

HELEN OLIVEIRA TENÓRIO

**PAINEL SANDUÍCHE COM NÚCLEO EM
VERMICULITA EXPANDIDA: ANÁLISE DA
EFICIÊNCIA DO CONECTOR TIPO TRELIÇA NA
RIGIDEZ DO PAINEL.**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração : Estruturas e Materiais.

Orientador: Prof.º Dr. Daniel de Lima Araújo

Co-orientador: Prof.º Dr. Ademir Aparecido do Prado

Goiânia
2005

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(GPT/BC/UFG)

T289p Tenório, Helen Oliveira.
Painel sanduíche com núcleo em vermiculita expandida: análise da eficiência do conector tipo treliça na rigidez do painel / Helen Oliveira Tenório. – Goiânia, 2005.
225 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2005.

Bibliografia: f. 174.

Inclui lista de figuras, de tabelas, de quadros, de símbolos.

Anexos

1. Concreto pré-moldado 2. Painéis (Sanduíche) – Vermiculita (Expandida) 3. Concreto pré-moldado – Conectores (Trelíça) I. Universidade Federal de Goiás. Escola de Engenharia Civil II. Título.

CDU: 624.012.3

Referência Bibliográfica

TENÓRIO, HELEN OLIVEIRA (2005). *Painel sanduíche com núcleo em Vermiculita Expandida: Análise da eficiência do conector tipo treliça na rigidez do painel*. Dissertação de Mestrado, Publicação/2005, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 225 p.

Cessão de Direitos

Nome do Autor: Helen Oliveira Tenório

Título da Dissertação de Mestrado: Painel sanduíche com núcleo em Vermiculita Expandida: Análise da eficiência do conector tipo treliça na rigidez do painel.
Grau/Ano: Mestre/2005

É concedida à Universidade Federal de Goiás permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Helen Oliveira Tenório

PAINEL SANDUÍCHE COM NÚCLEO EM VERMICULITA EXPANDIDA: ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO CONECTOR TIPO TRELIÇA NA RIGIDEZ DO PAINEL.

HELEN OLIVEIRA TENÓRIO

Dissertação defendida e aprovada em 07 de Abril de 2005, pela Banca Examinadora
constituída pelos professores.

Prof. Dr. Daniel de Lima Araújo (UFG)
ORIENTADOR

Prof. Dr. Ademir Aparecido do Prado (UFG)
CO-ORIENTADOR

Prof. Dr. Andréa Prado Abreu Reis Liserre (UFG)
EXAMINADORA INTERNA

Prof. Dr. Mounir Khalil El Debs (EESC/USP)
EXAMINADOR EXTERNO

A meus pais, Maria Helena e Valentim e minhas
irmãs, Sheila e Vânia.

MEUS AGRADECIMENTOS

À Deus.

Aos meus pais, Maria Helena e Valentim e minhas irmãs, Sheila e Vânia que participam dos meus altos e baixos desde sempre.

Ao meu orientador Prof. Dr. Daniel de Lima Araújo, pela paciência, competência e dedicação prestadas neste trabalho. Muito obrigada pelo bom humor tão necessário em horas difíceis.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Ademir Aparecido do Prado, pelo apoio.

Aos demais professores do CMEC-UFG pela formação e colaboração para o meu aprendizado.

Aos colegas de mestrado Carlos Eduardo, Gabriel, Luciana, Magnus, Jadir, Luciano, Renata, Raquel e em especial ao Paulo Alexandre por ter acompanhado mais de perto a parte experimental do trabalho. Obrigada também à Érica, Lílian, Paulo Henrique, Marcel e Fernanda que colaboraram na modelagem numérica.

Às alunas de iniciação científica, Éricka e Matilde.

Ao Engenheiro Reynaldo Machado Bittencourt, pelas sugestões, pelo bom humor e atenção prestados na realização deste trabalho.

Aos técnicos de Furnas pela ajuda indispensável.

À Brasil Minérios, pelo fornecimento de Vermiculita Expandida.

À Helem Sinara, pela amizade e disposição.

À Deyse minha grande amiga que teve importante participação não apenas em minha dissertação, mas em minha vida durante esses últimos sete anos.

À secretária do CMEC-UFG, Neuza, pelo carinho e presteza.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE QUADROS

LISTA DE SÍMBOLOS

RESUMO

ABSTRACT

Capítulo 1	Introdução	23
1.1	Justificativa.....	24
1.2	Objetivo	25
1.3	Apresentação do trabalho	25
Capítulo 2	Revisão Bibliográfica.....	27
2.1	Tipos de painéis utilizados na construção civil	27
2.2	Características do Painel Tipo Sanduíche	30
2.2.1	– Classificação.....	30
2.2.2	-Material Isolante.....	33
2.2.3	-Conectores.....	36
2.3	-Comportamento Mecânico	39
2.3.1	-Comportamento à Flexão de Painéis Sanduíche	39

2.3.1.1 - Determinação do momento fletor resistente de acordo com a NBR - 6118.....	60
2.3.1.2 Análise de Painéis Sanduíche Estruturais segundo H. G. Allen.....	64
2.3.2 - Deslocamento horizontal relativo entre as placas	72
2.4 Modelagem Numérica	75

Capítulo 3 Estudo do traço para a argamassa de preenchimento..... 80

3.1 Traços de argamassa.....	80
3.1.1 Metodologia.....	80
3.1.1.1 Caracterização dos materiais	81
3.1.1.2 Traços de Argamassa.....	81
3.1.2 Procedimento de dosagem da argamassa.....	83
3.1.3 Ensaio realizados com argamassa no estado fresco	86
3.1.4 Ensaio realizados com argamassa no estado endurecido.....	87
3.2 Traços de Concreto.....	88
3.2.1. Procedimento de dosagem.....	90
3.2.2. Ensaio realizados com concreto no estado fresco e endurecido.	90
3.3 Resultados e discussões	91
3.3.1. Argamassa	91
3.3.1.1 Massa Específica fictícia da Vermiculita Expandida	91
3.3.1.2 Ensaio da argamassa no estado fresco	93
3.3.1.3 Ensaio da argamassa no estado endurecido	96
3.3.2. Concreto	100
3.3.2.1 Massa específica efetiva da Vermiculita Expandida.....	100
3.3.2.2 Ensaio do concreto no estado fresco.....	101
3.3.2.3 Ensaio do concreto no estado endurecido.....	103
3.4 Considerações finais.....	105

Capítulo 4 Ensaio Experimental em Painéis Tipo Sanduíche..... 107

4.1	Descrição dos modelos	107
4.2	Caracterização do concreto e do aço	110
4.3	Instrumentação	114
4.4	Confecção dos painéis.	118
4.5	Esquema de ensaio à flexão.....	122

Capítulo 5 Análise dos Resultados..... 124

5.1	Configuração das fissuras e forma de ruptura dos painéis.	124
5.2	Curva força x deformação do aço e do concreto	130
5.3	Curva força x deslizamento da interface	142
5.4	Análise teórica dos momentos de fissuração e dos modos de ruptura dos painéis.....	143
5.5	Curva força – deslocamento vertical	149
5.6.	Deformação da seção transversal a meio vão.....	152
5.7.	Análise teórica da rigidez dos painéis.	153
5.8.	Considerações finais	164

Capítulo 6 - Conclusão..... 168

6.1	Sugestões para trabalhos futuros	173
-----	--	-----

Referências Bibliográficas.....174

ANEXO A: Gráficos.....179

ANEXO B: Modelagem numérica 210

ANEXO C: Resistência térmica..... 221

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Painel com EPS (KRÜGER, 2000).	28
Figura 2.2 - Painel alveolar (SEEBER, 1997).	29
Figura 2.3 - Esquema de fixação de painel autoclavado (KRÜGER, 2000).	30
Figura 2.4 – Espessura mínima do painel (FIP, 1982 apud CASTILHO, 1998).	33
Figura 2.5 - Esquema de um concreto celular (COSTA, 1995 apud KRÜGER, 2000).	34
Figura 2.6 - Vermiculita Expandida (CAMPOS, 2004).	36
Figura 2.7 - Conectores Rígidos (SEEBER, 1997).	38
Figura 2.8 - Conectores rígidos com resistência ao cisalhamento nas duas direções (SEEBER, 1997).	38
Figura 2.9 - Conectores flexíveis (SEEBER, 1997).	38
Figura 2.10 – Conector FRPBB utilizado por Einea <i>et al</i> , (1994).	39
Figura 2.11 – Esquema dos painéis estudados por Saleem <i>et al</i> (1991).	40
Figura 2.12 - Configuração das fissuras nos painéis estudados por Saleem <i>et al</i> (1991).	41
Figura 2.13 – Detalhes construtivos dos painéis ensaiados por Bush & Stine (1994). ..	43
Figura 2.14 - Fissura ao lado dos blocos de concreto (BUSH & STINE, 1994).	43
Figura 2.15 – Ensaio de cisalhamento direto realizado por Bush & Stine (1994).	45
Figura 2.16 - Ensaio de cisalhamento direto realizado por Einea <i>et al</i> (1994).	45
Figura 2.17 - Tipos de conectores com dispositivo FRP (EINEA <i>et al</i> , 1994).	46
Figura 2.18 – Esquema de ensaio a flexão utilizado por Einea <i>et al</i> (1994).	47
Figura 2.19 – Deformação do painel (SALMON & EINEA, 1995).	50
Figura 2.20 – Condições de restrição dos conectores. (a) desconsiderando a restrição da placa (extremidades rotulada) (b) considerando a ação do concreto da placa engastando os conectores. (c) considerando apenas restrição lateral do concreto da placa (SALOMN & EINEA, 1995).	51
Figura 2.21 - Dimensões dos painéis estudados por Bertini (2002).	53
Figura 2.22 – Seção transversal do painel tipo sanduíche (SHEPPARD & PHILLIPS, 1989).	55
Figura 2.23 – Conector M-tie (PESSIKI & MLYNARCZYK, 2003).	56
Figura 2.24 – Detalhe dos painéis ensaiados por Pessiki & Mlynarczyk (2003).	57
Figura 2.25 - Seção transversal e diagramas de tensão e de deformação para linha neutra acima da armadura.	61

Figura 2.26 - Seção transversal e diagramas de tensão e de deformação para linha neutra abaixo da armadura.....	62
Figura 2.27 - Seção transversal e diagramas de tensão e de deformação para linha neutra no núcleo	63
Figura 2.28 – Seção transversal de um painel sanduíche (ALLEN, 1969).	65
Figura 2.29 - Viga com carregamento em dois pontos (ALLEN, 1969).	70
Figura 2.30 – Contribuição do conector na rigidez ao cisalhamento (BUSH & WU, 1998).	71
Figura 2.31 – Seções compostas (FIP, 1982 apud EL DEBS, 2000).	73
Figura 2.32 – Malha utilizada nos modelos numéricos utilizados por Salmon & Einea (1995).	77
Figura 2.33 – Modelo linear utilizado por Einea <i>et al</i> (1994).	78
Figura 2.34 – Modelo não-linear utilizado por Einea <i>et al</i> (1994).	79
Figura 3.1 – Determinação do índice de consistência conforme a NBR–13276/02 (ABNT, 2002).	85
Figura 3.2 – Ensaio de condutividade.	88
Figura 3.3 - Relação entre a massa específica efetiva da Vermiculita com o volume de Nata de Cimento e com os pesos de cimento e água.	93
Figura 3.4 – Consumo de Cimento x Porcentagem de Vermiculita	93
Figura 3.5 – Ar incorporado x Porcentagem de Vermiculita nos traços de argamassa..	95
Figura 3.6 – Índice de Consistência x Porcentagem de Vermiculita nos traços de argamassa	95
Figura 3.7 - Massa Unitária e massa específica aparente x porcentagem de Vermiculita nos traços de argamassa.....	95
Figura 3.8 - Resistência à Compressão e à Tração Indireta x Porcentagem de Vermiculita nos traços de argamassa.....	97
Figura 3.9 - Módulo de Elasticidade x porcentagem de Vermiculita nos traços de argamassa.	98
Figura 3.10 – Absorção aos 28 dias e Condutividade Térmica x Porcentagem de Vermiculita.	98
Figura 3.11 – Relação entre a resistência à compressão e a massa específica.	99
Figura 3.12 – Relação entre resistência à compressão e condutividade térmica.	100
Figura 3.13 – Consumo de Cimento x porcentagem de Vermiculita nos traços de concreto.	101
Figura 3.14 – Ar Incorporado x Volume de Vermiculita nos traços de Concreto.....	102
Figura 3.15 – Massa unitária x Volume de Vermiculita nos traços de concreto.....	103
Figura 3.16 - Abatimento x Volume de Vermiculita nos Traços de Concreto.....	103
Figura 3.17 – Resistência à Compressão x Porcentagem de Vermiculita nos traços de concreto.	105

Figura 4.1 - Dimensão dos painéis ensaiados.....	108
Figura 4.2 – Caracterização do aço da tela.....	112
Figura 4.3 – Posição dos extensômetros na tela eletrosoldada (a) e no concreto (b)...	114
Figura 4.4 – Posição dos extensômetros no conector adotado para todos os painéis...	115
Figura 4.5 - Posição dos extensômetros no conector para o modelo P-2L-CPN-45. ...	116
Figura 4.6 – Esquema de armação dos painéis.....	117
Figura 4.7 - Posição do relógio comparador.	118
Figura 4.8 - Primeira etapa da concretagem para o modelo P-2L-PN-100.	118
Figura 4.9 – Segunda etapa para concretagem para painel com ancoragem de placa a núcleo.	119
Figura 4.10 – Concretagem modelo P-2L-PP-45.	120
Figura 4.11 – Esquema da fôrma utilizada nos painéis. (a) concretagem das placas. (b) confecção do núcleo.....	121
Figura 4.12 - Esquema de ensaio à flexão.....	122
Figura 5.1 – Configuração das fissuras no painel P-2L-PN-45.....	124
Figura 5.2 – Configuração das fissuras no painel P-1L-PN-45.....	125
Figura 5.3 – Configuração das fissuras no painel P-SL-45.	125
Figura 5.4 – Configuração das fissuras no painel P-2L-CPN-45.	126
Figura 5.5 – Configuração das fissuras no painel P-2L-PP-45.....	126
Figura 5.6 – (a) e (b)Configuração das fissuras no painel P-2L-PP-45b (c) Segunda etapa da concretagem do painel P-2L-PP-45b.....	127
Figura 5.7 – Configuração das fissuras no painel P-2L-PN-100.....	128
Figura 5.8 – Configuração das fissuras no painel P-1L-PN-100.....	129
Figura 5.9 – Configuração das fissuras no painel P-SL-100.	129
Figura 5.10 – Gráfico Força x Deformação na tela eletrosoldada – Painéis com 45% de Vermiculita.	131
Figura 5.11 - Gráfico Força x Deformação na tela eletrosoldada – Painéis com 100% de Vermiculita.	132
Figura 5.12 – Gráfico Força x Deformação no concreto – Painéis com 45% de Vermiculita.	133
Figura 5.13 – Gráfico Força x Deformação concreto – Painéis com 100% de Vermiculita.	134
Figura 5.14 – Gráfico Força x Deformação Diagonal Treliça 1 e 2 – P-2L-PN-45.....	134
Figura 5.15 – Gráfico Força x Deformação Diagonal Treliça 3 e 4 – P-2L-PN-45.....	135
Figura 5.16 – Gráfico Força x Deformação Diagonal Treliça 1 – P-2L-PN-45.....	136
Figura 5.17 – Gráfico Força x Deformação Diagonal Treliça 4 – P-2L-PN-45.....	136
Figura 5.18 – Gráfico Força x Deformação Diagonal Treliça 2 – P-2L-PN-45.....	137

