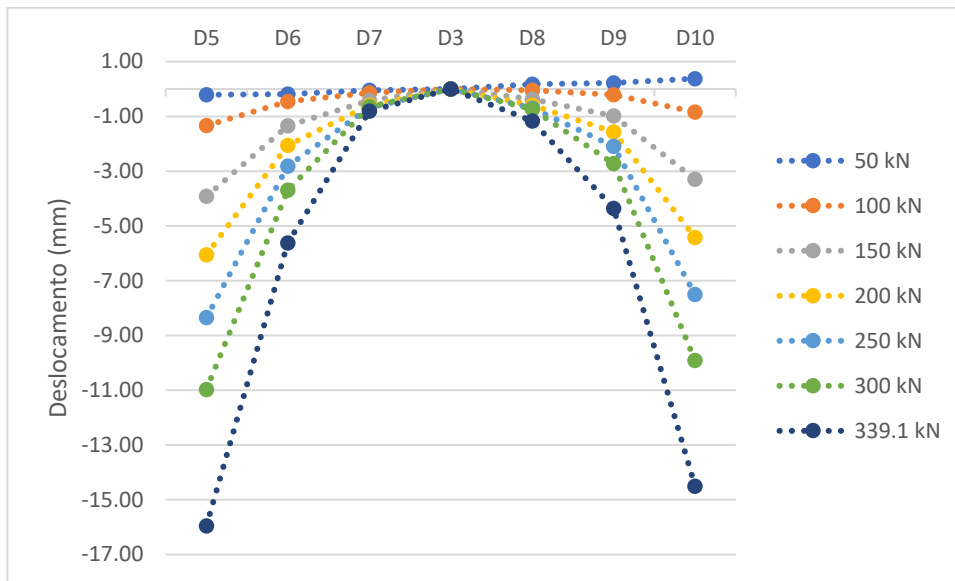


Figura 4.10 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento N-S Superior

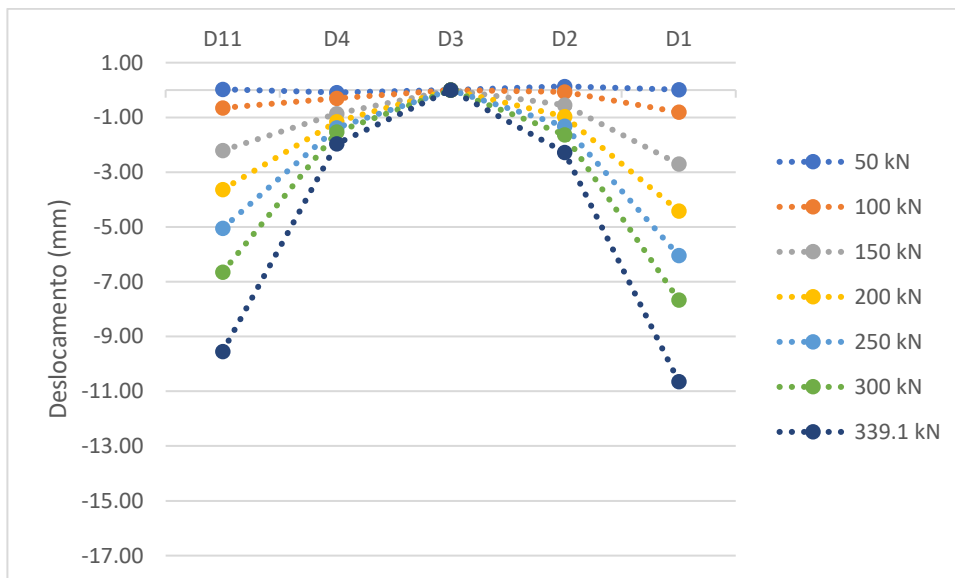


Figura 4.11 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento E-O Superior

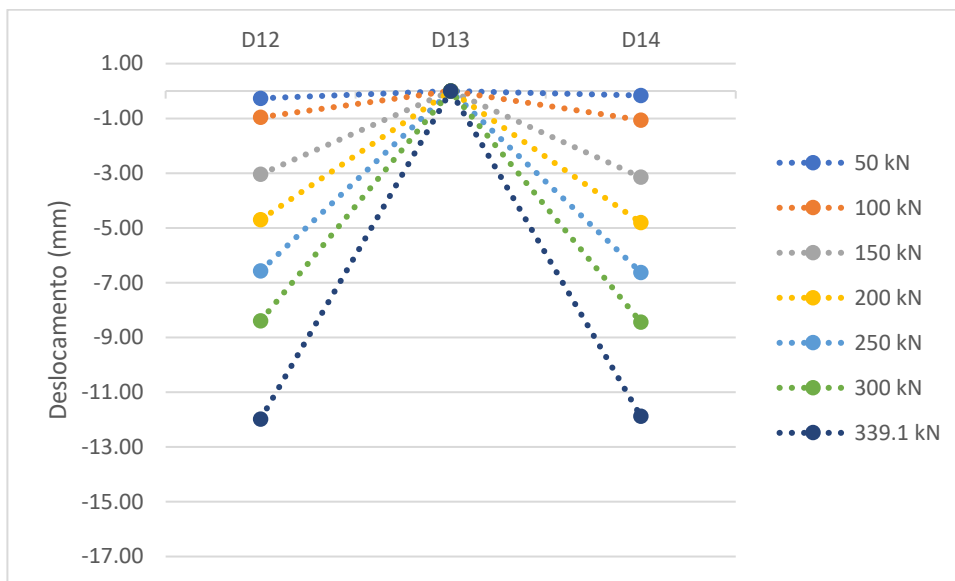


Figura 4.12 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento N-S Inferior

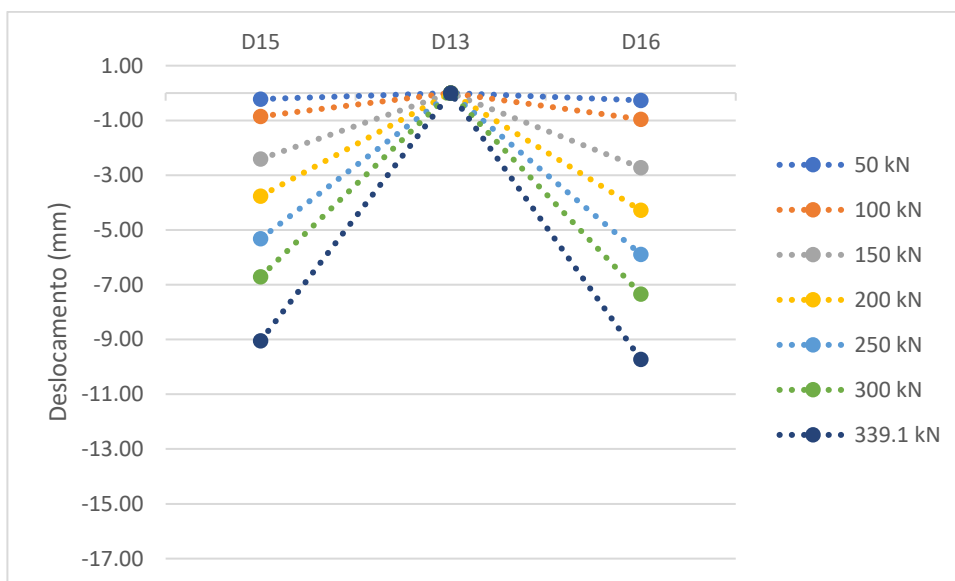


Figura 4.13 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento E-O Inferior

4.4.2 RCA1-50

A Figura 4.14 apresenta os deslocamentos absolutos verticais para a laje RCA1-50 ao longo do ensaio. Tendo em consideração o peso próprio do modelo de 21,5 kN, a curva apenas se inicia neste nível de carga. Para este modelo, verificou-se que o maior deslocamento foi de 13,74 mm, para uma carga aplicada de 303,5 kN.