Figura 5.19 – Gráfico Força x Deformação Diagonal Treliça 3 – P-2L-PN-45.....	137
Figura 5.20 – Gráfico Força x Deformação Diagonais Treliça 1 – Painéis com 100% de Vermiculita.....	138
Figura 5.21 – Gráfico Força x Deformação Diagonais Tracionadas Treliça 1 – Painéis com 45% de Vermiculita.....	139
Figura 5.22 – Condição de contorno do conector.....	140
Figura 5.23 – Gráfico Força x Deformação Banzo Inferior para painéis com 45% de Vermiculita.....	140
Figura 5.24 – Gráfico Carga x Deformação Banzo Superior para painéis com 100% de Vermiculita.....	141
Figura 5.25 – Gráfico Força x Deformação Banzo Superior para painéis com 45% de Vermiculita.....	141
Figura 5.26 – Gráfico Força x Deformação Banzo Inferior para painéis com 100% de Vermiculita.....	142
Figura 5.27 – Deformação de deslizamento no meio do vão do painel.....	143
Figura 5.28 – Gráfico Força x Deformação – Diagonais no meio do vão para painéis com 45% de Vermiculita.....	146
Figura 5.29 – Gráfico Força x Deformação – Diagonais no meio do vão para painéis com	147
Figura 5.30 – Relação entre os procedimentos para cálculo da resistência da interface e resultados experimentais (Araújo & El Debs, 1998).....	148
Figura 5.31 - Gráfico Força x Deslocamento – Painéis com 45% de Vermiculita.....	149
Figura 5.32 - Gráfico Força x Deslocamento – Painéis com 100% de Vermiculita.....	150
Figura 5.33 - Gráfico Força x Deslocamento – Painéis com duas linhas de conectores.....	151
Figura 5.34 - Gráfico Força x Deslocamento – Painéis com uma linha de conector. ..	151
Figura 5.35 - Gráfico Força x Deslocamento – Painéis sem conector.....	152
Figura 5.36 – Deformação da seção transversal.....	153
Figura 5.37 – Representação da aplicação da curvatura como carregamento.....	154
Figura 5.38 – Gráfico força x deslocamento do painel P-2L-PN-45 utilizando analogia de Mohr.....	155
Figura 5.39 – Metodologia utilizada para determinar a curvatura dos painéis.....	155
Figura 5.40 – Curva força x deslocamento utilizando analogia de Mohr – P-2L-PN-100.....	156
Figura 5.41 – Curva força x deslocamento utilizando analogia de Mohr – P-1L-PN-45.....	157
Figura 5.42 – Curva força x deslocamento utilizando analogia de Mohr – P-1L-PN-100.....	157
Figura 5.43 – Curva força x deslocamento utilizando analogia de Mohr – P-SL-45...	158

Figura 5.44 – Curva força x deslocamento utilizando analogia de Mohr – P-SL-100.	158
Figura 5.45 – Curva força x deslocamento utilizando analogia de Mohr – P-2L-PP-45.	159
Figura 5.46 – Curva força x deslocamento utilizando analogia de Mohr – P-2L-CPN-45.	159
Figura 5.47 – Momento-Curvatura Teórico e Experimental para o Painel P-2L-PN-45.	160
Figura 5.48 – Rigidez secante para painéis com 45 % de Vermiculita Expandida.	163
Figura 5.49 – Rigidez secante para painéis com 100 % de Vermiculita Expandida. ...	163
Figura 5.50 – Curva força x flecha para painéis com 100 % de Vermiculita Expandida.	164
Figura 5.51 – Curva força x flecha para painéis com 45 % de Vermiculita Expandida.	164

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resumo dos traços de argamassa estudados (consumo por m ³).	82
Tabela 3.2 – Traços de concreto estudados (consumo por m ³)	89
Tabela 3.3 – Argamassa: massa específica da Vermiculita Expandida.....	92
Tabela 3.4 – Resultados da Argamassa no estado fresco.	94
Tabela 3.5 – Propriedades das argamassas estudadas no estado endurecido.	96
Tabela 3.6 – Concreto: massa específica efetiva.....	100
Tabela 3.7 – Resultados do concreto no estado fresco.....	102
Tabela 3.8 – Resultados do Concreto no estado endurecido.	104
Tabela 4.1 - Descrição dos modelos de painéis ensaiados.	109
Tabela 4.2 - Quantidade de material, por m ³ , utilizado na confecção dos painéis.....	111
Tabela 4.3 – Resistência última à tração para o aço utilizado nos painéis.....	111
Tabela 4.4 – Propriedades do concreto e da argamassa no estado fresco.	112
Tabela 4.5 - Propriedades do concreto das placas.....	113
Tabela 4.6 - Propriedades da argamassa do núcleo.....	113
Tabela 5.1 – Resumo das resistências obtidas no ensaio experimental.....	130
Tabela 5.2 – Relação entre os momentos de fissuração teórico e experimental	144
Tabela 5.3 – Resumo das resistências mecânicas dos painéis.....	145
Tabela 5.4 - Contribuição da treliça na resistência à flexão do painel.....	146
Tabela 5.5 – Comparação entre a resistência da interface e a resistência à tração.....	148
Tabela 5.6 – Grau de Interação entre as placas para os painéis estudados.....	162

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Coeficientes de correção do momento de inércia.....	55
Quadro 2.2 – Programa Experimental (PESSIKI & MLYNARCZYK, 2003).	56
Quadro 2.3 – Coeficientes β_s e β_c da FIP (1982).....	74

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Romanos

Maiúsculo

A_s	Área da seção transversal do aço longitudinal.
A_{sc}	Área da seção transversal do conector.
A_{sw}	Área de armadura transversal à interface e totalmente ancorada nos elementos.
D	Rigidez à flexão de uma viga.
E_c	Módulo de elasticidade do concreto.
$E_{c,cal}$	Módulo de elasticidade do concreto obtido pela equação do ACI 523.3R-93
E_n	Módulo de elasticidade do núcleo.
E_s	Módulo de elasticidade longitudinal do aço
E_{sc}	Módulo de elasticidade longitudinal do conector
F	Força desenvolvida por uma diagonal devido ao cisalhamento.
FC	Fator de correção.
F_{exp}	Carga de ruptura obtida experimentalmente.
F_r	Relação entre a força obtida pela teoria do concreto armado e a obtida pelos ensaios.
G	Módulo de elasticidade transversal de cisalhamento do núcleo
G_{con}	Módulo de cisalhamento equivalente para os conectores.
G_{ef}	Módulo de cisalhamento efetivo
GI	Grau de interação.
I_c	Momento de inércia da placa em relação ao centróide da mesma.
I_{co}	Momento de inércia da seção transversal composta.
I_{con}	Momento de inércia de cada conector.
I_{exp}	Momento de inércia experimental.

I_g	Momento de inércia bruto.
I_{II}	Momento de inércia da seção fissurada e transformada.
I_{nc}	Momento de inércia da seção transversal não-composta.
I_t	Momento de inércia teórico segundo Sheppard & Phillips (1989).
K	Condutividade Térmica.
K_c	Rigidez ao cisalhamento da interface.
L	Comprimento do vão útil do painel.
L_a	Metade da distância entre os pontos de aplicação de carga.
L_b	Distância entre o ponto de aplicação de carga e o apoio.
L_c	Comprimento do vão em balanço.
LN	Linha neutra.
M	Momento aplicado.
M_{cr}	Momento de Fissuração
M_d	Momento de cálculo
M_{rd}	Momento resistente de cálculo.
N	Número de linhas de conectores.
P_{SSS}	Quantidade de agregado miúdo no estado de superfície saturada seca.
R_{cc}	Resultante das tensões de compressão no concreto.
R_{sti}	Resultante das tensões de tração da armadura da face inferior
R_{sts}	Resultante das tensões de tração da armadura da face superior.
S	Momento estático de área para a seção acima da fibra localizada à profundidade z .
S_I	Espaçamento entre diagonais consecutivas ao longo do comprimento do conector.
T_i	Resultante da força de tração da armadura inferior.
T_s	Resultante da força de tração da armadura superior.
$1/r$	Curvatura

Minúsculo

a_1	Relação entre areia e cimento.
a_2	Relação entre agregado (miúdo e graúdo) e cimento.
d_{max}	Dimensão máxima da brita.
a	Parâmetro que representa a raiz da razão entre a rigidez ao cisalhamento do núcleo e a rigidez a flexão local das placas.
a_b	Absorção.
b	Largura do painel.
b_{int}	Largura ou comprimento transversal à interface.
c	Espessura do núcleo.
d	Altura útil da seção transversal do painel.
f_{ck}	Resistência característica do concreto.
f_{cm}	Resistência à compressão média do concreto.
f_{ctm}	Resistência à tração por compressão diametral média do concreto.
f_{td}	Resistência de cálculo do concreto à tração.
f_y	Tensão de escoamento do aço
h	Espessura do painel.
h'	Umidade.
ℓ	Comprimento da diagonal da treliça.
m	Número de conectores.
p	Inclinação do conector.
q	Deslocamento horizontal relativo entre os centróides do topo e da base das placas devido ao cisalhamento
$q_{,x1}$	Primeira derivada do deslocamento horizontal em relação à x_1 .
$q_{,x1x1}$	Segunda derivada do deslocamento horizontal em relação à x_1 .
r	Distância entre o centróide da placa e o centróide do painel.
s	Espaçamento da armadura transversal.

t	Espessura de cada placa.
t'	Distância do eixo da armadura à face do concreto.
w	Deslocamento total do painel.
w_1	Deslocamento vertical fornecido pela teoria de flexão simples.
w_2	Deslocamento transversal adicional.
x	Altura da linha neutra.
x_1	Distância ao longo do comprimento do painel
y	Deslocamento vertical do painel.
$y_{,x_1x_1x_1}$	Terceira derivada do deslocamento vertical em relação à x_1 .
z	Profundidade qualquer ao longo da espessura do painel.

Símbolos Gregos

β_c	Coefficientes multiplicadores da resistência fornecida pela superfície de contato.
β_s	Coefficiente multiplicador da resistência fornecida pela armadura.
ϵ_c	Deformação no concreto.
ϵ_{sti}	Deformação na armadura inferior.
ϵ_{sts}	Deformação na armadura superior.
ϕ	Diâmetro das armaduras.
γ	Deformação de cisalhamento.
γ_{ap}	Massa específica aparente.
γ_{areia}	Massa específica da areia.
γ_c	Coefficiente de segurança do concreto.
$\gamma_{cimento}$	Massa específica do cimento.
$\gamma_{conc fresco}$	Massa específica do concreto fresco.
γ_{seco}	Massa específica seca.
γ_{unit}	Massa unitária.

γ_{vermic}	Massa específica da Vermiculita Expandida.
$\gamma_{vermic,ef}$	Massa específica efetiva da Vermiculita.
θ	Inclinação do conector em relação à espessura do núcleo.
θ_l	Ângulo correspondente à curvatura do painel.
ρ	Taxa geométrica de armadura que atravessa a interface.
σ_c	Tensão no concreto.
σ_{ii}	Tensão na armadura inferior.
σ_{ts}	Tensão na armadura superior.
σ_x	Tensão normal ao plano x .
σ_{xy}	Tensão de cisalhamento no plano xy .
σ_y	Tensão normal ao plano y .
τ	Tensão de cisalhamento.
τ_{sd}	Tensão de cisalhamento solicitante cálculo.
τ_{Rd}	Resistência de cálculo da interface ao cisalhamento horizontal para situação de alta sollicitação.

Abreviaturas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ACI – American Institute Concrete.

FIP – Federation Internationale de La Precontrainte.

PCI – Precast/Prestressed Concrete Institute.

RESUMO

TENÓRIO, H. O. (2005). *Painel Sanduíche com núcleo em Vermiculita Expandida: Análise da eficiência do conector tipo treliça na rigidez do painel*. Goiânia, 225p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.

A utilização do concreto pré-moldado fornece agilidade, racionalização e economia no processo construtivo. Devido ao elevado peso das peças pré-moldadas, pesquisas são realizadas acerca de sistemas construtivos de baixo peso, caso típico dos painéis tipo sanduíche. Este trabalho tem como objetivo contribuir com o estudo das propriedades mecânicas de painéis tipo sanduíche em concreto pré-moldado, utilizando como material isolante agregados leves, neste caso a Vermiculita Expandida. É proposto também o emprego de conectores tipo treliça entre as placas, porém com uma configuração diferente da usual, ou seja, com ligação placa a núcleo. Foram ensaiados doze painéis sanduíche à flexão, com carregamento nos terços médios do vão, variando-se a resistência do núcleo e a configuração do conector tipo treliça. A partir dos ensaios foi analisado o grau de interação entre as placas e a influência do conector e do núcleo na resistência e na rigidez à flexão do painel. Verificou-se que os painéis com núcleo de Vermiculita Expandida possuem composição total e que sua resistência é maior que dos painéis com ligação placa a placa, desde que sejam evitadas as rupturas por cisalhamento do núcleo e na interface placa-núcleo. Os resultados experimentais foram confrontados com modelos analíticos, procurando-se uma formulação aproximada para o dimensionamento de painéis sanduíche que leve em conta a contribuição do conector tipo treliça na rigidez da peça. Observou-se que os modelos analíticos existentes desconsideram a contribuição do núcleo, o que não é aconselhável no caso de painéis com núcleo de Vermiculita Expandida que apresenta grande rigidez e não deteriora ao longo do tempo. Constatou-se também que quando a mudança na resistência do núcleo e na configuração do conector não é acompanhada pela alteração no grau de interação entre as placas a rigidez do painel não sofre alterações significativas.

Palavras chaves: concreto pré-moldado, painel sanduíche, conector, agregado leve.

ABSTRACT

TENÓRIO, H. O. (2005). *Sandwich Panel with Expanded Vermiculite Core: Analysis of the efficient of truss connector in the stiffness of panel*. Goiânia, 225p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.

The use of precast concrete promotes velocity, rational service and economy in building process. Due to the high weight of precast structures, researches have been carried out on lightweight building systems such as sandwich panels. The aim of this project is contributing to the study of the mechanical properties of precast concrete sandwich panels using lightweight aggregate as an isolating material, in this case Expanded Vermiculite. It is suggested the use of the well known truss connectors between the wythes in a non-usual configuration, is the wythe-to-core connection. Tests were realized in twelve panels submitted to a concentrated load applied in three points of the span of the panel, varying the strength of the core and the configuration of the truss connector. The interaction degree between the wythes and the influence of the connector and the core in the stiffness of the panels were analyzed. It was observed that panels made with core of Expanded Vermiculite as isolating material show full composite behavior and its resistance is larger than that of the panels with connection wythe-to-wythe. To obtain this behavior it's necessary to avoid the shear failure in the core and in the core-wythe interface. The experimental results were compared with analytical models so as to obtain an approximated formulation that accounts the contribution of the truss connector in the stiffness of the panel. It was observed that the analytical models do not account the stiffness of the core in the design of the panel. These models aren't appropriated because of the larger stiffness of Expanded Vermiculite and also because the fact that the mortar with Expanded Vermiculite does not deteriorate along time. It was observed that when the strength of the core and the configuration of the truss connector are changed but the degree interaction is maintained the stiffness of the panel does not change significantly.

Keywords: precast concrete, sandwich panel, connector, light weight aggregate.

Capítulo 1 Introdução

A Europa, palco de grandes mudanças forneceu um campo favorável ao surgimento de novas técnicas construtivas.

Entretanto, somente após a Segunda Guerra Mundial, com problemas de déficit habitacional e a necessidade de construções rápidas, é que a Europa possibilitou o desenvolvimento de novos sistemas de painéis. Surgiram materiais usados em vedações como gesso acartonado, concreto celular, poliestireno expandido, entre outros.

No Brasil, a utilização de painéis e materiais de vedação junto à estrutura metálica tem ganhado forças. A procura por meios construtivos que levem a uma estrutura mais leve e eficiente tem proporcionado o avanço de novas tecnologias.

O uso do concreto pré-moldado tem proporcionado a industrialização da construção civil, visando-se agilidade e economia proporcionada por um menor desperdício de materiais. Além disso, a procura por soluções do déficit habitacional brasileiro tem aumentado o desenvolvimento de construções mais baratas e alternativas que viabilizem o acesso a moradia. Entretanto, dificuldades na montagem, devido ao elevado peso dos componentes de concreto, levam ao uso de mecanização onerosa.

O uso de painéis tipo sanduíche em concreto pré-moldado além de econômico fornece vantagens estruturais. O emprego de núcleo isolante de menor densidade em painéis sanduíches torna essa tecnologia mais competitiva por reduzir o peso dos painéis, facilitando seu transporte e manuseio. Com este sistema de vedação obtém-se isolamento térmico e acústico gerando conforto e economia em sistemas de refrigeração. Garantindo-se uma ligação rígida entre as placas do painel através de conectores, a seção transversal funciona como única, resultando em aumento no valor da inércia e, conseqüentemente, tornando estes painéis mais resistentes.