As Figuras 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 apresentam os deslocamentos relativos do modelo nas direções N-S e E-O, tanto para a parte inferior do modelo, como para a parte superior do mesmo, sofrendo incrementos de 50 kN até ser atingida a carga máxima.

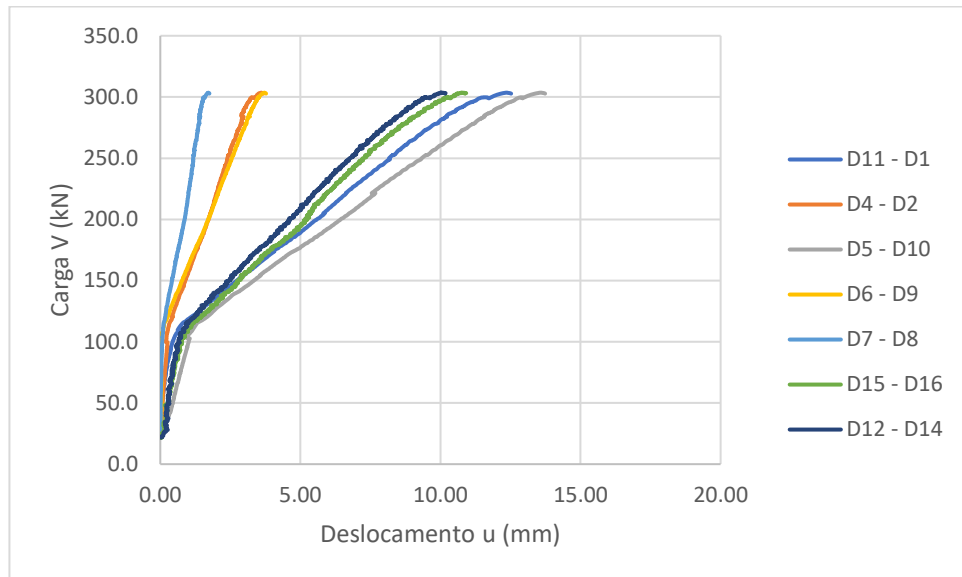


Figura 4.14 - Evolução dos deslocamentos verticais com o aumento da carga vertical aplicada

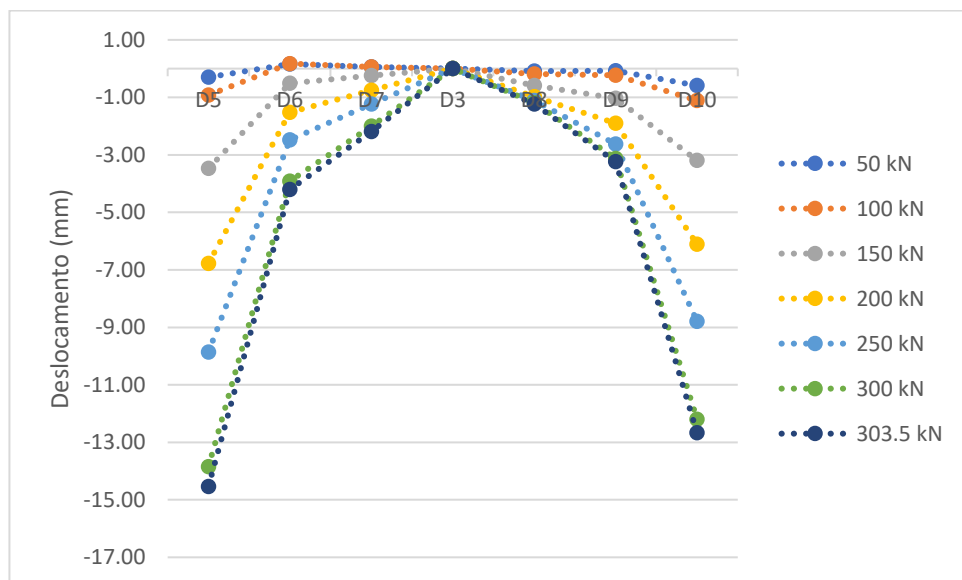


Figura 4.15 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento N-S Superior

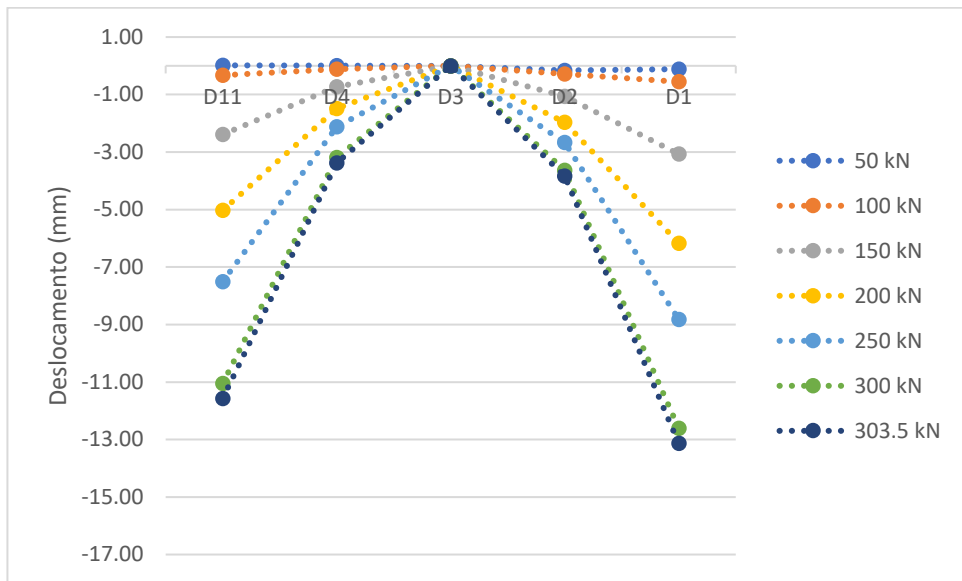


Figura 4.16 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento E-O Superior

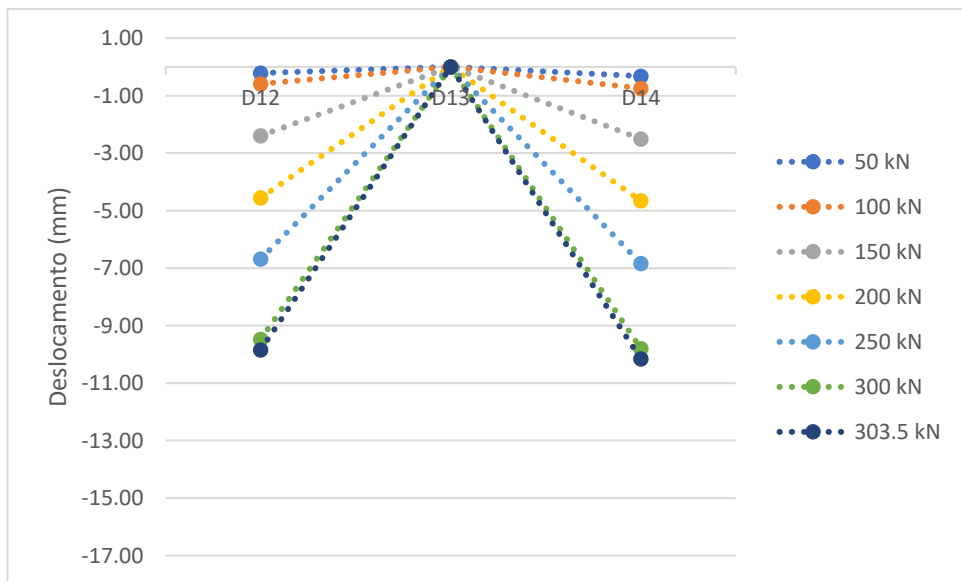


Figura 4.17 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento N-S Inferior

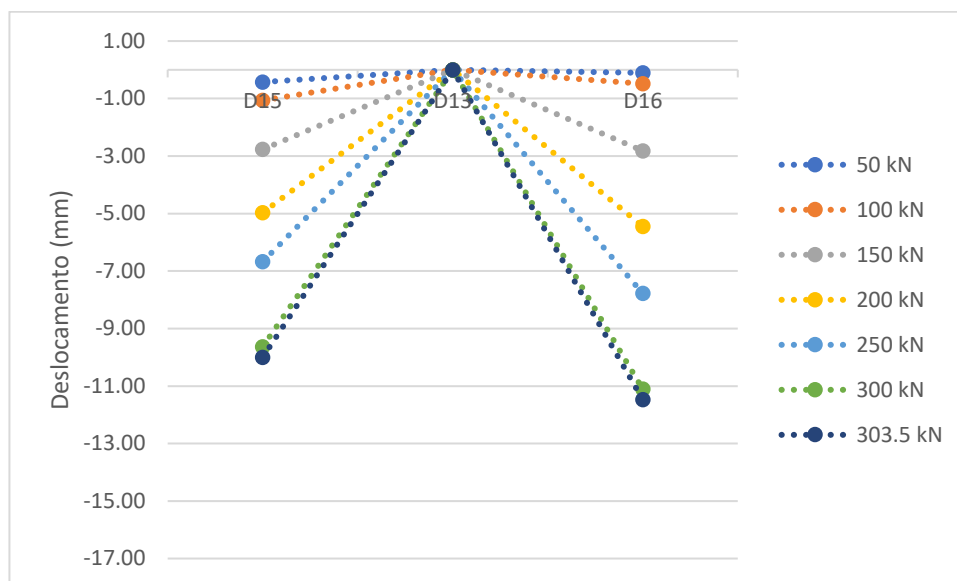


Figura 4.18 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento E-O Inferior

4.4.3 RCA1-100

A Figura 4.19 apresenta os deslocamentos absolutos verticais para a laje RCA1-100 ao longo do ensaio. Tendo em consideração o peso próprio do modelo de 21,5 kN, a curva apenas se inicia neste nível de carga. Para este modelo, verificou-se que o maior deslocamento foi de 19,63 mm, para uma carga aplicada de 328,1 kN.

As Figuras 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23 apresentam os deslocamentos relativos do modelo nas direções N-S e E-O, tanto para a parte inferior do modelo, como para a parte superior do mesmo, sofrendo incrementos de 50 kN até ser atingida a carga máxima. Através da análise da Figura 50, é possível observar que ocorreu uma rotação de corpo rígido durante o ensaio, uma vez que, para o patamar de carga mais baixo (50kN), o defletómetro D5 assinalou um levantamento da laje enquanto o defletómetro D10 assinalou um abaixamento da laje. Esta rotação deverá ter ocorrido, devido a diferentes ajustes nas ancoragens.

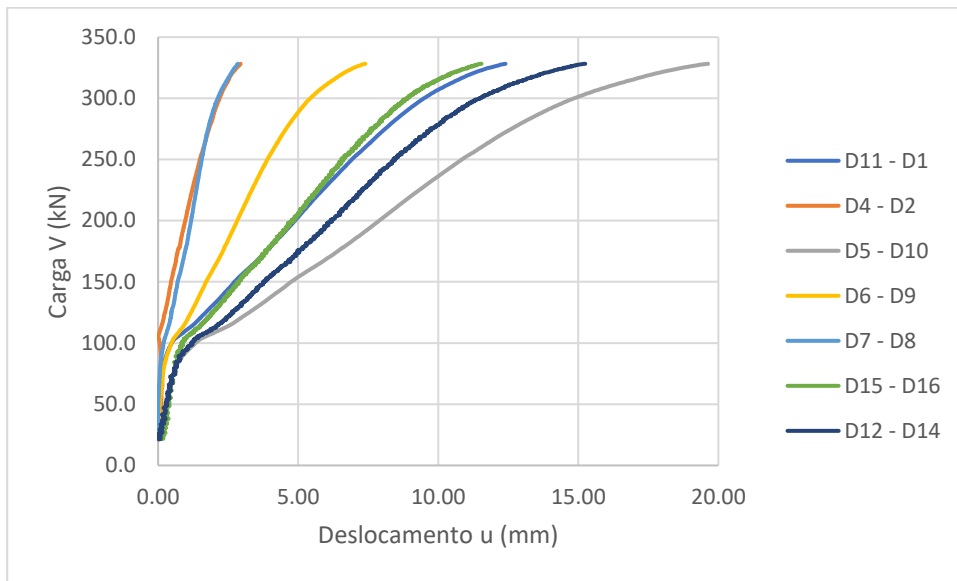


Figura 4.19 - Evolução dos deslocamentos verticais com o aumento da carga vertical aplicada

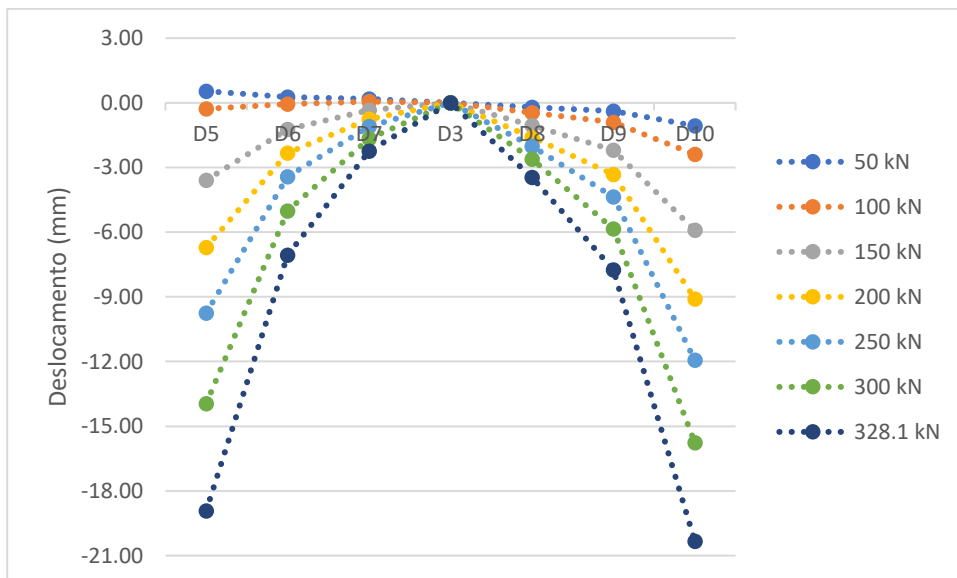


Figura 4.20 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento N-S Superior