1.1 Justificativa

O processo de industrialização na construção civil tem levado ao uso de painéis de grandes dimensões. Entretanto, apesar de melhorias na utilização de materiais e agilidade na execução da obra, dificuldades no manuseio e no transporte dos elementos pré-moldados têm levado a pesquisa de peças mais leves. Esta é uma das vantagens do emprego de painéis sanduíche. Existem outras, tais como:

- A redução do peso do sistema de vedação, com a substituição da alvenaria tradicional por painéis sanduíche com núcleo isolante de baixo peso, pode levar a uma estrutura econômica devido à redução de carga e, conseqüentemente, levar a uma fundação também econômica;
- Há também redução no custo de montagem que pode ser realizado por equipamentos mais leves, o que é adequado a construções em estrutura metálica que também utilizam equipamentos leves;
- A ligação de painéis pré-moldados com estruturas metálicas é feita com dispositivos que garantem que ambos se deformem sem restrições, não havendo, portanto, indesejáveis fissuras que ocorrem quando a vedação é realizada em alvenaria convencional;
- Além de proporcionar redução no peso, a edificação adquire conforto acústico e térmico, o que proporciona economia em sistemas de refrigeração provenientes do isolamento térmico do isolante;
- O emprego de conectores mais rígidos, para garantir total interação entre as placas do painel, acarreta em peças de menor dimensão. Pode-se, ainda, manter a dimensão da peça e torná-la mais resistente;
- Pesquisas sobre este método construtivo auxiliam na divulgação do método. Isto pode incentivar a maior utilização do pré-moldado no estado de Goiás e levar ao surgimento de empresas interessadas em produzir outros tipos de peças pré-moldadas

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é contribuir com o estudo de painéis em concreto pré-moldado do tipo sanduíche usando como isolante a Vermiculita Expandida. Para tal pretende-se:

- Propor uma nova forma de ligação (placa a núcleo) diferente da usada comercialmente de placa a placa;
- Definir um sistema de conectores em treliça com ligação placa-núcleo que forneça interação total entre as placas;
- Estudar o grau de conexão e interação do painel sanduíche;
- Verificar a viabilidade técnica do emprego da Vermiculita Expandida como material de enchimento.

1.3 Apresentação do trabalho

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica abrangendo os componentes de um painel sanduíche (placa, núcleo e conectores), a classificação do painel quanto ao grau de composição, os ensaios experimentais e as modelagens numéricas relatados na literatura. Também são descritos os modelos analíticos utilizados na análise dos resultados.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia e os resultados obtidos do estudo de traços de argamassa e de concreto contendo Vermiculita Expandida. Este capítulo tem sua importância porque um dos objetivos do trabalho é viabilizar o uso da Vermiculita Expandida como material de enchimento e como elemento resistente no painel sanduíche. Como não há informações disponíveis sobre traços de argamassa e concreto com Vermiculita Expandida, efetuou-se um estudo preliminar para a determinação destes traços. Julgou-se importante detalhar este estudo em um capítulo.

No capítulo 4 é apresentado o programa experimental realizado com painéis sanduíche submetidos à flexão. As variáveis analisadas são o tipo de conexão (placa-placa ou placa-núcleo), a quantidade de linhas de conectores e a resistência do núcleo. São apresentadas também as propriedades mecânicas dos componentes do painel. O esquema de ensaio utilizado

e a instrumentação para leitura das deformações e dos deslocamentos também se encontram descritos neste capítulo.

No capítulo 5 inicialmente são apresentados e discutidos os resultados obtidos dos ensaios. Depois os métodos analíticos apresentados no capítulo 2 são utilizados para a previsão do comportamento mecânico dos painéis. Os valores obtidos são, então, confrontados com os obtidos experimentalmente.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas da realização do trabalho. No Anexo A deste trabalho são apresentados todos os gráficos obtidos dos ensaios e que não foram diretamente empregados na análise de resultados mostrada no capítulo 5. No Anexo B são apresentados os resultados da modelagem numérica de três painéis ensaiados empregando o programa ANSYS[®]. Nele são descritas a malha, o tipo de elemento e o modelo de material utilizado em cada painel. Os resultados são, então, comparados com os obtidos experimentalmente.

Capítulo 2 Revisão Bibliográfica

2.1 Tipos de painéis utilizados na construção civil

Existem diversos sistemas de vedação no mercado da construção civil. Entre eles citam-se os painéis acartonados, de poliestireno expandido, pré-moldados de concreto, de concreto autoclavado, de cimentos reforçados com fibra de vidro, isotérmicos e alveolares extrudados.

a) Painéis em gesso acartonado

A placa de gesso acartonado é composta de duas placas de gesso revestidas com folhas de papelão em ambos os lados. Derivações deste painel permitem atender diversas necessidades tais como resistência à umidade e fogo, isolamento acústico e grandes vãos.

b) Painéis em poliestireno expandido

Como modelo de painel em poliestireno expandido tem-se a técnica utilizada na Itália que consiste em uma placa ondulada de poliestireno expandido com 55 mm de espessura entre duas malhas de tela eletrosoldada revestidas com argamassa projetada. O poliestireno é o principal responsável pelo isolamento térmico, sendo que sua espessura e massa específica podem variar de acordo com a necessidade de conforto térmico. As telas de aço de alta resistência possuem fios longitudinais de 3,5 mm espaçados a 75 mm e fios transversais espaçados a 130 mm.

Existe ainda outro modelo de painel em poliestireno expandido adotado no Brasil, baseado na tecnologia norte-americana. Este sistema consiste de pré-painéis de 100

mm de espessura com tela em aço CA 60 galvanizado e fios espaçados a 50 mm. A espessura da argamassa projetada é de cerca de 25 mm (Figura 2.1).

c) Painéis em concreto pré-moldado

Esses painéis são heranças do concreto armado, que desde o século XIX vem utilizando a resistência à compressão do concreto e a resistência à tração do aço. O projeto destes painéis de vedação deve conter detalhes como dimensões, configurações, detalhes de juntas, conexões e seções. O reforço destes painéis deve ser em vergalhões ou tela eletrosoldada. Pode-se ainda usar a protensão em painéis de espessura muito fina para controlar fissuras por retração ou atender a exigências estruturais.



Figura 2.1- Painel com EPS (KRÜGER, 2000).

d) Painéis compostos de cimento reforçado com fibra de vidro

Estes painéis consistem na projeção de argamassa junto à fibra de vidro em uma forma, sendo permitido o uso de vários produtos como aditivos e pigmentos. Podem ser utilizados como painéis pré-fabricados de concreto ou em restauração de prédios históricos. É considerado um sistema de vedação leve e de grande plasticidade.

e) Painéis isotérmicos

De grande uso em instalações industriais, é composto de poliestireno expandido revestido com duas chapas de aço galvanizado. Possui vantagens como facilidade de montagem, leveza e resistência térmica.

f) Painéis alveolares extrudados

Painel com seção transversal contendo alvéolos longitudinais que permitem a passagem de tubulações elétricas e hidráulicas além de fornecer isolamento acústico e climatização. Sua alta compactação oferece resistência à compressão de até 45 MPa, garantindo total aderência em todo o perímetro da armadura de protensão. Estes painéis ainda proporcionam grandes vãos e ausência de escoramento, podendo ficar aparentes ou receber acabamento em tinta (Figura 2.2).



Figura 2.2 - Painel alveolar (SEEBER, 1997).

g) Painéis em concreto autoclavado

Este sistema de vedação pode ser tratado como alvenaria desvinculada, separando o material da estrutura através de argamassa flexível e utilizando conectores, cantoneiras ou chapas dobradas para fixação do painel à estrutura (Figura 2.3).

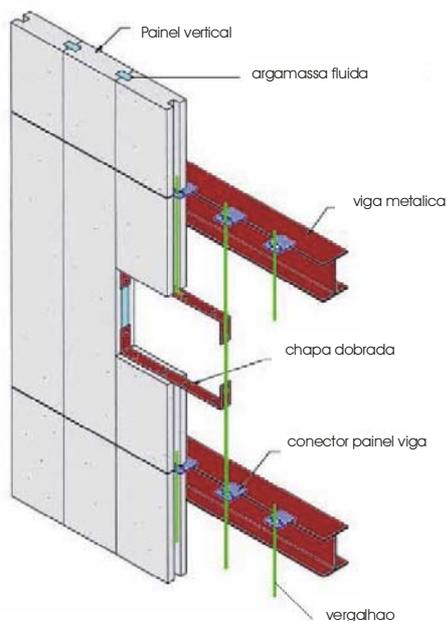


Figura 2.3 - Esquema de fixação de painel autoclavado (KRÜGER, 2000).

2.2 Características do Painel Tipo Sanduíche

2.2.1 – Classificação

Uma contribuição ao estado da arte de painéis sanduíche em concreto pré-moldado realizada por Einea *et al* (1991) mostra que, este sistema de painéis possui eficiência estrutural e capacidade de isolamento térmico e acústico superior a de outros painéis. Estes painéis, compostos por duas placas de concreto separadas por uma camada de isolante, são classificados de acordo com o grau de composição em:

- Painéis totalmente compostos: neste caso as duas placas de concreto resistem à flexão, sendo a seção transversal única devido à resistência ao cisalhamento entre as placas proporcionada por conectores;
- Painéis parcialmente compostos ou semicompostos: neste caso os conectores resistem a uma parcela dos esforços de cisalhamento entre as

placas, não resultando, por conseguinte, em uma seção transversal única. De acordo com Seeber (1997), podem ser considerados compostos durante as fases de manuseio e içamento e não-compostos quando sujeitos às cargas em serviço. Experiências indicam que existe aderência suficiente entre o isolante e as placas para transferir o cisalhamento entre as placas durante o manuseio, mas esta aderência diminui ao longo do tempo. Observa-se no diagrama de composição parcial da Figura 2.4 que a contribuição na resistência à tração de uma das placas é maior enquanto que a outra placa fornece uma maior contribuição à compressão.

- Painéis não compostos: neste caso os conectores não são capazes de resistir ao cisalhamento entre as placas. Se as placas de concreto possuem mesma rigidez e são igualmente armadas, cada uma resiste a cinquenta por cento da carga aplicada. Pode ocorrer o caso em que apenas uma das placas fornece resistência estrutural, geralmente a de maior espessura.

Painéis totalmente compostos apresentam interação entre as placas suficiente para resistir aos esforços de flexão. Teoricamente, um painel composto exibe seção transversal plana em toda a espessura do painel e ao longo de todo o vão. A ação composta fornece eficiente transferência do cisalhamento horizontal entre as placas. Um painel sanduíche não-composto consiste de placas que resistem aos esforços de flexão separadamente. A seção transversal em cada placa é plana, mas não permanece assim em toda a espessura do painel. Em um painel parcialmente composto, as placas resistem parcialmente juntas aos esforços de flexão. O grau de composição entre as placas situa-se entre um painel totalmente composto e um painel não-composto. (PESSIKI & MLYNARCZYK, 2003).

O grau de composição exibido por um painel pode ainda sofrer mudanças ao longo do carregamento. Um painel pode inicialmente apresentar um grau de composição total no início do carregamento. Entretanto sob o aumento de carga aplicada, tempo e variação de temperatura, os diferentes mecanismos de contribuição à interação entre as placas, como aderência entre o isolante e o concreto, podem diminuir.

Um estudo realizado por David (2003) aponta para uma diferença entre grau de conexão (ou composição) e grau de interação. Quando a resistência dos conectores é maior ou igual a qualquer um dos elementos que compõe a seção composta, o grau de conexão é

total. Neste caso, a resistência dos conectores não influencia diretamente a resistência à flexão da peça. Quando a resistência do conector é menor que a de qualquer um dos elementos, a resistência da peça estrutural passa a ser limitada pela resistência do conector.

O EUROCODE 4-Draft 2001 apresenta dois conceitos diferenciando grau de conexão e grau de interação. Embora várias normas confundam os termos conexão e interação, deve-se ter claro que a interação está relacionada ao deslizamento relativo na interface, enquanto que conexão está associada à capacidade de se atingir o momento máximo sem ruptura da ligação (DAVID, 2003). Portanto segundo o EUROCODE 4 Draft 2001 o diagrama de deformação da seção transversal da Figura 2.4 classificaria o painel quanto ao grau de interação e não quanto ao grau de composição conforme ilustrado na figura. O primeiro diagrama representaria um painel com grau de interação total, o segundo diagrama representaria um painel com grau de interação parcial e o terceiro e quarto diagrama representaria um painel sem nenhuma interação entre as placas.

A classificação do comportamento do painel neste trabalho será feita de acordo com o EUROCODE 4 - Draft 2001. O grau de interação será total quando não houver descontinuidade da linha neutra e parcial quando houver descontinuidade da linha neutra. Já o grau de composição ou conexão será total para painéis que atingirem carga última sem ruptura na interface.

Um estado da arte realizado por Seeber (1997) mostra que a espessura das placas do painel deve ser o mais fina possível, sendo esta espessura dependente da função do painel. Painéis não-compostos requerem uma placa de espessura maior que um painel composto para as mesmas condições de carga e vão.

Em painéis protendidos o diâmetro do cabo também influencia na espessura da placa. Quanto maior o diâmetro, maior a espessura. Para diâmetro, por exemplo, de 13 mm a espessura deve ser de pelo menos 76 mm. Quando a razão entre a espessura da placa e o diâmetro do cabo é menor que seis, reforços especiais são introduzidos nas extremidades dos cabos para evitar o surgimento de fissuras devido ao deslocamento dos cabos de protensão.

O gráfico da Figura 2.5 indica a espessura mínima recomendada para o painel em função da sua maior dimensão. Esse gráfico não é aplicável a painéis usados como fôrmas para concreto moldado no local (FIP, 1982 apud CASTILHO, 1998).

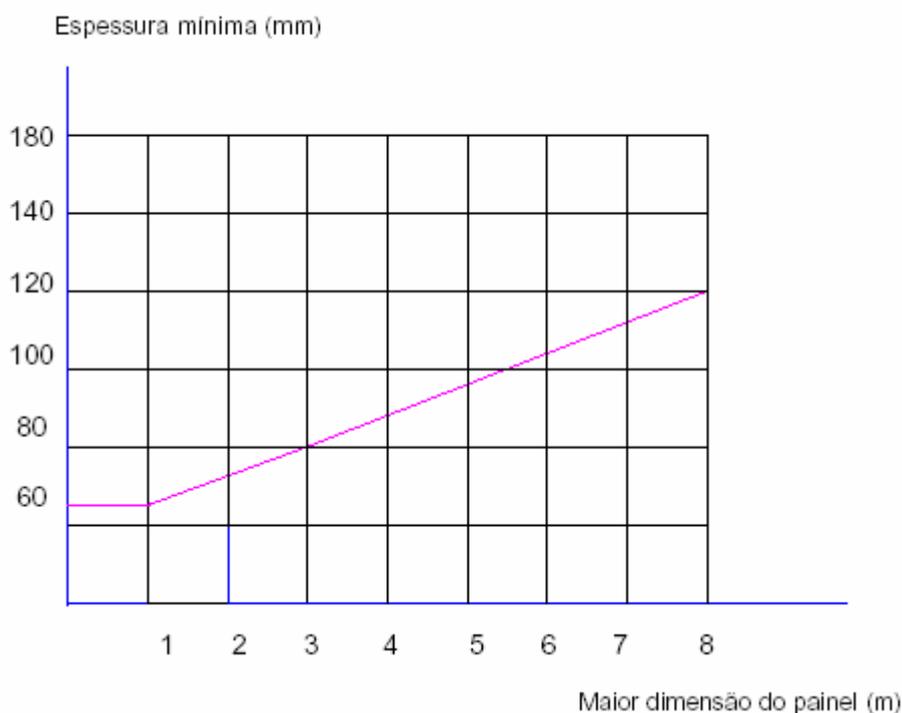


Figura 2.4 – Espessura mínima do painel (FIP, 1982 apud CASTILHO, 1998).

2.2.2-Material Isolante

Com relação ao isolante, observa-se que a espessura deste depende das propriedades térmicas do material usado como isolante e da resistência térmica desejada. O isolante deve ter baixa absorção e espessura mínima de 25 mm de acordo com o PCI (1997) Quanto menor for a descontinuidade do isolante, menos serão as pontes térmicas prejudiciais à resistência térmica do painel.

Devido à aderência de alguns isolantes às placas de concreto, parte do esforço de cisalhamento entre as placas pode ser resistido pela aderência. Entretanto, costuma-se desprezar este efeito assumindo que a aderência é rompida durante o içamento do painel ou por mudanças diferenciais cíclicas no volume.

Seeber *et al* (1997) consideram como isolante ideal para painéis sanduíche material isolante celular por ser mais compatível com o concreto. O isolante celular é fornecido em duas formas, termoplástico (poliestireno expandido e extrudido) e expandidos por cura sob calor (poliuretano).

Durante a manufatura do painel, o isolante é exposto a altas temperaturas pela hidratação e calor aplicado para aceleração da cura, cargas devido ao tráfego, altos níveis de umidade provenientes da cura da mistura plástica, esforços de compressão e flexão. Isto exige um isolante com performance superior.

O concreto celular autoclavado é classificado, conforme a NBR-13438 (ABNT, 1995) como concreto leve obtido através de processo industrial. Uma mistura contendo materiais calcáreos e materiais ricos em sílica é expandida através da utilização de produtos formadores de gases, água e aditivos, sendo submetidos à pressão e temperatura através de vapor saturado. Este concreto contém células fechadas, sendo areado uniformemente. Um dos produtos químicos utilizados para a formação de gases é o pó de alumínio. A água e as adições são utilizadas para controlar o bom andamento e a qualidade do processo de fabricação e do produto final. (Figura 2.6).