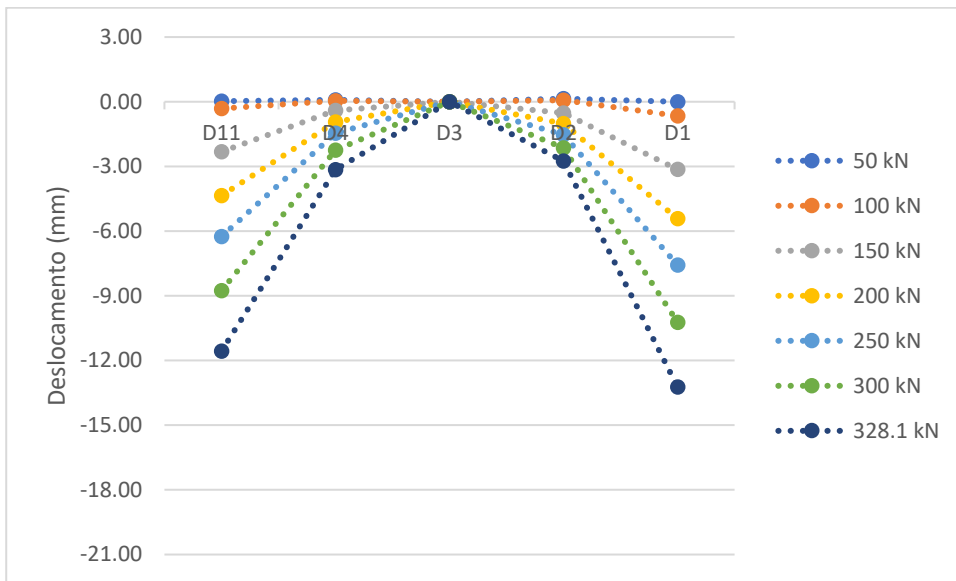


Figura 4.21 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento E-O Superior

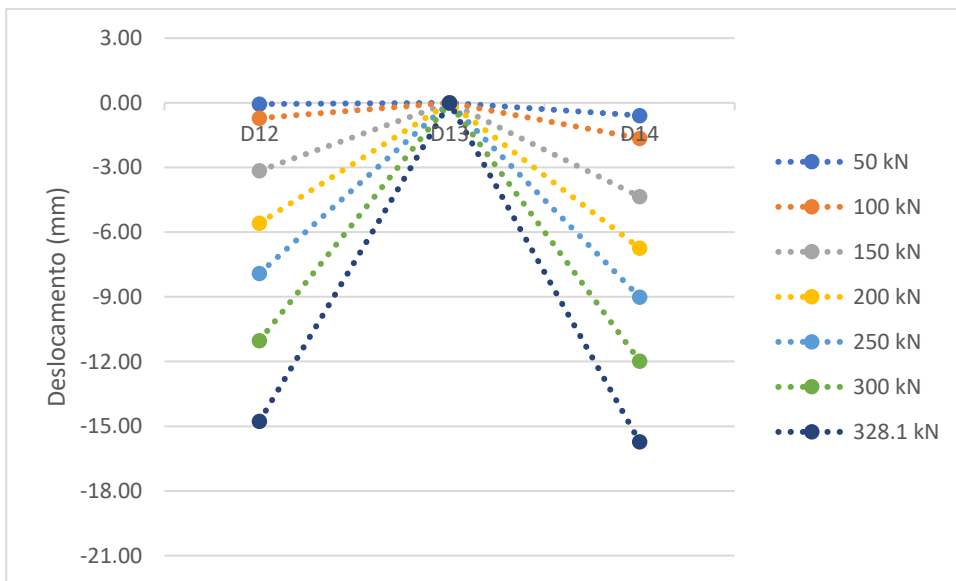


Figura 4.22 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento N-S Inferior

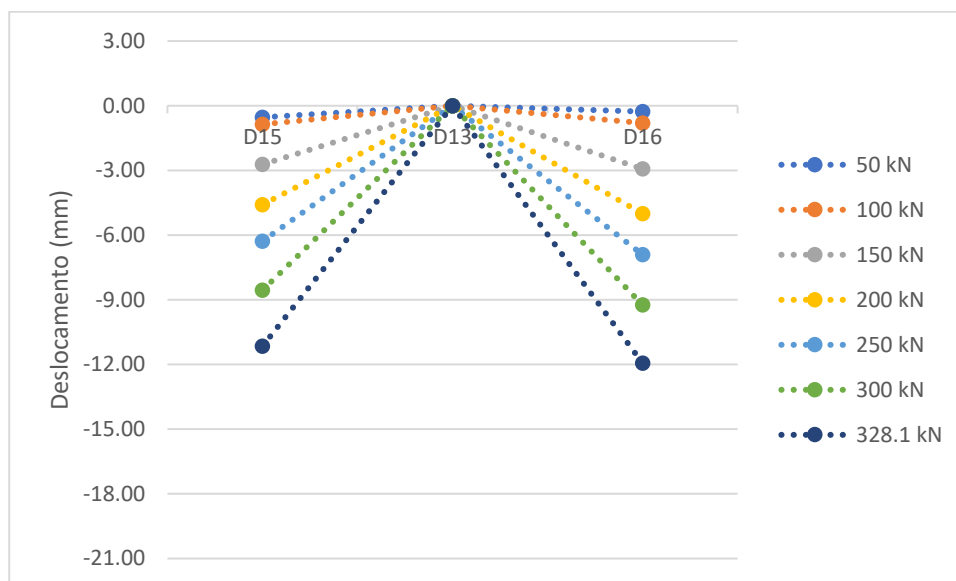


Figura 4.23 - Deformada para os diferentes patamares de carga para o alinhamento E-O Inferior

4.4.4 Considerações Finais

Comparando os deslocamentos nas duas principais direções, podemos observar que os maiores deslocamentos ocorrem na direção N-S, sendo esta a direção onde a armadura tinha uma menor altura útil, independentemente do modelo.

Pode-se concluir que a incorporação dos agregados grossos reciclados diminui a rigidez das lajes, tendo estas uma rigidez inferior à laje de referência, sendo esta diminuição de rigidez mais notória na fase após a fendilhação da laje.

4.5 Extensões na Armadura Longitudinal Superior

Na presente seção, irão ser apresentados os gráficos Extensão-Carga para os diferentes modelos, incluindo também a relação Extensão-Carga para cada patamar de carga com um incremento de 50 kN, até ser atingida a carga de rotura.

Como referido no capítulo 3, os extensómetros foram colocados na armadura longitudinal superior com menor altura útil, tendo sido colocados dois extensómetros em posições diametralmente opostas. A extensão foi obtida através da média dos resultados obtidos na leitura das extensões nos extensómetros diametralmente opostos.

4.5.1 RCA1-0

A Figura 4.24 apresenta a relação entre a carga e a extensão na armadura longitudinal superior. Devido a problemas com os extensómetros E2, E3, E6 e E9, nos pares de

extensômetros E1-E2, E3-E4, E5-E6 e E9-E10, não foram realizadas as médias das extensões, tendo apenas sido desprezados os valores das extensões obtidas nos extensômetros com anomalias de leitura, referidos anteriormente.

O extensômetro E1 começou a ter problemas de leitura a partir dos 150 kN, por esse motivo, nos Gráficos 55 e 56, os valores da extensão neste extensômetro é desprezado.

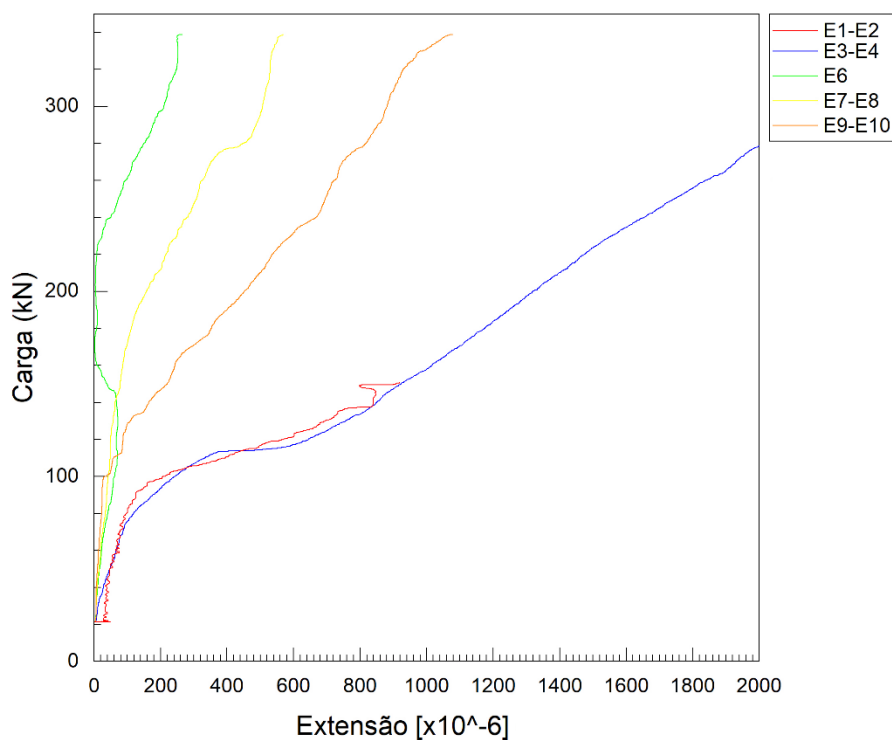


Figura 4.24 - Extensões na armadura longitudinal superior da laje RCA1-0

A Figura 4.25, apresenta as extensões lidas para os patamares de carga referidos na legenda. A rotura ocorreu sem a armadura longitudinal superior entrar em cedência, pelo menos de forma significativa, pelo que a rotura foi do tipo de punção puro. Os extensômetros colocados a uma distância de 400 mm do centro da laje tiveram erros na leitura, podendo ter sido danificados durante a betonagem da laje.

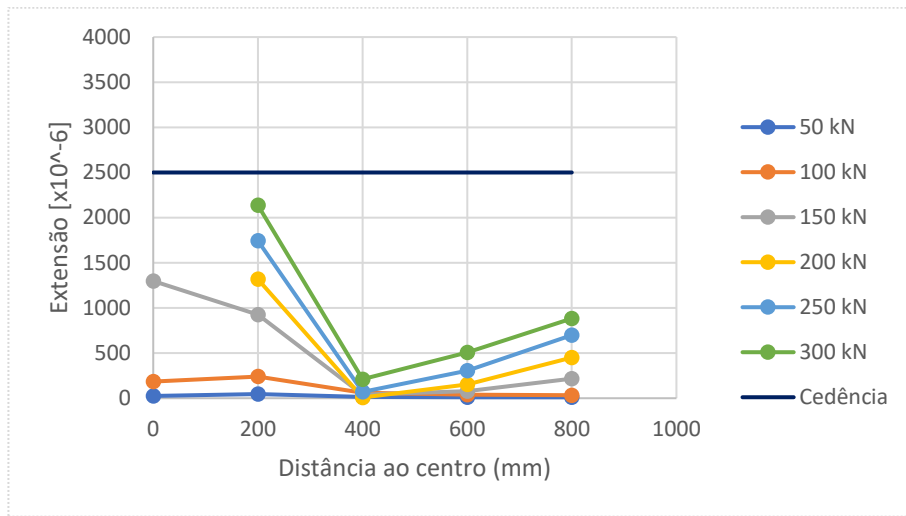


Figura 4.25 - Extensão para os diferentes patamares de carga

4.5.2 RCA1-50

A Figura 4.26 apresenta a relação entre a carga e a extensão na armadura longitudinal superior.

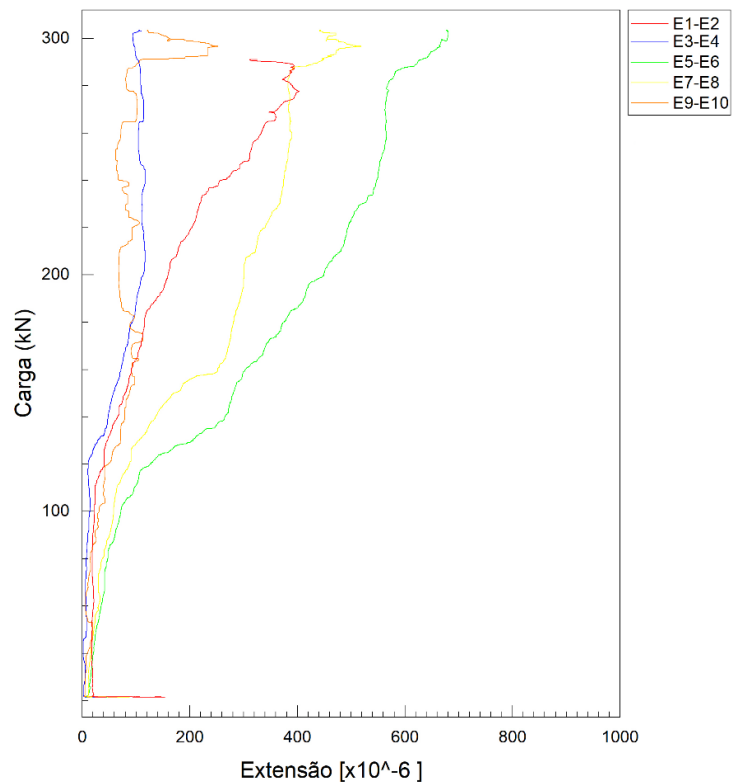


Figura 4.26 - Extensões na armadura longitudinal superior da laje RCA1-50

A Figura 4.27, apresenta as extensões lidas para os patamares de carga referidos na legenda. Os resultados lidos nos pares de extensômetros E1-E2 e E3-E4 foram desprezados para a realização deste gráfico, uma vez que os resultados lidos não foram os esperados para uma boa análise do gráfico presente na Figura 4.27.