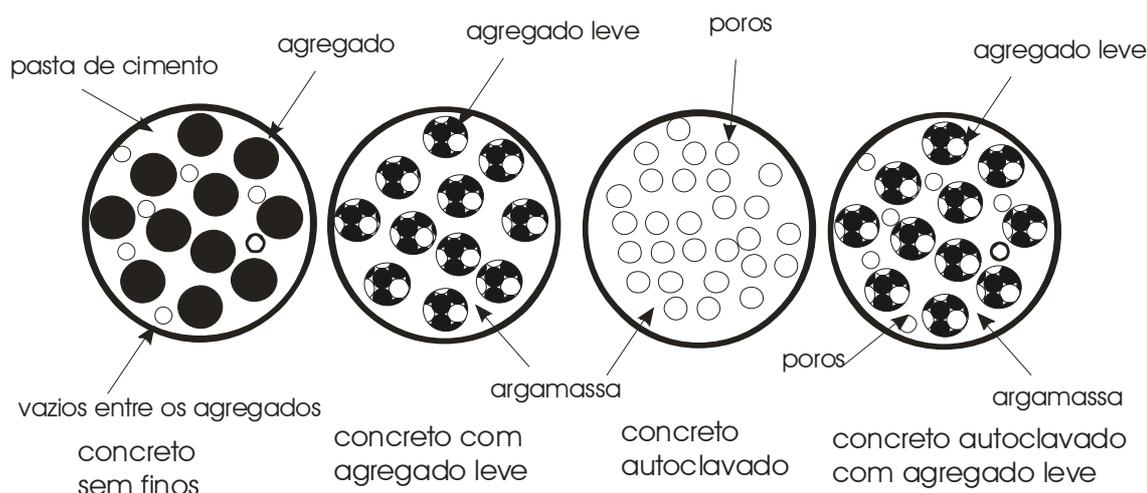


Figura 2.5 - Esquema de um concreto celular (COSTA, 1995 apud KRÜGER, 2000).

Em lugares onde são comuns ciclos de gelo-degelo, forças induzidas pela mudança de volume separam as células do material. Este processo de desintegração ocorre geralmente quando o isolante é o poliestireno. Quando se opta pelo uso de poliestireno extrudido verifica-se uma atenuação deste problema.

A performance do isolamento térmico do painel depende da eficiência do isolante ao resistir à transferência de energia. Interrupções causadas por aço, plástico ou outros constituintes podem induzir pontes de energia as quais prejudicam a eficiência de isolamento térmico do painel.

Pfrimer & Vigilato (2002) realizaram um estudo de painéis de concreto leve com poliestireno expandido reciclado. Os painéis foram confeccionados com pérolas de

poliestireno expandido reciclado e armadura dupla de barras com diâmetro de 5 mm. A massa específica encontrada foi de 770 kg/m³ e a resistência à compressão média do concreto aos 30 dias foi de 7 MPa. O poliestireno expandido, em placas e flocos, proporcionou conforto acústico e térmico e redução do peso do painel sem prejudicar a eficiência estrutural do mesmo.

O poliestireno expandido (EPS) é um monômero polimerizado em meio aquoso, derivado do petróleo, recebendo uma adição de gás pentano, que é o agente expensor. Comercialmente pode ser encontrado na forma de pérolas milimétricas, capazes de expandir até 60 vezes quando expostas ao vapor d'água. Tem-se como resultado uma espuma composta por 98% de ar e 2% de poliestireno. Segundo fabricantes, em 1m³ de EPS existe de três a seis bilhões de células fechadas e cheias de ar que impedem a passagem de líquidos, mas permitem a passagem de gases entre os interstícios das câmaras. Este material fornece leveza significativa, boa resistência mecânica e isolamento térmico. Reciclados, os blocos, placas e utensílios de EPS podem ser remodelados para aplicações que não exijam aparência e características mecânicas homogêneas, como por exemplo, caixões-perdidos para lajes, conforme NBR- 11572 (ABNT, 1993).

Einea *et al* (1994) analisaram oito painéis com núcleo isolante de poliestireno sujeitas ao cisalhamento direto (*push-off test*). A espessura da camada isolante de poliestireno expandido era de 75 mm. Em quatro amostras foi usada uma fina camada de material aderente entre as faces das placas e do isolante. Observou-se que o isolante contribuiu em 10% na resistência ao cisalhamento. Esta contribuição pôde ser obtida através da comparação dos resultados das quatro amostras com material aderente com as demais amostras.

Neste trabalho será usado como material de enchimento no painel sanduíche argamassa com Vermiculita Expandida. Campos (2004) realizou estudos para obtenção do traço de concreto com Vermiculita Expandida. O objetivo do trabalho era otimizar a porcentagem de substituição, em volume, da areia por Vermiculita Expandida, visando um concreto leve com isolamento termo-acústico e resistente. Este agregado apresenta ainda a propriedade de ser resistente ao fogo.

Quando aquecido a uma temperatura entre 650°C e 1000°C, a vermiculita expande em até 15 vezes o seu volume original por exfoliação das delgadas lâminas que a constituem, originando a Vermiculita Expandida (Figura 2.7). Após a expansão da

vermiculita esta obtém características físicas excepcionais de flutuação, isolamento acústico e térmico.

Por se tratar de um agregado leve, a Vermiculita Expandida apresenta elevada porosidade e baixa massa específica aparente, que é uma característica comum dos isolantes térmicos. Observa-se que a massa específica do concreto com Vermiculita Expandida encontra-se entre 400 kg/m^3 e 800 kg/m^3 (ACI 213R, 1987).

Embora ocorra ganho na resistência térmica do painel, concretos com Vermiculita Expandida apresentam baixa resistência mecânica, em torno de 3MPa. Por esta razão, a Vermiculita Expandida tem aplicações em vedações e não em peças estruturais.



Figura 2.6 - Vermiculita Expandida (CAMPOS, 2004).

2.2.3-Conectores

Outro constituinte dos painéis sanduíches são os conectores, que podem resistir ou não ao cisalhamento. Eles podem ser classificados em rígidos e flexíveis.

Dentre os conectores rígidos destacam-se pequenas barras dobradas, placa perfurada expandida, camisa plana ancorada, treliça metálica, etc (Figura 2.8).

Existem ainda conectores capazes de transmitir cisalhamento nas duas direções do plano do painel. Os mais comuns são: camisa cilíndrica ancorada resistente tanto à

torção quanto ao cisalhamento, coroa ancorada e blocos de concreto na forma de quadrados ou contínuos, ancorados no topo e na base do painel (Figura 2.9).

Os conectores não rígidos são usados em painéis não compostos para transferir esforços de tração e compressão devido à estocagem, transporte e cargas sísmicas de uma placa não estrutural para outra estrutural. Em painéis compostos estes conectores podem ser usados em conjunto com conectores rígidos se o espaçamento entre estes conectores é grande. Nesta categoria encontram-se os conectores metálicos, sendo os mais populares os pinos e os conectores plásticos (Figura 2.10). Neste caso, entretanto, deve-se ter cuidado em verificar a resistência ao fogo do painel.

Segundo Seeber (1997) os conectores desempenham várias funções em um painel sanduíche. Em painéis compostos, os conectores resistem ao cisalhamento horizontal entre as placas. Em painéis não-compostos, o tipo e o arranjo dos conectores são detalhados visando minimizar o efeito do cisalhamento horizontal entre as placas para que elas resistam aos esforços separadamente. Combinações entre os conectores também podem ser usadas. Em uma mesma peça estrutural podem existir blocos de concreto resistindo ao cisalhamento e pinos metálicos para garantir a união entre as placas.

Estando as placas interconectadas podem ocorrer movimentos diferenciais de temperatura entre as mesmas, resultando em curvatura do painel. Devido ao aumento da interação, resultado de uma maior rigidez dos conectores e também da resistência ao cisalhamento fornecida pela aderência entre o isolante e as placas, curvaturas no painel são comuns.

Bush & Wu (1998) realizaram estudo de uma solução aproximada de um painel semicomposto simplesmente apoiado sob carregamento uniforme com conectores tipo treliça e núcleo em poliestireno expandido. Esta solução analítica é baseada na teoria de Allen (1969) e será apresentada no item 2.3.1.2 deste capítulo. Os autores observaram que quando os conectores são mais rígidos que o material isolante, estes aumentam a rigidez efetiva ao cisalhamento do núcleo.

As seguintes hipóteses foram assumidas: (1) as diagonais inclinadas dos conectores fazem com que estas se comportem como membros de treliça com extremidades conectadas nas interfaces entre as placas e o material isolante; (2) os conectores são orientados longitudinalmente ao longo do comprimento do painel; (3) o efeito dos conectores discretos é distribuído na largura do painel.

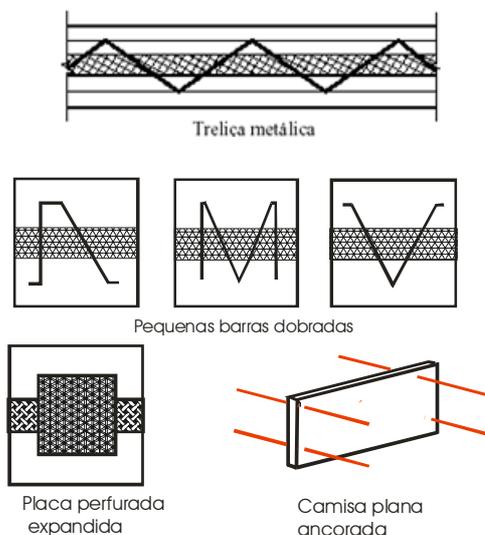


Figura 2.7 - Conectores Rígidos (SEEBER, 1997).



Figura 2.8 - Conectores rígidos com resistência ao cisalhamento nas duas direções (SEEBER, 1997).

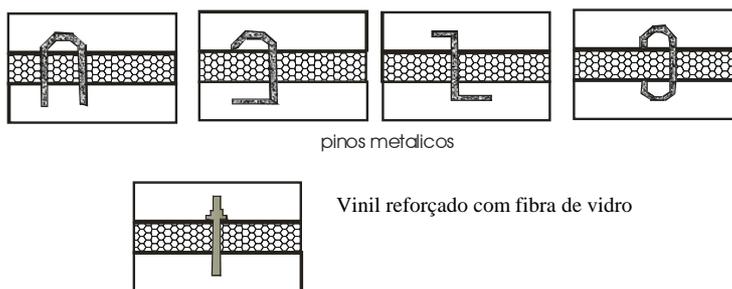


Figura 2.9 - Conectores flexíveis (SEEBER, 1997).

De acordo com Einea *et al* (1994), o uso de conectores plásticos reforçados apresentam alta resistência térmica além de fornecer um painel composto (Figura 2.11). Esses conectores (FRPBB) consistem em barras de plástico trançadas (*fiber-reinforced plastic* - FRP) na forma helicoidal com inclinação próxima de 45° , seção transversal circular e diâmetro conforme dimensionamento. São constituídos por mais duas barras ou

cabos protendidos formando uma treliça. Este sistema antes de ser aplicado ao painel é inserido em blocos de espuma, prevenindo penetrações do concreto durante a fabricação dos painéis. Uma desvantagem está no alto custo deste material quando comparado aos conectores de aço ou concreto, o que pode ser reconsiderado quando se faz uma análise de custo-benefício.

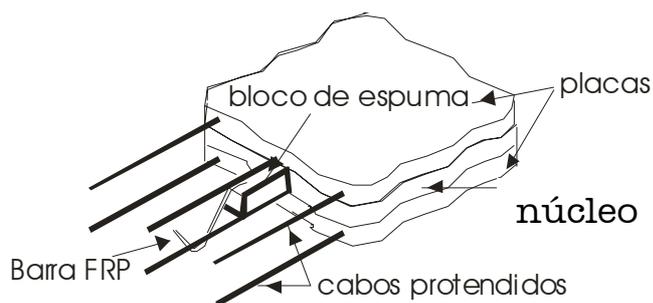


Figura 2.10 – Conector FRPBB utilizado por Einea *et al.*, (1994).

Segundo pesquisa realizada por Salmon & Einea (1995), conectores tipo treliça possuem rigidez ao cisalhamento suficiente para tratar o painel como totalmente composto. Entretanto, a condutividade do aço causa a perda de isolamento e a alta rigidez aumenta as deformações devido a diferenças de temperatura.

Saleem *et al* (1991) utilizaram como conectores, em painéis sanduíches com placas de argamassa armada, nervuras armadas com barras de aço de 4 mm de diâmetro e espaçadas longitudinalmente a cada 250 mm. Em alguns painéis, além de barras de aço as nervuras receberam malhas de fios entrelaçados. Estas nervuras tinham como objetivo evitar rupturas por cisalhamento, e tiveram importante função para que o painel alcançasse a capacidade última. O aumento do número de nervuras além do mínimo requerido não provocou melhoras no comportamento à flexão nos três estágios.

2.3-Comportamento Mecânico

2.3.1-Comportamento à Flexão de Painéis Sanduíche

Neste item são apresentados os estudos relatados na literatura sobre o comportamento a flexão de painéis sanduíche.

Saleem *et al* (1991) estudaram o comportamento de 12 painéis sanduíche com placas de argamassa armada. Os resultados teóricos, fornecidos pelo ACI SP-61 (ACI, 1979), foram comparados com os obtidos dos ensaios experimentais. Dos ensaios foram obtidos também o comportamento na ruptura e as configurações das fissuras para todos os painéis.

Quanto ao procedimento experimental, os painéis consistiam de duas placas de ferrocimento de 20 mm de espessura, armadas com um número variável de camadas de malha de fios, e podendo ter ou não armadura de esqueleto. Esta armadura de esqueleto consistia de oito barras de 4 mm de diâmetro dispostas longitudinalmente e dez barras de 4 mm de diâmetro em direção transversal, formando uma malha. Esses painéis possuíam também nervuras de argamassa que variaram de três a cinco com o objetivo de se evitar ruptura por cisalhamento entre as placas. As nervuras eram armadas com barras de aço de 4 mm de diâmetro e espaçadas longitudinalmente a cada 250 mm. Em alguns painéis, além de barras de aço as nervuras receberam malhas de fios entrelaçados. O núcleo do painel era de poliestireno resistente com 110 mm de espessura (Figura 2.12).

Todos os painéis foram carregados em quatro pontos nos terços médios do vão. Os autores observaram uma maior concentração de fissuras pouco espaçadas na zona central dos painéis, sendo estas mais finas para peças com maior número de camadas de malhas (Figura 2.13a). Fissuras devido ao cisalhamento surgiram em painéis que não desenvolveram toda sua resistência por causa de um menor número de nervuras ou por ausência de camadas de malhas de fios nas placas. Neste caso, foram observadas fissuras diagonais que se iniciavam sobre o apoio, sendo que painéis com quatro camadas de malhas de fios tiveram fissuras ao longo das nervuras e destacamento da placa (Figura 2.13b).

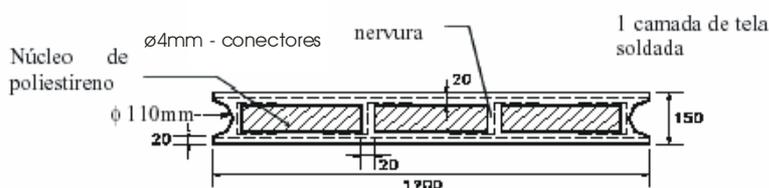


Figura 2.11 – Esquema dos painéis estudados por Saleem *et al* (1991).

O aumento do número de nervuras de três para cinco não aumentou a resistência à flexão e a ductilidade. O aumento do número das camadas de malha de fios aumentou a rigidez e a ductilidade no segundo estágio da flexão, e,

conseqüentemente, aumentou o momento de ruptura.

Comparando-se as curvas carga-flecha de painéis com duas camadas de malhas de fios e quatro camadas verificou-se aumento na rigidez e ductilidade no estágio II. Painéis que tiveram as nervuras armadas também com malhas de fios, exibiram fissuras centrais e espaçadas dependendo do número das camadas de malhas de fios. Entretanto, a ruptura se deu por causa das fissuras diagonais desenvolvidas na região do apoio.

O momento de fissuração aumentou em função do número de camadas de malhas de fios. O uso de armadura de esqueleto forneceu um comportamento elástico tão bom quanto no comportamento pós-fissuração do painel.

Os momentos obtidos pelo ensaio foram comparados com momentos fornecidos pela teoria de esforços últimos do Código do ACI SP-61 (ACI, 1979), sendo esta comparação considerada razoável. Considerou-se na análise dos momentos a malha de fios em escoamento devido aos grandes deslocamentos em painéis rompidos à flexão.