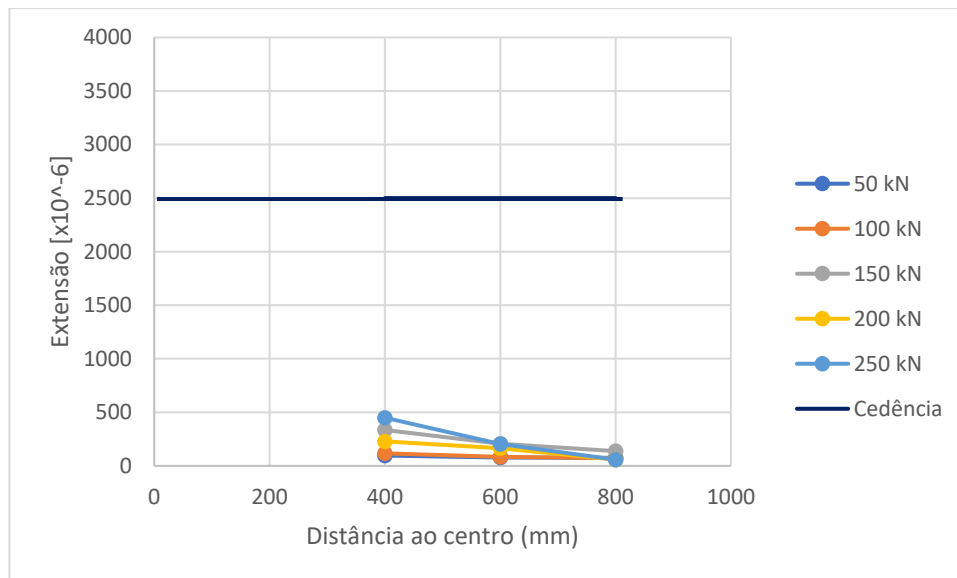


Figura 4.27 - Extensão para os diferentes patamares de carga

4.5.3 RCA1-100

A Figura 4.28 apresenta a relação entre a carga e a extensão na armadura longitudinal superior. Podemos observar pela análise das Figuras 4.28 e 4.29 que a laje teve armaduras em cedência, visto que as extensões eram superiores a 2500×10^{-6} .

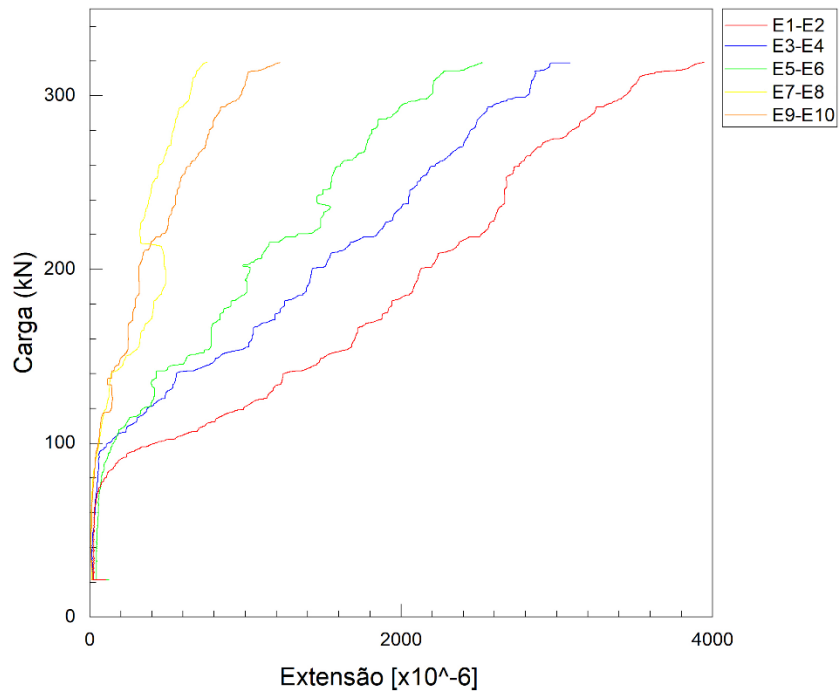


Figura 4.28 - Extensões na armadura longitudinal superior da laje RCA1-100

A Figura 4.29, apresenta as extensões lidas para os patamares de carga referidos na legenda.

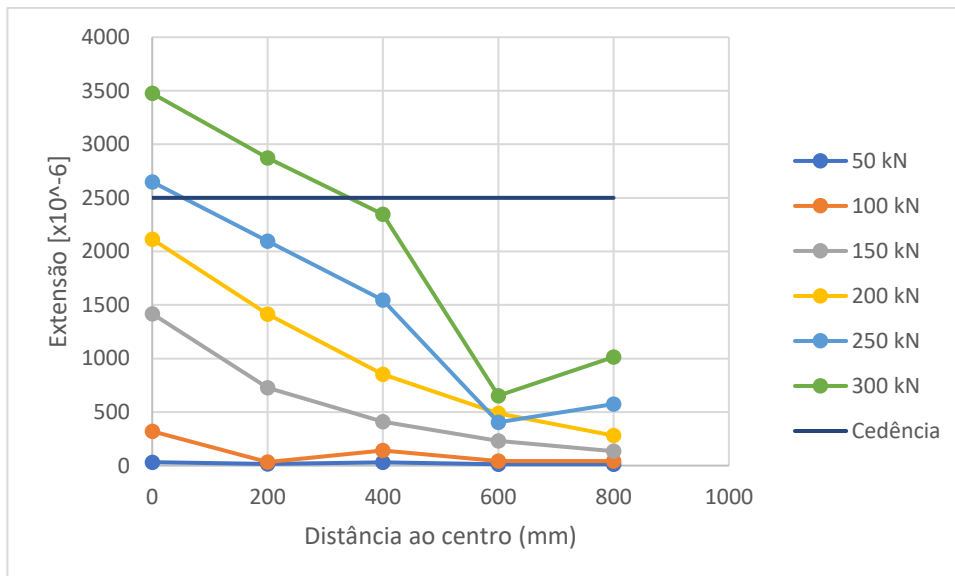


Figura 4.29 - Extensão para os diferentes patamares de carga

4.5.4 Considerações Finais

Após a análise dos gráficos da relação Extensão-Carga, é possível observar três fases distintas: a primeira fase representa um comportamento elástico linear; a segunda fase descreve uma fase de transição, onde ocorre perda de rigidez, surgindo também as primeiras fendas de flexão; a terceira e última fase é referente a um regime plástico, onde ocorre uma diminuição da rigidez até à rotura.

Em geral, as extensões são maiores nos varões junto ao pilar, decrescendo à medida que nos afastamos deste, como seria de esperar.

Apenas a laje RCA1-100 tinha as armaduras em cedência, ou seja, a sua extensão era superior a 2500×10^{-6} , influenciando o comportamento da laje. Não se pode retirar nenhuma conclusão das extensões nas lajes RCA1-0 e RCA1-50, pois não se obteve leituras suficientes.

4.6 Análise do Efeito da incorporação de Agregados Grossos Reciclados no Betão na Capacidade de Carga

Na presente secção, irão ser comparados os valores experimentais obtidos para os diferentes modelos. Serão também calculadas as resistências ao punçoamento dos diferentes modelos contruídos segundo as normas apresentadas na secção 2.3 e 2.4 do presente documento, comparando-se estes com os valores experimentais.

4.6.1 Comparação dos valores experimentais entre modelos

De modo a ser possível fazer uma comparação entre os resultados experimentais obtidos para os diferentes modelos tendo em conta as diferenças de geometria da laje, a altura útil e, em especial, a resistência à compressão do betão, a comparação dos resultados foi realizada segundo a equação 4.1.

$$\frac{V_{exp}}{b_0 * d * \sqrt[3]{f_{ck}}} \quad (4.122)$$

A Figura 4.30 apresenta a comparação entre os diferentes modelos utilizando a expressão acima referida.

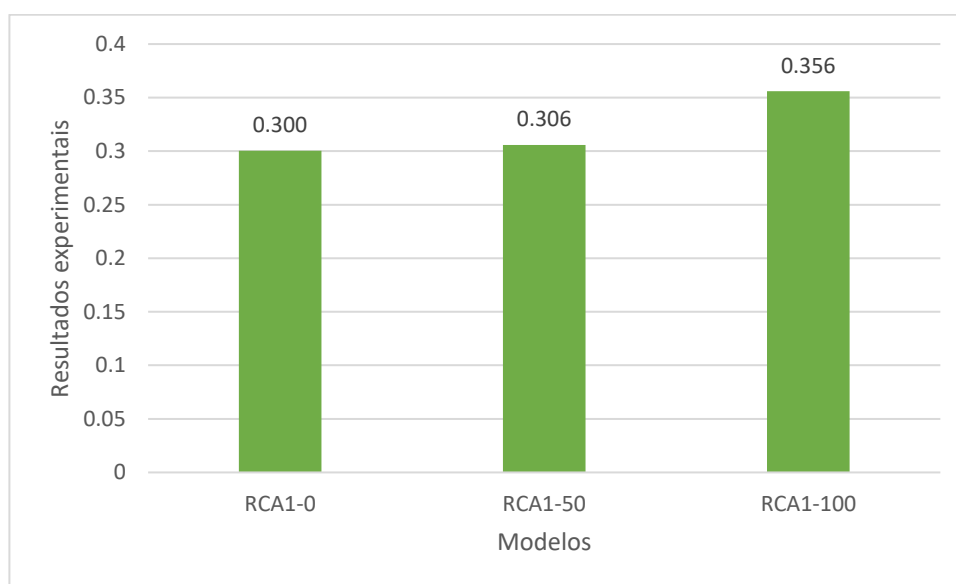


Figura 4.30 - Comparação resultados experimentais

Como se pode observar da Figura 4.30, em que se comparam os resultados experimentais independentemente da resistência do betão e das propriedades geométricas dos modelos, a incorporação de agregados grossos reciclados não levou a grandes alterações na capacidade resistente das lajes. De facto esta até cresceu ligeiramente quando se compara o modelo de referência (RCA1-0) com o modelo com 50% de incorporação (RCA1-50) e ainda mais quando comparado com o modelo RCA1-100, mas ainda dentro da margem de eventuais dispersões experimentais.

4.6.2 Eurocódigo 2 - NP EN 1992-1-1

Os valores obtidos para a resistência ao punçoamento dos diferentes modelos, segundo o Eurocódigo 2 encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Resistência ao Punçoamento segundo o Eurocódigo 2

Modelo	b_0 (mm)	d_{eff} (mm)	f_{ck} (MPa)	K	ρ_l	v_{min}	v_c	V_{Rm} (kN)
RCA1-0	2507,96	120,00	42,6	2	0,01	0,65	1,26	378,4
RCA1-50	2437,57	114,40	38,4	2	0,01	0,61	1,21	338,6
RCA1-100	2466,78	116,72	29,3	2	0,01	0,54	1,11	319,5

A Tabela 4.2 apresenta a comparação entre os resultados teóricos e experimentais para cada modelo.

Tabela 4.2 - Comparação do valor teórico e experimental

Modelo	V_{Rm} (kN)	V_{exp} (kN)	V_{exp}/V_{Rm}
RCA1-0	378,4	339,1	0,90
RCA1-50	338,6	303,5	0,90
RCA1-100	319,5	328,1	1,03

4.6.3 ACI 318-2019

Os valores obtidos para a resistência ao punçoamento dos diferentes modelos, segundo a norma americana encontram-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Resistência ao Punçoamento segundo a ACI 318-2019

Modelo	b_0 (mm)	d_{eff} (mm)	f_{ck} (MPa)	α_s	β_c	ν_c	V_{Rm} (kN)
RCA1-0	1480,00	120,00	42,6	40	1	2,15	382,5
RCA1-50	1457,59	114,40	38,4	40	1	2,04	340,9
RCA1-100	1466,89	116,72	29,3	40	1	1,79	305,8

A Tabela 4.4 apresenta a comparação entre os resultados teóricos e experimentais para cada modelo.

Tabela 4.4 - Comparação do valor teórico e experimental

Modelo	V_{Rm} (kN)	V_{exp} (kN)	V_{exp}/V_{Rm}
RCA1-0	382,5	339,1	0,89
RCA1-50	340,9	303,5	0,89
RCA1-100	305,8	328,1	1,07

4.6.4 Novo Eurocódigo 2

Os valores obtidos para a resistência ao punçoamento dos diferentes modelos, segundo o novo Eurocódigo 2 encontram-se na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Resistência ao Punçoamento segundo o novo Eurocódigo 2

Modelo	b_0 (mm)	d_{eff} (mm)	f_{ck} (MPa)	ρ_l	b (mm)	d_{dg} (mm)	k_{pb}	v_c	η_τ	V_{Rm} (kN)
RCA1-0	1376,99	120,00	42,6	0,01	1000	32	1,88	2,54	-	419,8
RCA1-50	1359,39	114,40	38,4	0,01	1000	32	1,85	2,45	0.94	358,9
RCA1-100	1366,70	116,72	29,3	0,01	1000	32	1,86	2,24	0.88	315,8

A Tabela 4.6 apresenta a comparação entre os resultados teóricos e experimentais para cada modelo.

Tabela 4.6 - Comparação do valor teórico e experimental

Modelo	V_{Rm} (kN)	V_{exp} (kN)	V_{exp}/V_{Rm}
RCA1-0	419,8	339,1	0,81
RCA1-50	358,9	303,5	0,85
RCA1-100	315,8	328,1	1,04

4.6.5 Resistência à Flexão

Os valores obtidos para a resistência à flexão dos diferentes modelos encontram-se na Tabela 4.7, calculados com base nas expressões apresentadas anteriormente na secção 2.4. Pode-se observar que não ocorreu uma rotura por flexão, pois a resistência à flexão é muito superior à resistência à rotura por punçoamento.

Tabela 4.7 - Resistência à Flexão

Modelo	b_{q1} (mm)	b_{q2} (mm)	B (mm)	$m_{R,average}$	$d_{average}$ (mm)	$\rho_{average}$	f_y (MPa)	f_c (MPa)	η_{fc}	f_{cp} (MPa)	$V_{flexão}$ (kN)
RAC1-0	250	850	2200	67250,4	120,00	0,01	500	42,6	0,89	37,9	538,0
RAC1-50	250	850	2200	60808,3	114,40	0,01	500	38,4	0,92	35,4	486,5
RAC1-100	250	850	2200	62304,9	116,72	0,01	500	29,3	1,00	29,3	498,4

4.6.6 Considerações Finais

Analisando a Figura 60, pode-se observar que o modelo que obteve o melhor comportamento ao punçoamento foi a laje RCA1-100 seguida da laje RCA1-50 e por fim a laje RCA1-0. Verificou-se que a resistência das lajes RCA1-0 e RCA1-50 foram bastante idênticas, podendo-se concluir que os agregados reciclados não alteraram o valor da resistência ao punçoamento, mas reduziram a rigidez da laje.