Saleem *et al* (1991) concluíram que painéis sanduíches de ferrocimento são menos resistentes à flexão e oferecem menor isolamento térmica por serem finos. As faces do painel fornecem proteção ao núcleo e resistem a esforços de tração e compressão. As nervuras do painel fornecem resistência ao cisalhamento o que torna o painel composto.

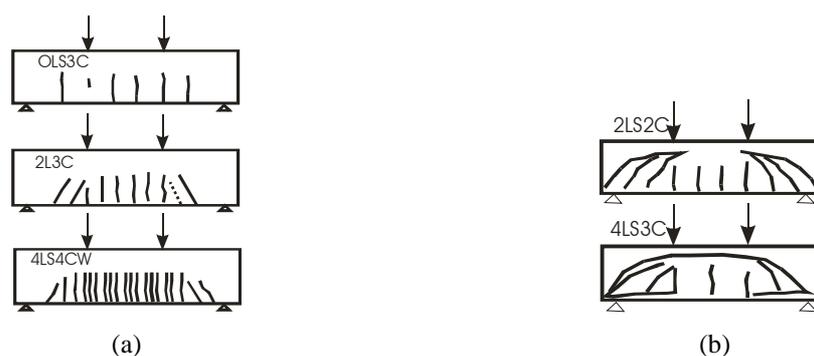


Figura 2.12 - Configuração das fissuras nos painéis estudados por Saleem *et al* (1991)¹.

¹ Na figura 2.13 as nomenclaturas OLS3C, 2L3C, 4LS4CW, 2LS2C, 4LS3C representam, respectivamente: Painel sem camada de fios nas placas com armadura de esqueleto, núcleo dividido em três seções e nervuras sem malhas de fio entrelaçados; Painel com duas camadas de fios nas placas sem armadura de esqueleto, núcleo dividido em três seções e nervuras sem malhas de fio entrelaçados; Painel com quatro camadas de fios nas placas com armadura de esqueleto, núcleo dividido em quatro seções e nervuras com malhas de fio entrelaçados; Painel com duas camadas de fios nas placas com armadura de esqueleto, núcleo dividido em duas seções e nervuras sem malhas de fio entrelaçados; Painel com quatro camadas de fios nas placas com armadura de esqueleto, núcleo dividido em três seções e nervuras sem malhas de fio entrelaçados.

Bush & Stine (1994) realizaram ensaios em duas séries de painéis sanduíche contendo conectores treliçados, sendo que as placas de todos os painéis foram protendidas. A primeira série foi construída mantendo-se o mesmo procedimento adotado comercialmente. A outra série de painéis teve algumas modificações para eliminar regiões críticas ao cisalhamento.

O detalhamento construtivo da primeira série é mostrado na Figura 2.14. Podem-se observar cortes no isolante formando blocos quadrados ao redor de quatro elementos de fixação para acabamento, e também alças de içamento ao longo de uma extremidade e uma borda do painel. Pequenas aberturas entre as placas do isolante são deixadas para passagem das treliças, formando-se nervuras de concreto. Durante a concretagem da placa, ocorre a penetração do concreto nos cortes feitos no isolante, formando-se blocos de concreto nesta região. Na segunda série de painéis as alças de içamento foram eliminadas bem como foram colocados colares de espuma de poliestireno ao redor dos elementos de fixação para acabamento. O espaço entre as placas do isolante para disposição das treliças foi preenchido com espuma de poliestireno, evitando-se a entrada de concreto durante a moldagem dos painéis. Dessa forma, foram eliminadas nesta segunda série as nervuras e os blocos de concreto que promovem um aumento na resistência ao cisalhamento horizontal, que não permitem a quantificação da influência da treliça na resistência do painel.

Na primeira série foram ensaiados painéis sem treliça e com três e quatro linhas de treliça orientadas longitudinalmente. Os painéis com treliça apresentaram comportamento mais próximo de uma composição total, exibindo ruptura por flexão. O painel sem nenhuma treliça apresentou uma rigidez inicial intermediária na região entre um comportamento composto e não-composto. A resistência à flexão do painel com três linhas de treliça foi ligeiramente menor, provavelmente devido à ausência de malhas de fios nas placas.

Para esta série de painéis as diagonais tiveram pouca participação na transferência de cisalhamento entre as placas, sendo esta transferência realizada pelos inserts, alças de içamento e nervuras de concreto. O painel sem nenhuma treliça apresentou comportamento composto no meio do vão e não-composto nas regiões do painel que não continham inserts e alças de içamento, surgindo fissuras nestas regiões (Figura 2.15).

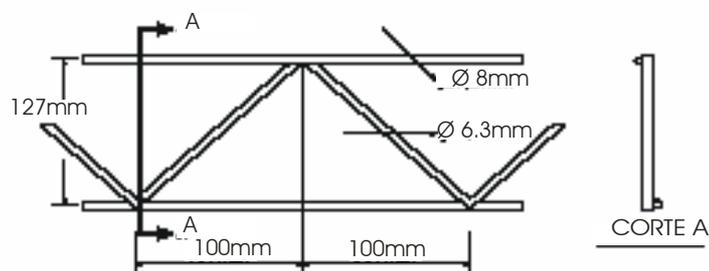
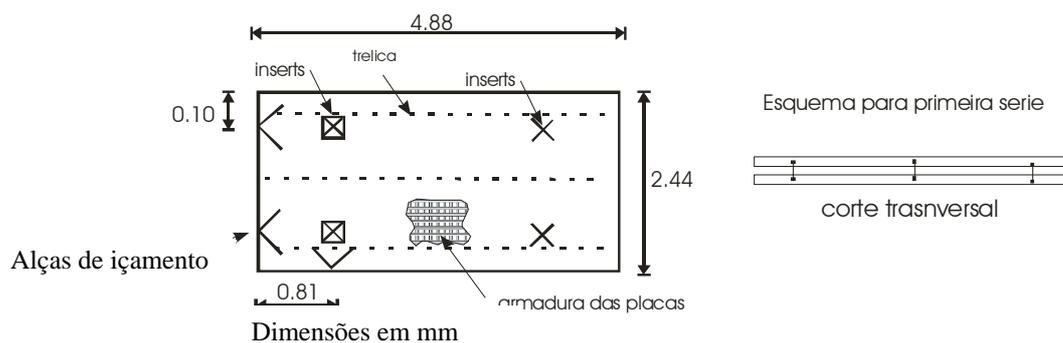


Figura 2.13 – Detalhes construtivos dos painéis ensaiados por Bush & Stine (1994).

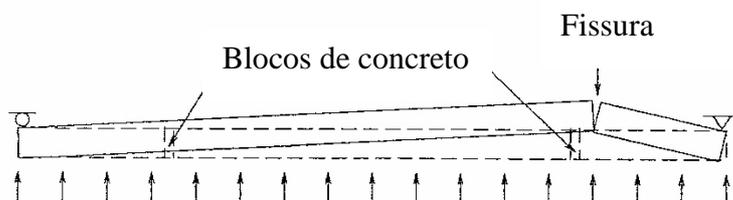


Figura 2.14 - Fissura ao lado dos blocos de concreto (BUSH & STINE, 1994).

Na série modificada, os painéis com duas e três linhas de treliça orientadas longitudinalmente tiveram um comportamento mais próximo do composto. O painel com treliça na direção transversal apresentou uma rigidez, aproximadamente, intermediária na região entre um comportamento composto e não-composto.

Para o painel com duas linhas de treliça a ruptura foi por flexão. As diagonais tiveram participação na transferência do cisalhamento entre as placas, ocorrendo escoamento e flambagem nas diagonais próximas ao apoio e a um quarto do vão. Alguns

cabos protendidos apresentaram escoamento e foram observadas fissuras próximas ao apoio. A diferença apresentada pelo painel com três linhas de treliça foi que não houve escoamento nas diagonais a um quarto do vão e apenas uma minoria dos cabos protendidos apresentaram escoamento. O painel com treliça na direção transversal teve ruptura por flexão desenvolvendo fissuras na região próxima ao apoio onde não havia treliças.

Os autores realizaram também um ensaio de cisalhamento direto (Figura 2.16) confeccionando uma amostra para cada série de painéis. Observaram que as nervuras criadas na região das treliças afetaram significativamente a rigidez ao cisalhamento e a resistência aos esforços na interface. Os painéis da primeira série resistiram 70 % mais carga e foram 350 % mais rígidos que os painéis da segunda série.

Bush & Stine (1994) chegaram a resultados que mostraram a contribuição de conectores treliçados, dispostos longitudinalmente, na resistência ao cisalhamento horizontal entre as placas. Estes resultados apontaram também para a influência negativa das nervuras e blocos de concreto que funcionam como pontes térmicas adicionais, prejudicando a resistência térmica do painel, apesar de aumentar a capacidade de transferência do cisalhamento horizontal entre as placas. A contribuição do núcleo na transferência do cisalhamento entre as placas é altamente influenciada pelo tipo de material isolante usado, sendo que o poliestireno fornece excelente aderência com o concreto. O teste de fadiga realizado pelos autores aponta para perda na rigidez em função da deterioração da aderência entre as placas e o isolante ao se aplicar cargas cíclicas. Com a perda de aderência a transferência dos esforços de cisalhamento passa a ser feita apenas pelas treliças.

Einea *et al* (1994) analisaram oito painéis com dimensões idênticas sujeitas a cisalhamento direto para analisar o desempenho do conector (Figura 2.17). A espessura da camada isolante de poliestireno expandido era de 76 mm. O concreto usado nas placas da base e do topo tinha resistência igual a 34,5 MPa. Cada placa foi armada com uma malha de fios dimensionada para resistir à retração e aos esforços devido ao manuseio. Em quatro amostras foi usada uma fina camada de material aderente na interface das placas com o isolante.

Antes do ensaio de cisalhamento direto foi feita uma escolha preliminar do tipo do conector a ser usado. Foram analisados quatro tipos de conectores plásticos (*Fiber-Reinforced Plastic*). O modelo da Figura 2.18a foi considerado inadequado devido à fraca ancoragem. O conector da Figura 2.18b foi desconsiderado por ser caro e apresentar vazios

de ar ao redor dos cabos. O conector da Figura 2.18c foi considerado caro também. Escolheu-se o conector em forma de treliça da Figura 2.18d (FRPBB) para o ensaio de cisalhamento direto.

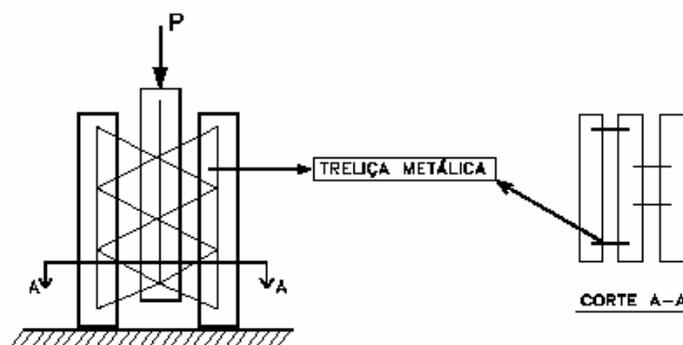


Figura 2.15 – Ensaio de cisalhamento direto realizado por Bush & Stine (1994).

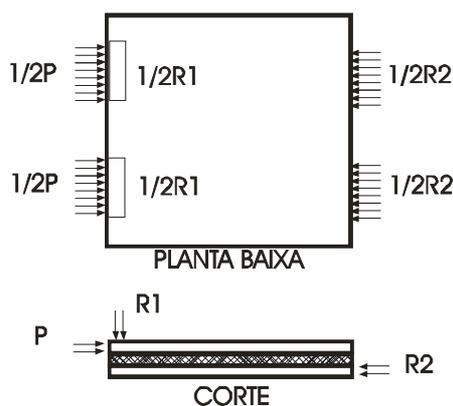


Figura 2.16 - Ensaio de cisalhamento direto realizado por Einea *et al* (1994).

A maioria dos conectores rompeu nas diagonais inseridas no isolante devido à compressão axial, flexo-compressão e flexo-tração. O isolante contribuiu em 10 % na resistência ao cisalhamento da amostra.

Quanto ao ensaio à flexão em escala reduzida, foram construídos dois modelos de painéis. Os painéis foram posicionados horizontalmente em uma estrutura de aço, apoiado por roletes em cada extremidade, e o carregamento aplicado por duas cargas concentradas sobre a placa do topo através de atuador hidráulico. Cada ponto de carregamento continha dois blocos de madeira para transferir a carga para ambas as placas. Para que não ocorresse interferência na resistência ao cisalhamento horizontal, a área total

desses blocos de madeira foi mantida pequena em relação à largura das amostras (Figura 2.19).

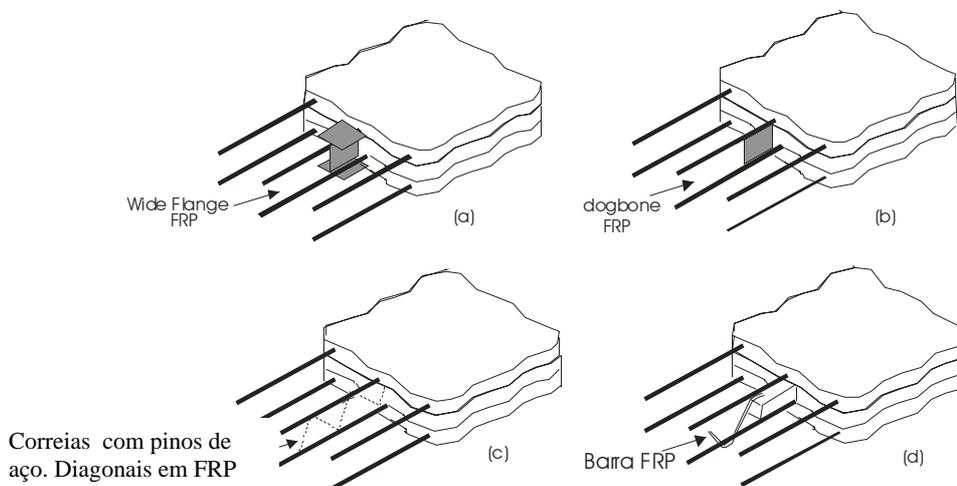


Figura 2.17 - Tipos de conectores com dispositivo FRP (EINEA *et al*, 1994).

A leitura da carga aplicada e os deslocamentos verticais no meio do vão foram fornecidas através de célula de carga e defletores, respectivamente. As tensões axiais nas diagonais dos conectores foram obtidas por meio de extensômetros elétricos de resistência.

Foram confeccionados dois modelos, ambos com uma linha de conector de plástico (FRPBB). O primeiro painel continha uma camada entre o isolante e as placas para quebrar a aderência entre ambos. No segundo painel esta aderência não foi quebrada. A resistência do concreto era de 42,7 MPa.

Para o painel sem aderência, a carga de ruptura foi de 28,2 kN. A primeira fissura foi observada na placa da base a uma carga de 8,9 kN. A placa do topo apresentou fissuras a uma carga de 17,3 kN. A maioria das fissuras ocorreu nos locais de momento máximo em cada placa e em regiões próximas a aplicação das cargas.

Para o painel com aderência entre o núcleo e as placas, a carga de ruptura foi de 35,6 kN devido a contribuição propiciada pela aderência entre o núcleo e as placas na resistência ao cisalhamento entre as placas, que aumentou não só a capacidade mecânica como também a rigidez do painel. As fissuras iniciaram na placa da base a uma carga de 15,6 kN e na placa do topo a uma carga de 23,6 kN.

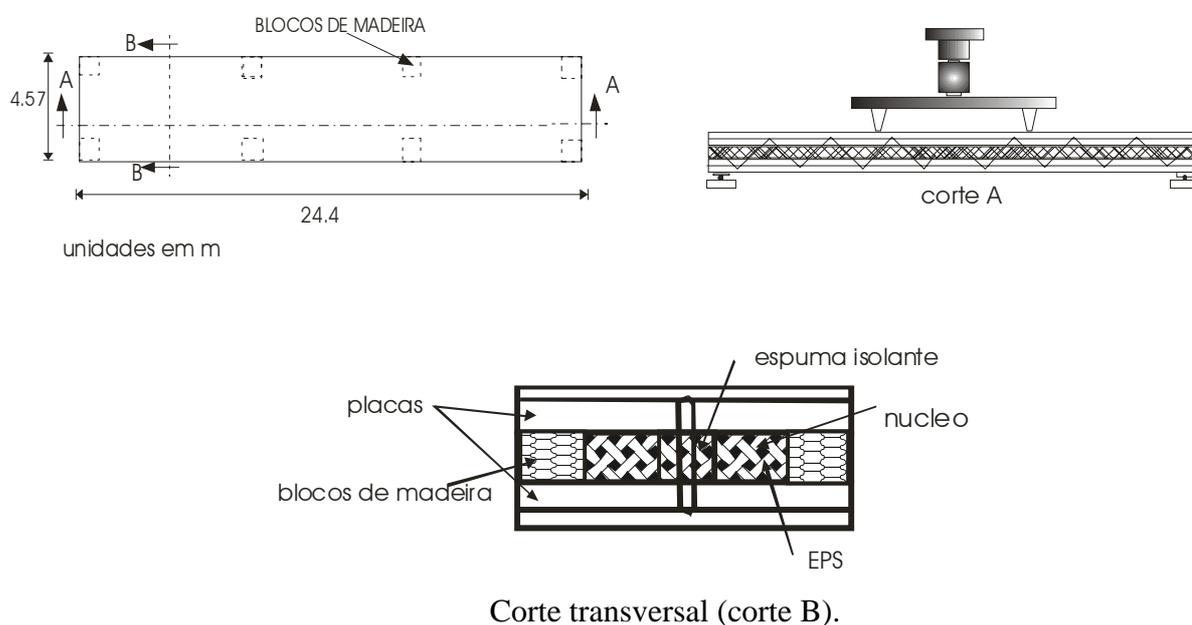


Figura 2.18 – Esquema de ensaio a flexão utilizado por Einea *et al* (1994).

Ambos os modelos de painéis apresentaram um comportamento não-composto no nível de tensões elásticas e aproximadamente composto quando estavam próximos da ruptura. Isso indica deslizamento dos conectores dentro das placas em estágios iniciais de carga. A solicitação nestes conectores aumentou com o aumento da carga aplicada, atingindo o valor máximo junto com a carga última do painel. Essa característica pode ser um benefício por reduzir a curvatura do painel devido a temperaturas diferenciais, mantendo um alto grau de composição. A amostra sem aderência apresentou um grau de composição de 65% enquanto que a amostra com aderência apresentou um grau de composição de 81%.

Foram ensaiados também dois painéis em escala real com 2,44 m de largura e 9,14 m de comprimento submetidos a um carregamento distribuído. A espessura das placas era de 64 mm e a do isolante (EPS) era de 76 mm. Nenhum artifício foi usado para eliminar a aderência entre as placas e o núcleo.

Os painéis comportaram-se linearmente até a pressão de 2,9 kPa. A alta rigidez inicial do painel corresponde à rigidez calculada considerando as diagonais dos conectores inseridas nas placas de concreto. O decréscimo na rigidez ocorreu a aproximadamente 2,9

kPa corresponde à rigidez calculada considerando os conectores como pinos nos pontos onde eles sofrem uma curvatura ao redor dos cabos protendidos.

Segundo Einea et al (1994), painéis em escala real tendem a serem mais rígidos que em escala reduzida, embora o número e a dimensão dos conectores sejam os mesmos. Existem duas explicações para isto. (1) Os painéis ensaiados em pequena escala não tiveram os cabos dos conectores protendidos. A protensão fornece maior ancoragem das barras fletidas. (2) Investigações analíticas afirmam que painéis mais longos têm grau de composição menor que painéis curtos que são três vezes mais rígidos.

Salmon & Einea (1995) desenvolveram equações para a representação dos deslocamentos verticais devido a mudanças diferenciais de volume para painéis parcialmente compostos com conectores do tipo treliça. Essas equações foram comparadas com uma análise pelo Método dos Elementos Finitos para testar sua eficiência.

Segundo Salmon & Einea (1995), as deformações em um elemento infinitesimal do painel consistem de duas componentes (Figura 2.20): (1) devido à curvatura do painel, $zd\theta_l$; (2) devido ao cisalhamento entre as placas, $q_{,x_l}dx_l/2$. Para pequenos deslocamentos, a curvatura do painel é dada por $d\theta_l = y_{,x_l x_l}dx_l$. Somando o momento devido a cada componente de deformação e rearranjando têm-se a equação (2.1):

$$\frac{1}{r} = \frac{d^2y}{dx_1^2} = \frac{M}{EI_{co}} + \frac{\alpha^2}{2r} \frac{dq}{dx_1} \quad (2.1)$$

Sendo

$$\alpha^2 = (I_{co} - 2I_c)/I_{co} ;$$

x_1 = distância ao longo do comprimento do painel;

y = deslocamento vertical do painel;

q = deslocamento horizontal relativo entre os centróides do topo e da base das placas devido ao cisalhamento;

b = largura do painel;

M = momento aplicado;

E_c = módulo de elasticidade da placa;

I_c = momento de inércia de placa em relação ao centróide da mesma;

I_{co} = momento de inércia da seção transversal composta;

r = distância do centróide de cada placa ao centróide do painel sanduíche.

A tensão de cisalhamento na interface entre a placa e o núcleo é dada por $K_c q$ onde K_c é a rigidez ao cisalhamento da interface. Esta tensão é a soma da tensão devido à curvatura do painel e a tensão devido ao deslocamento causado pelo cisalhamento entre as placas. Seu valor é obtido da equação clássica da resistência dos materiais para avaliação da tensão de cisalhamento que depois é igualada à mudança na força da placa ($E q_{,x1} b t / 2$) sobre o comprimento dx_1 , resultando em $E d q_{,x1 x1} dx / 2$. Equilibrando as forças de cisalhamento atuantes na interface têm-se:

$$E t r y_{,x1 x1 x1} - \frac{1}{2} E t q_{,x1 x1} + K q = 0 \quad (2.2)$$

Substituindo a derivada de (2.1) em (2.2), multiplicando por $2/Et$ e rearranjando obtém-se:

$$\beta^2 q_{,x1 x1} - u^2 q = 2r \frac{M_{,x1}}{EI} \quad (2.3)$$

Onde $\beta = (1 - \alpha)^2$ e $u^2 = 2K_c/Et$.

As equações (2.1) e (2.3) desprezam a contribuição da rigidez do núcleo momento resistente da seção. Estas equações também supõem um núcleo homogêneo com módulo de elasticidade transversal. Para painéis sanduíche em concreto com núcleo de EPS e conectores treliçados, a primeira hipótese é válida. Quanto à segunda hipótese o ideal é considerar um módulo de elasticidade efetivo para o painel. Além de se considerar o módulo transversal do núcleo, leva-se em conta a contribuição da treliça adicionando a rigidez desta ao módulo transversal do núcleo.

Para determinar a rigidez do conector foram estudadas diferentes condições de contorno nas extremidades do painel e diferentes condições de restrições nos conectores inseridos nas placas de concreto de centro a centro das placas (Figura 2.21).

Sobre as condições de contorno nas extremidades do painel, em $x_1 = x_0$ e $x_1 = x_2$, são dados três casos:

Caso 1 – Quando o painel está simplesmente apoiado, cada placa é livre de girar, e os momentos de extremidade para cada uma das placas são nulos. O momento total do painel também é nulo. Logo:

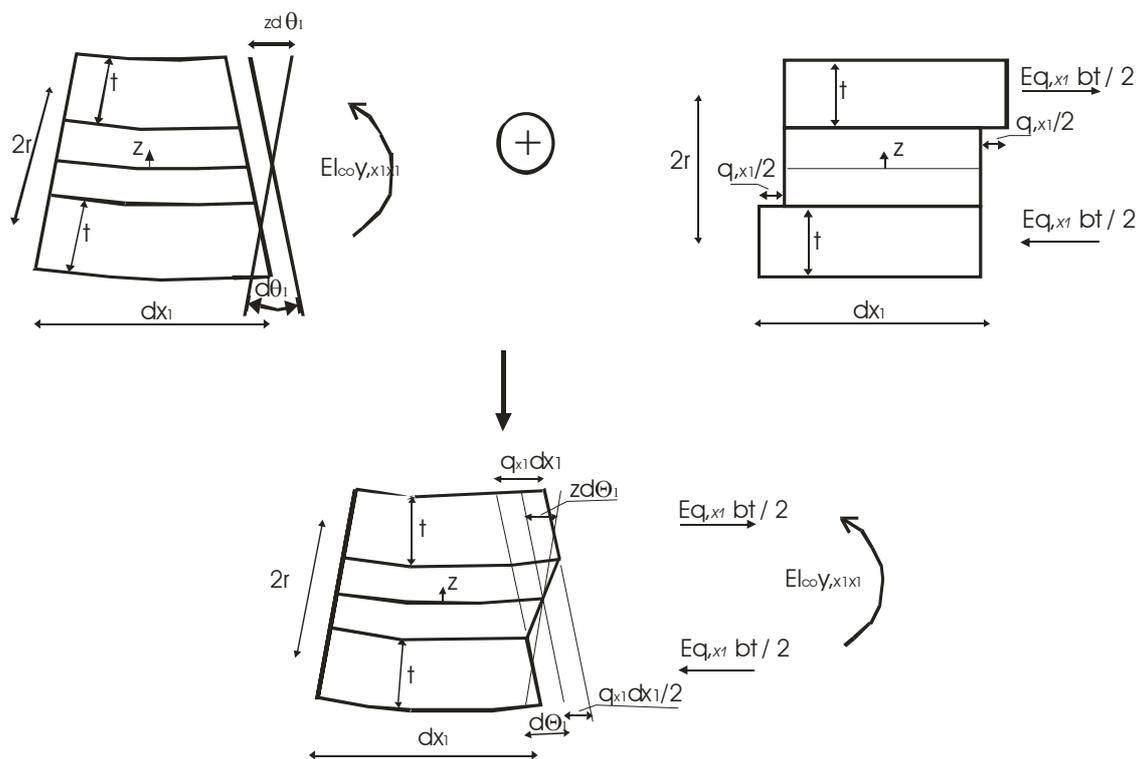


Figura 2.19 – Deformação do painel (SALMON & EINEA, 1995).

$$M = y_{,x1x1}(x_o) = y_{,xx}(x_2) = 0 \text{ e } q_{,x1}(x_o) = q_{,x1}(x_2) = 0 \quad (2.4a-b)$$

Caso 2 – Quando o painel está engastado, não há rotação e o deslocamento relativo entre as placas é previsto, logo:

$$y_{,x1}(x_o) = y_{,x1}(x_2) = 0 \quad / \quad e \quad q(x_o) = q(x_2) = 0 \quad (2.5a-b)$$

Caso 3 – Quando o painel está engastado, mas a rotação é admitida e o deslocamento relativo entre as placas é previsto. O momento para cada placa é nulo e para o momento total do painel leva-se em conta a restrição do deslocamento relativo. Têm-se então:

$$M = y_{,x1x1}(x_o) = y_{,x1x1}(x_2) = 0 \quad / \quad q_{,x1}(x_o) = -\frac{2rM(x_o)}{\alpha^2 EI} \quad / \quad q_{,x1}(x_2) = -\frac{2rM(x_2)}{\alpha^2 EI} \quad (2.6a-c)$$

Para as três condições de restrição dos conectores mostradas na Figura 2.21 a área líquida considerada foi $2rb/mp$, onde m é o numero de conectores, b é a largura do

painel e p é a inclinação do conector. São conhecidos também o módulo de elasticidade do conector (E_{sc}) e a sua área da seção transversal (A_{sc}).

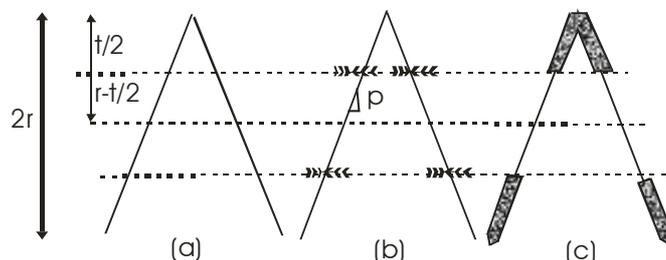


Figura 2.20 – Condições de restrição dos conectores. (a) desconsiderando a restrição da placa (extremidades rotulada) (b) considerando a ação do concreto da placa engastando os conectores. (c) considerando apenas restrição lateral do concreto da placa (SALOMN & EINEA, 1995).

Condição 1 – os conectores treliçados são ancorados no centro de cada placa. Para uma deformação cisalhante unitária entre as placas tem-se um alongamento no conector de:

$$e = \frac{1}{\sqrt{1 + p^2}} \quad (2.7)$$

Para se obter a força axial no conector multiplica-se este alongamento pela rigidez do conector, o que fornece:

$$F = \frac{E_{sc} A_{sc} p}{2r(1 + p^2)} \quad (2.8)$$

A rigidez ao cisalhamento do conector é a componente paralela às placas dividida pela área líquida do painel:

$$K_c = \frac{A_{sc} E_{sc} p^2 m}{4r^2 b(1 + p^2)^{3/2}} \quad (2.9)$$

Condição 2 – Assumindo que o concreto forneça a fixação total do conector, tanto lateral quanto axial na região inserida nas placas, o comprimento do conector, medido entre as faces das placas, é levado em conta e a rigidez à flexão do conector é incluída no cálculo da força axial. A rigidez ao cisalhamento é dada por:

$$K_c = \frac{E_{sc} p^2 m}{2rb(1+p^2)^{5/2} (2r-t)^3} \left[(1+p^2)(2r-t)^2 A_{sc} + 12p^4 I_{con} \right] \quad (2.10)$$

Onde I_{con} é o momento de inércia de cada conector.

Condição 3 – Assume-se que as placas forneçam restrição lateral ao conector na região inserida nas placas com fixação axial no centro de cada placa, ocorrendo deslizamento ao longo do comprimento inserido. O comprimento do conector se estende de centro a centro de cada placa. A rigidez ao cisalhamento é dada por:

$$K_c = \frac{E_{sc} p^2 m}{4rb(1+p^2)^{3/2}} \left[\frac{A_{sc}}{r} + \frac{24p^4 I_{con}}{(1+p^2)(2r-t)^3} \right] \quad (2.11)$$

É evidente que a curvatura do conector fornece pequena contribuição na sua rigidez. Entretanto, se a fixação dos mesmos às placas impede o deslocamento axial (caso 2), o aumento na rigidez é significativo. Resultados de testes em conectores plásticos reforçados por fibras (FRP) indicam que o deslizamento que ocorre ao longo do comprimento inserido nas placas justifica o uso das condições 1 e 3. Devido à simplicidade da condição 1 sobre a condição 3, e pela pequena rigidez fornecida pela restrição lateral dos conectores, a condição 1 é usada para conectores plásticos (FRP).

Bertini (2002) confeccionou oito modelos de painéis sanduíche com diferentes tipos de configuração da nervura: painéis sem nervura, com nervuras longitudinais, com nervuras transversais e nas extremidades, com nervuras nas extremidades transversais e longitudinais e uma nervura longitudinal no meio do painel (Figura 2.22). Alguns painéis tiveram as nervuras das extremidades armadas com fios de 4,2 mm a cada 15 cm.

A espessura das placas e nervuras do painel era de 3 cm. Foram utilizadas placas de EPS de 7,8 cm de espessura como material do núcleo que consistiam de pré-painéis compostos com telas soldadas, dispostas em ambos os lados, ligadas por fios atravessando a placa de EPS fazendo 45° com a superfície da placa. A principal função

destes fios era manter as telas a uma distância de 1 cm da face da placa de EPS e fazer com que o pré-painel possuísse rigidez suficiente para permitir a projeção da argamassa.

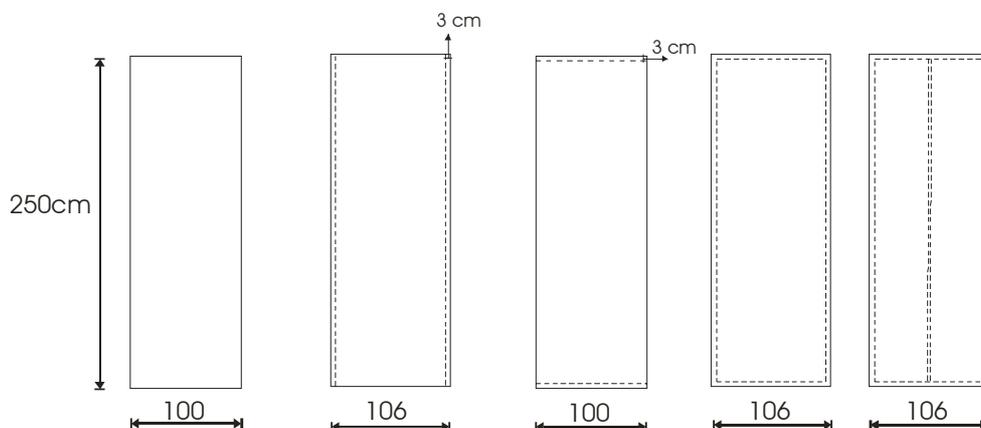


Figura 2.21 - Dimensões dos painéis estudados por Bertini (2002).

Os painéis foram carregados nos terços do vão, sendo medidos os deslocamentos verticais e o relativo horizontal entre as placas superior e inferior através de relógio comparador. As deformações na armadura, nos conectores e nas faces das placas de concreto superior e inferior foram medidas através de extensômetros elétricos.