Analisando as Tabelas 4.2, 4.4 e 4.6, pode-se observar que os valores previstos para a rotura por punçoamento são relativamente próximos dos valores teóricos, obtendo-se uma maior diferença entre estes valores quando se compara com o novo Eurocódigo 2. A laje RCA1-100 ultrapassou os valores esperados pelas três normas analisadas.

5.1 Introdução

Neste trabalho, foi estudada a resistência ao punçoamento de lajes com agregados grossos reciclados. Foram construídos 3 modelos com diferentes percentagens de agregados grossos reciclados (0, 50 e 100%). Foram avaliadas a capacidade de carga, os deslocamentos verticais e as extensões da armadura longitudinal superior.

Neste presente capítulo, são resumidos os resultados obtidos nos ensaios realizados, tais como as suas conclusões.

5.2 Deslocamentos Verticais

Verificou-se que a laje onde se obteve maiores deslocamentos na rotura foi a laje RCA1-100, seguida da laje RCA-0 e por fim, a laje RCA1-50 foi a que teve menores deslocamentos.

A laje com maior rigidez foi a laje RCA1-0 sendo a rigidez das lajes RCA1-50 e RCA1-100 bastante idênticas. Uma vez que as lajes tinham as mesmas dimensões e a mesma quantidade de armadura, quanto maior fosse o valor do módulo de elasticidade do betão, maior seria a sua rigidez, uma vez que a inércia da laje seria constante. Visto que o aumento do módulo de elasticidade do betão é diretamente proporcional ao aumento da resistência à compressão dos provetes cilíndricos de betão, como seria esperado a laje mais rígida seria a laje RCA1-0, o que se confirmou.

Como referido anteriormente, a laje RCA1-50 e RCA1-100 tinham rigidez semelhante, mas como a laje RCA1-100 teve uma rotura mais tardia do que a laje RCA1-50, a laje RCA1-100 teve um deslocamento máximo maior.

5.3 Extensão na Armadura Longitudinal Superior

Verificou-se que a laje que obteve maior extensão na armadura longitudinal superior foi a laje RCA1-100, seguida da laje RCA1-0 e por fim a laje RCA1-50.

De acordo com as extensões que foram possíveis medir, a laje RCA1-0 não teve armaduras em cedência, visto que as extensões não ultrapassaram os 2500×10^{-6} . A laje RCA1-50 não teve leituras suficientes, pelo qual não é possível retirar uma conclusão fiável, mas as leituras foram muito inferiores às obtidas na laje RCA1-100, e esta sim teve as armaduras em cedência, pois os valores das extensões ultrapassaram os 2500×10^{-6} .

Uma vez que, tanto a quantidade de armadura longitudinal como o espaçamento entre varões foram mantidos constante entre os diferentes modelos, seria esperado que quanto menor fosse a rigidez da laje, maior seriam as extensões nas armaduras, o que se verificou.

5.4 Influência dos Agregados Grossos Reciclados na Capacidade de Carga

Verificou-se que a capacidade de carga ao punçoamento em comparação com a laje de referência RCA1-0 (sem agregados grossos reciclados) sofreu um decréscimo na sua resistência de 10.5% e de 3.24% para a laje RCA1-50 e RCA1-100, respetivamente, enquanto o decréscimo de resistência à compressão do betão em comparação com a mesma laje sofreu um decréscimo de 9,8% e de 31.2% para a laje RCA1-50 e RCA1-100, respetivamente.

Tendo em conta a altura útil de cada laje e a resistência à compressão do betão de cada mistura, pode-se concluir que não houve um decréscimo da resistência ao punçoamento ao incorporar agregados grossos reciclados, visto que, a laje RCA1-0 e RCA1-50 têm resistência idêntica e a laje RCA1-100 tem uma resistência superior quando se tem em conta os parâmetros indicados anteriormente.

- Altaee, M. K. E., & Khudair, J. A. S. (2020). Punching Behavior Of Self-Compacting Concrete Slabs Incorporating Coarse Recycled Concrete Aggregates. *Wasit Journal of Engineering Sciences*, 8(1), 1–11. <https://doi.org/10.31185/ejuow.vol8.iss1.147>
- ACI (American Concrete Institute) Committee 318. Building code requirements for structural concrete (ACI 318–19) and commentary on building code requirements for structural concrete (ACI 318R-19). Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute; 2019
- EINPAUL, J. (2016). *Punching strength of continuous flat slabs*.
- Elsayed, M., Tayeh, B. A., Mohamed, M., Elymany, M., & Mansi, A. H. (2021). Punching shear behaviour of RC flat slabs incorporating recycled coarse aggregates and crumb rubber. *Journal of Building Engineering*, 44(September), 103363. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103363>
- European Committee for Standardization. (2000). EN 12390-6: Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens
- European Committee for Standardization. (2019). *EN 12350-2: Testing fresh concrete – Part 2: Slump test*
- Francesconi, L., Pani, L., & Stochino, F. (2016). Punching shear strength of reinforced recycled concrete slabs. *Construction and Building Materials*, 127, 248–263. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.094>
- Instituto Português da Qualidade. (2010). *NP EN 1992-1-1 Eurocódigo 2: Projeto de Estruturas de betão - Parte 1-1: "Regras gerais e regras para edifícios."*
- Instituto Português da Qualidade. (2019). *NP EN 12390-3: Ensaios de betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão*
- Instituto Português da Qualidade. (2020). *NP EN 12390-2: Ensaios de betão endurecido - Parte 2: Fabrico e cura de provetes para ensaios de resistência*
- Instituto Português da Qualidade. (2021). *NP EN 12390-1: Ensaios de betão endurecido - Parte 1: Forma, dimensões e outras exigências para provetes e moldes*

- Leelatanon, S., Imjai, T., Setkit, M., Garcia, R., & Kim, B. (2022). Punching Shear Capacity of Recycled Aggregate Concrete Slabs. *Buildings*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/buildings12101584>
- Mahmoud, Z. I., El tony, E. tony M., & Saeed, K. S. (2018). Punching shear behavior of recycled aggregate reinforced concrete slabs. *Alexandria Engineering Journal*, 57(2), 841–849. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.12.004>
- Ramos, A., Marchão, C., Pacheco, J. N., Enfedaque, A., Coronelli, D., Faria, D., de Brito, J., Ruiz, M. F., & Marreiros, R. (2024). A review of punching behavior of slab–column connections with recycled coarse aggregate concrete. *Structural Concrete*. <https://doi.org/10.1002/suco.202400435>
- Rao H, Reddy J, & Ghorpade V. (2012). Influence of Recycled Coarse Aggregate on Punching Behaviour of Recycled Coarse Aggregate Concrete Slabs. *International Journal of Modern Engineering Research*, 2(4), 2815–2820.
- Reis, N., de Brito, J., Correia, J. R., & Arruda, M. R. T. (2015). Punching behaviour of concrete slabs incorporating coarse recycled concrete aggregates. *Engineering Structures*, 100, 238–248. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.06.011>
- Sahoo, S., & Singh, B. (2021). Punching shear capacity of recycled-aggregate concrete slab-column connections. *Journal of Building Engineering*, 41(August 2020), 102430. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102430>
- Xiao, J., Wang, W., Zhou, Z., & Tawana, M. M. (2019). Punching shear behavior of recycled aggregate concrete slabs with and without steel fibres. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13(3), 725–740. <https://doi.org/10.1007/s11709-018-0510-6>



2024

MANUEL DOMINGUES

Comportamento ao punçãoamento de lajes fungiformes em betão com agregados grossos reciclados