Para a maioria dos modelos ensaiados verificou-se ruptura caracterizada por deformação excessiva do painel, observando-se também abertura excessiva das fissuras, sendo o ensaio, portanto, interrompido antes da ruptura. Os valores experimentais foram comparados com valores teóricos obtidos pela teoria do concreto armado considerando a seção completamente composta. O momento de fissuração obtido experimentalmente foi menor que o esperado, provavelmente devido ao modo como as placas foram confeccionadas, por argamassa projetada, embora o ganho de resistência à flexão alcançado pelo aumento da inércia foi cerca de 258 % maior que o valor teórico considerando o painel composto. A presença de nervuras contribuiu para um decréscimo nas deformações devido ao fornecimento de maior interação entre as placas.

No modelo com nervuras apenas nas extremidades transversais, obteve-se um momento último 20 % menor que o esperado. Verificou-se nesse painel um pequeno aumento no momento último, da ordem de 5 %, em relação ao modelo sem nervuras. A deformação média na placa comprimida para o modelo sem nenhuma nervura foi maior que para o modelo com nervuras nas extremidades transversais. A composição adicional

proporcionada pelas nervuras fornece uma redução nas deformações do concreto e do aço, porque a interação entre as placas é maior.

Os modelos com nervuras longitudinais apresentaram momentos últimos experimentais maiores que os teóricos. Os painéis que tiveram as nervuras armadas apresentaram melhoras significativas na resistência à flexão. Para o modelo com nervuras longitudinais esse aumento proporcionado pela armadura de cisalhamento nas nervuras foi de 35 %, enquanto no modelo com nervuras em todas as extremidades esse aumento na resistência à flexão foi de 47 % comparado ao valor teórico considerando o painel composto.

A transferência de esforços de uma placa à outra foi em grande parte realizada por meio da placa de EPS, que apesar de não ter rigidez elevada garantiu a composição parcial do painel. Observou-se que um menor espaçamento entre as nervuras não representou um ganho significativo no comportamento à flexão do painel, mesmo para o painel com nervura longitudinal disposta no meio da largura do painel. Observaram-se, entretanto, melhoras na rigidez desse painel, que apresentou menores deslocamentos.

Bertini (2002) concluiu que o momento de fissuração de um elemento fletido com seção tipo sanduíche, com faces de argamassa projetada e núcleo fraco, pode ser calculado com boa aproximação utilizando-se a teoria de concreto armado. A seção considerada no cálculo corresponde a uma seção maciça equivalente, determinada a partir da redução do momento de inércia da seção tipo sanduíche por um coeficiente C . Este coeficiente leva em conta a perda de rigidez pelo movimento relativo entre as faces, corrigindo-se o valor do momento de inércia através do coeficiente de correção sugerido por Sheppard & Phillips (1989), ver Quadro 2.1. O valor teórico do momento de inércia é calculado de acordo com a equação (2.12).

$$I_t = \frac{b}{12}(h^3 - c^3) \quad (2.12)$$

Onde h e c são representados na Figura 2.23.

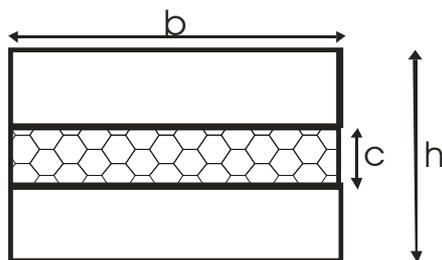


Figura 2.22 – Seção transversal do painel tipo sanduíche (SHEPPARD & PHILLIPS,1989).

O Quadro 2.1 mostra os coeficientes de correção do momento de inércia para painéis com seção composta fornecidos por testes realizados pela Associação do Cimento Portland.

Quadro 2.1 – Coeficientes de correção do momento de inércia.

Detalhamento do painel	Coefic. de correção (%)
Placas conectadas por isolante rígido ou por pinos metálicos.	22
Painéis com concreto sólido apenas nos bordos periféricos.	39
Painéis com membros de treliça metálica, mas sem concreto nos bordos.	50
Painéis com treliças ou <i>studs</i> e concreto nos bordos.	70

Fonte: (SHEPPARD & PHILLIPS, 1989).

Bertini (2002) adotou para os painéis sem nervura um coeficiente igual a 0,13 e para painéis com nervuras longitudinais um coeficiente igual a 0,23. Considerando essa correção os valores dos momentos de fissuração, experimentais e teóricos, foram próximos.

Pessiki & Mlynarczyk (2003) confeccionaram quatro painéis sanduíche em escala real. O primeiro painel, o protótipo, continha três mecanismos de transferência do cisalhamento (blocos de concreto, conectores metálicos e aderência entre o núcleo e as placas). O grau de composição foi avaliado confeccionando-se mais três painéis incluindo

em cada um deles apenas um dos três mecanismos de transferência citados. A Figura 2.24 mostra o modelo de conector metálico utilizado pelos autores.



Unidade em cm

Figura 2.23 – Conector M-tie (PESSIKI & MLYNARCZYK, 2003).

Cada painel consistia de duas placas de concreto de 76 mm de espessura e isolante de poliestireno extrudado de 51 mm de espessura. As dimensões de cada painel eram 1,83 m x 11,28 m e vão livre de 10,67 m. As placas de concreto continham cabos que foram protendidos axialmente (Figura 2.25).

O Quadro 2.2 mostra um resumo do programa experimental utilizado no trabalho de Pessiki & Mlynarczyk (2003).

Quadro 2.2 – Programa Experimental (PESSIKI & MLYNARCZYK, 2003).

Painel	(M-Tie)	Aderência entre concreto e isolante	Variável Principal
1	Sim	Sim	Protótipo
2	Sim	Não	Parte da composição fornecida pelo conector M-Tie
3	Não	Sim	Parte da composição fornecida por blocos de concreto
4	Não	Não	Parte da composição fornecida pela aderência

O painel com os três mecanismos de transferência de cisalhamento foi dimensionado como um painel parcialmente composto com 70 % de composição quando em serviço e totalmente composto durante o içamento e manuseio. No painel contendo apenas o conector metálico (M-tie), para evitar interferência da aderência entre o isolante e as placas foi utilizada uma fina camada de plástico para eliminar esta aderência. Os autores

também fixaram o mecanismo de içamento apenas em uma das placas para que este não contribuísse no aumento do grau de interação entre as placas. O painel que apresentou apenas blocos de concreto como forma de transferência de cisalhamento horizontal entre as placas teve a aderência entre o isolante e as placas eliminada da mesma forma que no painel com apenas conectores metálicos. O painel com apenas aderência entre o isolante e as placas teve os dispositivos fixados em apenas uma das placas igualmente ao painel apenas com conectores metálicos.

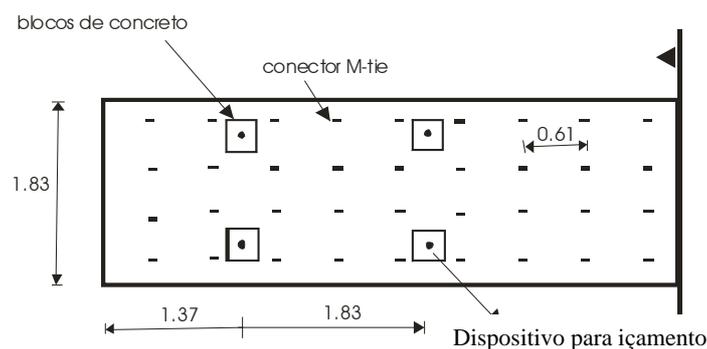


Figura 2.24 – Detalhe dos painéis ensaiados por Pessiki & Mlynarczyk (2003).

Quanto ao ensaio, os painéis foram posicionados horizontalmente, simplesmente apoiados e submetidos a uma pressão uniforme aplicada através de bolsas de ar e monitorada por um regulador de pressão. Quanto à instrumentação, os deslocamentos verticais foram medidos em quatro pontos do painel e no meio do vão. Os deslocamentos relativos entre as placas foram monitorados através de LVDTs posicionados em cinco pontos ao longo do painel.

Um dos principais objetivos de Pessiki & Mlynarczyk (2003) foi estabelecer o grau de composição fornecido pelos três diferentes tipos de mecanismos de transferência de cisalhamento apresentados anteriormente através da equação (2.13a).

$$GC = \frac{I_{\text{exp}} - I_{nc}}{I_c - I_{nc}} \quad (2.13a)$$

Sendo

$$I_{\text{exp}} = \frac{5FL^4}{384wE_c}, \text{ a inércia experimental para carregamento uniformemente}$$

distribuído;

I_c : a inércia admitindo painel composto;

I_{nc} : a inércia admitindo painel não composto;

w – deslocamento vertical do painel;

F – carregamento uniforme.

Devido à fissuração diferenciada ao longo do vão do painel, a inércia equivalente do mesmo foi determinada pela equação (2.13b)

$$I_c = \left(\frac{M_{cr}}{M_d} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_d} \right)^3 \right] I_{II} \quad (2.13b)$$

sendo M_{cr} o momento de fissuração, M_d o momento atuante para o nível de carregamento escolhido, I_g a inércia da seção bruta de concreto e I_{II} a inércia no estágio II puro.

Quanto aos deslizamentos relativos entre as placas, os autores observaram que o painel com os três mecanismos de transferência de cisalhamento (protótipo) apresentou pequenos deslocamentos, na ordem de 0,13 mm, para o regime elástico-linear. Com o surgimento da primeira fissura, a rigidez à flexão diminuiu significativamente e os deslizamentos começaram a aumentar com a aplicação de carga. O painel com blocos de concreto exibiu comportamento similar ao do protótipo. Já o painel com conector metálico (M-tie) apresentou deslizamentos maiores que o protótipo. Em ambas as extremidades do painel os deslizamentos atingiram 6,4 mm. Entretanto, este modelo de conector forneceu alguma resistência ao deslizamento relativo entre as placas, embora menor que a fornecida pelos blocos de concreto. O painel com apenas aderência entre o núcleo e as placas exibiu grandes valores de deslizamentos, na ordem de 13 mm. A aderência entre o núcleo e as placas forneceu pequena resistência ao deslizamento relativo horizontal, e esta resistência diminuiu rapidamente com o aumento da carga.

De acordo com os limites estabelecidos para painéis em concreto pré-moldado pelo ACI 533R (ACI, 1993), as flechas não devem ultrapassar o valor correspondente a $L/480$ nem 19 mm. O protótipo e o painel com blocos de concreto atenderam esta exigência, apresentando flecha na carga total em serviço de 10,9 mm e 12,7 mm, respectivamente. Já os painéis com conector metálico e aderência entre o núcleo e as placas exibiram flechas maiores que o permitido, isto é, 84 mm e 236 mm, respectivamente.

Os autores realizaram também uma análise pelo Método dos Elementos Finitos, determinando a distribuição de deformações ao longo da profundidade do painel. Observou-se a não existência de seção plana ao longo da profundidade do painel e que a distribuição destas deformações não era uniforme ao longo da largura do painel. Portanto,

os valores de deformação obtidos experimentalmente dependem da posição do extensômetro elétrico.

Quanto ao comportamento à flexão, os autores observaram fissuração precoce devido à flexão. Os autores apontaram como possível causa a redução do momento de inércia devido à ruptura das regiões com blocos de concreto ao cisalhamento horizontal causando o aumento das tensões de flexão no painel. O Método dos Elementos Finitos também forneceu uma explicação para as fissuras precoces devido à flexão, mostrando que nas regiões próximas aos blocos, as deformações foram altas, indicando concentração de tensões no concreto. Entretanto, algumas regiões adjacentes aos blocos de concreto apresentaram várias fissuras antes da primeira fissura devido à flexão. Logo a fissuração precoce não pode ser atribuída à concentração de tensões nas regiões próximas aos blocos de concreto.

Pessiki & Mlynarczyk (2003) concluíram que os blocos de concreto fornecem maior grau de composição que os conectores metálicos e que a aderência entre o núcleo e as placas. Entretanto, os blocos de concreto, mesmo fornecendo alto grau de composição, não forneceram seção plana no que se refere às deformações na seção transversal.

Fonseca (1994) realizou ensaios em duas séries de painéis, cada uma com três exemplares, sendo a única diferença entre os três exemplares a colocação de núcleo de poliestireno contínuo ou seccionado em duas camadas.

O painel consistia de um pré-painel de poliestireno expandido associado a telas eletrosoldadas. As placas eram moldadas com argamassa armada e a armadura era constituída de fios longitudinais de 2,8 mm, com espaçamento variável entre 50 mm e 100 mm, e fios transversais de 2,3 mm com espaçamento de 130 mm. Os fios que serviam de conector eram alinhados em três filas longitudinais com barras espaçadas a cada 130 mm. Os painéis foram submetidos a cargas concentradas, sendo seu ponto de aplicação variado entre os ensaios, obtendo-se diferentes valores para a relação entre momento fletor e força cortante.

Fonseca (1994) concluiu que o painel com núcleo íntegro apresentou maior resistência à fissuração que com núcleo seccionado, portanto o núcleo de poliestireno forneceu resistência ao cisalhamento horizontal. O autor observou que os conectores flexíveis utilizados nos painéis ensaiados não ofereceram contribuição significativa na resistência ao cisalhamento horizontal. Para painéis com núcleo contínuo houve boa aproximação com os valores obtidos pela teoria do concreto armado considerando seção

composta. Já nos painéis com núcleo seccionado a aproximação ocorreu quando se considerou no cálculo teórico seção não-composta.

2.3.1.1 - Determinação do momento fletor resistente de acordo com a NBR - 6118.

Neste item são mostradas as expressões para determinação do momento fletor resistente para painéis sanduíche obtidas a partir da teoria de flexão do concreto armado. São consideradas as hipóteses de linha neutra no núcleo ou na placa de concreto e a ruptura é admitida quando a deformação da seção transversal atinge algum dos domínios do concreto armado apresentados na NBR 6118 (ABNT, 2003). Admite-se que o material do núcleo não possui resistência mecânica, que não há deslizamento entre as placas e o núcleo, e que não há interferência dos conectores na resistência à flexão. Finalmente, admite-se que o painel é composto e que a seção transversal permanece plana após a deformação com apenas uma linha neutra.

a) Caso em que a linha neutra se encontra na face comprimida acima da armadura

Considerando a seção transversal de um painel sanduíche sujeito ao momento fletor, é feito o equilíbrio de forças entre os fios das telas tracionadas e o concreto comprimido. A Figura 2.26 mostra a seção transversal e os digramas de tensão e de deformação

Realizando-se o equilíbrio das forças normais têm-se:

$$R_{cc} = R_{sts} + R_{sti} \quad (2.14)$$

Sendo:

R_{cc} – resultante das tensões de compressão no concreto;

R_{sts} – resultante das tensões de tração da armadura da face superior;

R_{sti} – resultante das tensões de tração da armadura da face inferior;

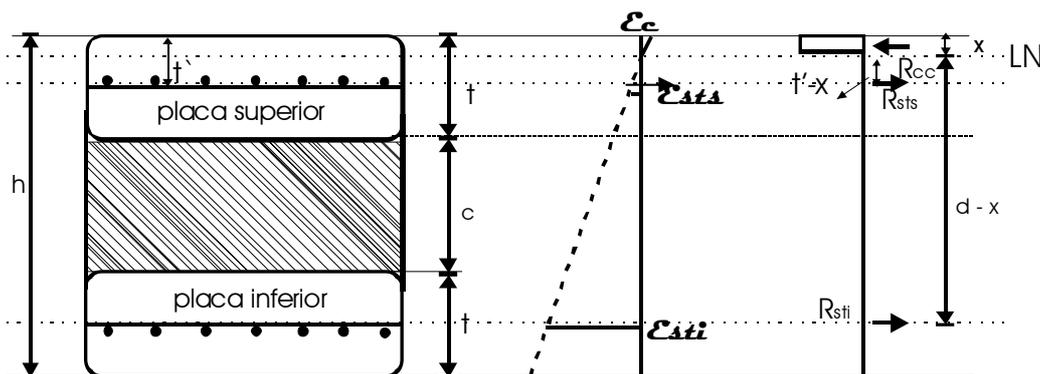


Figura 2.25 - Seção transversal e diagramas de tensão e de deformação para linha neutra acima da armadura.

O momento fletor resistente deve estar em equilíbrio com as forças internas.

Com base na Figura 2.26 têm-se:

$$\sum M = R_{cc} \left(d - \frac{0,8x}{2} \right) - R_{sts} (d - t') \quad (2.15)$$

As forças resultantes de tração e compressão valem:

$$\begin{aligned} R_{cc} &= 0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} 0,8xb \\ R_{sti} &= A_s \sigma_{ti} \\ R_{sts} &= A_s \sigma_{ts} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Pode-se reescrever o momento fletor, obtendo-se:

$$\sum M = 0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} 0,8xb(d - 0,4x) - A_s \sigma_{ts} (d - t') \quad (2.17)$$

Pelo diagrama de deformações apresentado Figura 2.26, escreve-se uma relação entre as deformações:

$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\varepsilon_{sts}}{t' - x} = \frac{\varepsilon_{sti}}{d - x} \quad (2.18)$$

b) Caso em que a linha neutra se encontra na face comprimida abaixo da armadura

A linha neutra está situada na placa superior, mas abaixo da armadura que neste caso se encontra comprimida, como se observa na Figura 2.27.

Realizando-se o equilíbrio das forças normais têm-se:

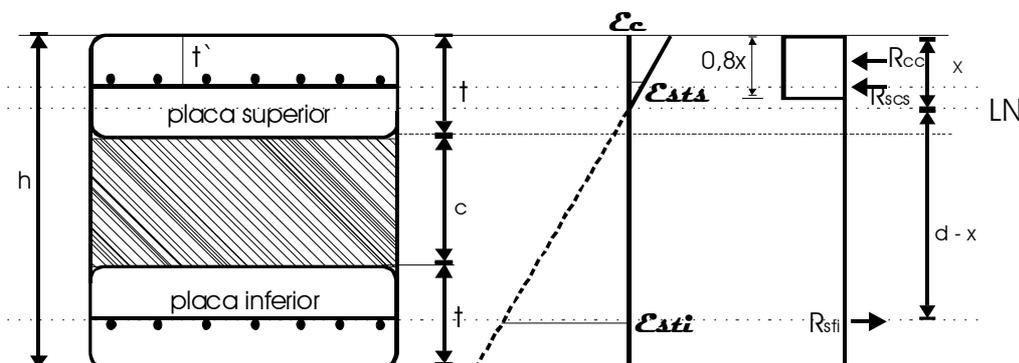


Figura 2.26 - Seção transversal e diagramas de tensão e de deformação para linha neutra abaixo da armadura.

$$R_{cc} + R_{scs} = R_{sti} \quad (2.19)$$

Sendo:

R_{cc} – resultante das tensões de compressão no concreto;

R_{scs} – resultante das tensões de compressão da armadura da face superior;

R_{sti} – resultante das tensões de tração da armadura da face inferior;

O momento fletor resistente deve estar em equilíbrio com as forças internas, com base na Figura 2.27 têm-se:

$$\Sigma M = R_{cc} \left(d - \frac{0,8x}{2} \right) + R_{scs} (d - t') \quad (2.20)$$

As forças resultantes de tração e compressão valem:

$$\begin{aligned} R_{cc} &= 0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} 0,8xb \\ R_{sti} &= A_s \sigma_{ti} \\ R_{scs} &= A_s \sigma_{ts} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Pode-se reescrever o momento fletor, obtendo-se:

$$\Sigma M = 0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} 0,8xb(d - 0,4x) + A_s \sigma_{cs} (d - t') \quad (2.22)$$

Pelo diagrama de deformações apresentado na Figura 2.27, escreve-se a relação entre as deformações:

$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\varepsilon_{sts}}{t' - x} = \frac{\varepsilon_{sti}}{d - x} \quad (2.23)$$

c) Caso em que a linha neutra se encontra no núcleo

A linha neutra está situada no núcleo, como se observa na Figura 2.28.

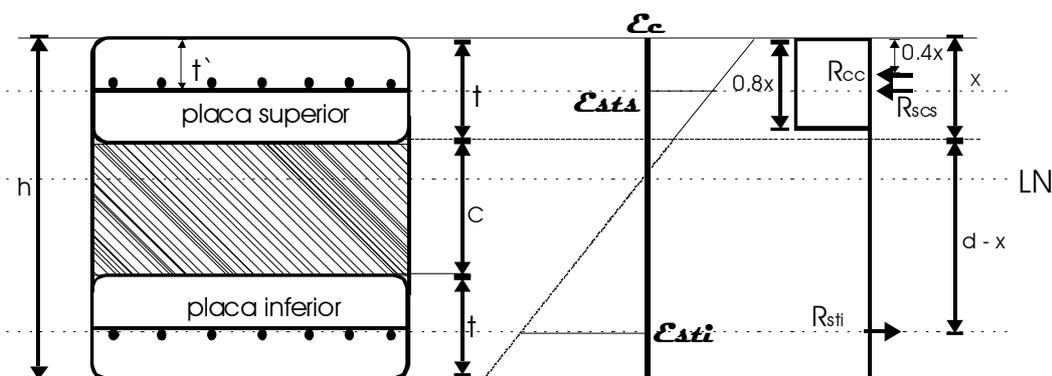


Figura 2.27 - Seção transversal e diagramas de tensão e de deformação para linha neutra no núcleo

Realizando-se o equilíbrio das forças normais têm-se:

$$R_{cc} + R_{scs} = R_{sti} \quad (2.24)$$

Sendo:

R_{cc} – resultante das tensões de compressão no concreto da placa;

R_{scs} – resultante das tensões de compressão da armadura da face superior;

R_{sti} – resultante das tensões de tração da armadura da face inferior;

O momento fletor resistente deve estar em equilíbrio com as forças internas.

Com base na Figura 2.28 têm-se:

$$\Sigma M = R_{cc} \left(d - \frac{0,8x}{2} \right) + R_{scs} (d - t') \quad (2.25)$$

As forças resultantes de tração e compressão valem:

$$\begin{aligned}
 R_{cc} &= 0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} 0,8xb \\
 R_{sti} &= A_s \sigma_{ti} \\
 R_{scs} &= A_s \sigma_{ts}
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

Pode-se reescrever o momento fletor, obtendo-se:

Para $0,8x \leq t$

$$\Sigma M = 0,68 f_{cd} bx(d - 0,4x) + A_s \sigma_{cs} (d - t') \tag{2.27a}$$

Para $0,8x > t$

$$\Sigma M = 0,85 f_{cd} bt(d - 0,5t) + A_s \sigma_{cs} (d - t') \tag{2.27b}$$

Pelo diagrama de deformações apresentado na Figura 2.28, escreve-se uma relação entre as deformações:

$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\varepsilon_{sts}}{x - t'} = \frac{\varepsilon_{sti}}{d - x} \tag{2.28}$$

2.3.1.2 Análise de Painéis Sanduíche Estruturais segundo H. G. Allen.

Neste item são apresentadas as expressões propostas por Allen (1969) para a análise do comportamento à flexão de painéis sanduíche. O painel é admitido em regime elástico linear e na formulação é considerada a influência do núcleo na rigidez e na resistência do painel.

As tensões e os deslocamentos de uma viga sanduíche podem ser encontrados, a princípio, através da teoria à flexão de uma viga simples. Assume-se que a seção transversal é plana e perpendicular ao eixo longitudinal de uma viga descarregada. Esta consideração conduz à relação entre o momento fletor e a curvatura:

$$\frac{M}{EI} = -\frac{1}{r} \tag{2.29}$$

A rigidez a flexão de uma viga sanduíche é dada pela soma das rigidezes das placas de concreto e do núcleo em relação ao centróide da seção transversal (Figura 2.29):

$$D = E_c \cdot \frac{bt^3}{6} + E_c \cdot \frac{bt4r^2}{2} + E_n \cdot \frac{bc^3}{12} \quad (2.30)$$

Onde,

E_c = módulo de elasticidade das placas,

E_n = módulo de elasticidade do núcleo,

$2r$ = distância entre a linha central da placa inferior e superior.

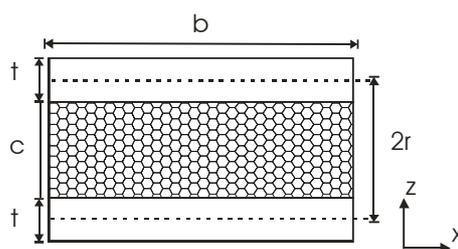


Figura 2.28 – Seção transversal de um painel sanduíche (ALLEN, 1969).

As considerações da teoria de flexão simples fornecem a expressão para a tensão de cisalhamento em uma viga homogênea a uma profundidade z , abaixo do centróide da seção transversal, conforme equação (2.31).

$$\tau = \frac{VS}{Ib} \quad (2.31)$$

Onde,

V = esforço cortante para a seção considerada,

I = momento de inércia da seção composta em relação ao centróide,

b = largura para a profundidade z ,

S = momento estático de área para a seção acima da fibra localizada à profundidade z .

Para uma seção sanduíche a equação (2.31) sofre uma modificação para que sejam levados em conta os módulos de elasticidade dos diferentes elementos conforme equação (2.32).

$$\tau = \frac{V}{Db} \sum(SE) \quad (2.32)$$

Onde $\Sigma(SE)$ representa a soma do produto de S e E para o núcleo e faces da seção. A equação (2.33) refere-se a esse somatório.

$$\Sigma(SE) = E_c \frac{bt2r}{2} + \frac{E_n b}{2} \left(\frac{c}{2} - z \right) \left(\frac{c}{2} + z \right) \quad (2.33)$$

Substituindo a equação (2.33) na equação (2.32) obtém-se a equação (2.34):

$$\tau = \frac{V}{D} \left\{ E_c \frac{t2r}{2} + \frac{E_n}{2} \left(\frac{c^2}{4} - z^2 \right) \right\} \quad (2.34)$$

A razão entre a máxima tensão ($z = 0$) e a mínima tensão de cisalhamento ($z = \pm c/2$) no núcleo é representada pela equação (2.35).

$$\frac{\tau_{\max}}{\tau_{\min}} = \left(1 + \frac{E_n}{E_c} \frac{1}{4} \frac{c^2}{t2r} \right) \quad (2.35)$$

Se o segundo termo desta expressão for menor que 1 %, têm-se a expressão (2.36):

$$4 \frac{E_c}{E_n} \frac{t}{c} \frac{2r}{c} > 100 \quad (2.36)$$

Conseqüentemente, se a condição (2.36) é satisfeita, a tensão de cisalhamento pode ser considerada constante ao longo da espessura do núcleo. Conclui-se, portanto, que quando o núcleo for fraco para fornecer uma contribuição significativa à rigidez à flexão do painel sanduíche, a tensão de cisalhamento pode ser considerada constante ao longo da profundidade do núcleo.

Para um núcleo flexível, é permitido considerar $E_n = 0$, logo a equação (2.34) pode ser reescrita conforme a equação (2.37).

$$\tau = \frac{V}{D} \frac{E_c t 2r}{2} \quad (2.37)$$

Considerando que a rigidez à flexão das faces seja desprezível (faces finas), pode-se negligenciar o primeiro e o terceiro termo da equação (2.30) resultando na equação (2.38).

$$D = E_c \cdot \frac{bt4r^2}{2} \quad (2.38)$$

Substituindo a equação (2.38) na equação (2.37) obtém-se a equação (2.39).

$$\tau = \frac{V}{b2r} \quad (2.39)$$

Em geral utiliza-se o termo “isolante antiplano” para o caso de núcleos fracos. Para este isolante idealizado considera-se que o módulo de elasticidade em planos paralelos às faces seja zero, mas o módulo de cisalhamento em planos perpendiculares às faces é finito. O termo “antiplano” implica em um estado de tensões onde $\sigma_x = \sigma_y = \tau_{xy} = 0$.

Alternativamente, se o equilíbrio de um elemento infinitesimal de um núcleo antiplano é considerado, observa-se que não há ação de tensões longitudinais sobre ele e a tensão de cisalhamento não varia ao longo da espessura do núcleo.

A deformação devido ao cisalhamento de uma viga com placas finas pode ser dada pela equação (2.40).

$$\frac{dw_2}{dx} = \gamma \frac{c}{2r} = \frac{Q}{Gbd} \frac{c}{2r} = \frac{Q}{AG} \quad (2.40)$$

Onde $A = b4r^2/c$ e o produto AG representa a rigidez ao cisalhamento do painel sanduíche.

Para iniciar o estudo da interação entre a rigidez à flexão das placas e a rigidez ao cisalhamento do núcleo, considera-se o painel com núcleo rígido ao cisalhamento e com carregamento distribuído. O deslocamento w_1 é fornecido pela teoria de flexão simples. Este deslocamento é relacionado com um momento M_1 e uma força de cisalhamento Q_1 , como mostra a equação (2.41).

$$-Q_1 = D \frac{d^3 w_1}{dx^3} = E(I - I_n) \frac{d^3 w_1}{dx^3} + EI_n \frac{d^3 w_1}{dx^3} \quad (2.41)$$

Sendo I o momento de inércia das duas placas em relação ao centróide da seção composta, conforme equação (2.42), e I_c o momento de inércia das duas placas em relação ao centróide da própria placa, como mostra a equação (2.43).

$$I = \frac{bt^3}{6} + \frac{bt4r^2}{2} \quad (2.42)$$

$$I_c = \frac{bt^3}{6} \quad (2.43)$$

O primeiro termo do lado direito da equação (2.41) representa o cisalhamento, supondo as placas submetidas a expansões e contrações uniformes sem flexão local. Sendo assim, a tensão de cisalhamento é constante ao longo da espessura do núcleo e diminui linearmente a zero ao longo da espessura das placas. Pode-se então, reescrever a equação (2.41) conforme a equação (2.44).

$$-Q_1 = -bd\tau + EI_f \frac{d^3 w_1}{dx^3} \quad (2.44)$$

Como um resultado da tensão de cisalhamento τ , o núcleo encontra-se submetido a uma deformação de cisalhamento $\gamma = \tau/G$ que corresponde a um deslocamento transversal adicional w_2 .

A relação entre o esforço de cisalhamento no núcleo e o deslocamento adicional pode ser representada pela equação (2.45).

$$\gamma = \frac{d}{c} \frac{dw_2}{dx} \quad (2.45)$$

Logo a tensão de cisalhamento pode ser fornecida pela equação (2.46).

$$\tau = \frac{d}{c} G \frac{dw_2}{dx} \quad (2.46)$$

Substituindo τ na equação (2.44) obtém-se a equação (2.47).

$$-Q_1 = -AG \frac{dw_2}{dx} + EI_c \frac{d^3 w_1}{dx^3} \quad (2.47)$$

Escrevendo a equação (2.38) em função de dw_2/dx e substituindo Q_1 por Dd^3w_1/dx^3 obtém-se a equação (2.48).

$$\frac{dw_2}{dx} = -\frac{D}{AG} \left(1 - \frac{I_c}{I}\right) \frac{d^3w_1}{dx^3} = +\frac{Q_1}{AG} \left(1 - \frac{I_c}{I}\right) \quad (2.48)$$

As placas participam deste deslocamento extra fletindo sobre o próprio eixo, portanto elas suportam uma força extra de cisalhamento Q_2 . Logo, pode-se dizer que a soma de Q_1 e Q_2 é a carga aplicada sobre a viga. O esforço cortante total pode ser representado pela equação (2.49).

$$Q = Q_1 + Q_2 = Q_1 - EI_c \frac{d^3w_2}{dx^3} \quad (2.49)$$

Substituindo a equação (2.48) na equação (2.49) obtém-se a equação (2.50).

$$\frac{d^2Q_1}{dx^2} - a^2Q_1 = -a^2Q \quad (2.50)$$

$$\text{Onde } a^2 = \frac{AG}{EI_c(1 - I_c/I)}$$

O valor a^2 representa a razão entre a rigidez ao cisalhamento do núcleo e a rigidez a flexão local das placas. A influência das placas na deformação ao cisalhamento do núcleo depende em parte deste valor, sendo o efeito menor quanto maior o valor de a^2 e maior o vão da peça.

Pode-se introduzir nas equações (2.47) e (2.48) o termo γ_0 que representa a deformação de cisalhamento quando $w_2/dx=0$, obtendo-se as equações (2.51) e (2.52).

$$-Q_1 = -AG \frac{dw_2}{dx} + EI_c \frac{d^3w_1}{dx^3} - bdG\gamma_0 \quad (2.51)$$

$$\frac{dw_2}{dx} = -\frac{D}{AG} \left(1 - \frac{I_c}{I}\right) \frac{d^3w_1}{dx^3} - \frac{c}{r} \gamma_0 = \frac{Q_1}{AG} \left(1 - \frac{I_c}{I}\right) - \frac{c}{r} \gamma_0 \quad (2.52)$$

Para carga concentrada em dois pontos, conforme a Figura 2.30, a equação do deslocamento do painel é:

$$w = \frac{PL_b}{2} \frac{x^2}{EI} + \frac{\beta_3 P}{a^3 EI_c} (1 - \cosh ax) \left(1 - \frac{I_c}{I}\right) \quad (2.53)$$

Sendo

$$\beta_3 = \frac{\sinh aL_c - \sinh a(L_b + L_c)}{\cosh a(L_a + L_b + L_c)} \quad (2.54)$$

O primeiro membro da equação (2.53) é semelhante à equação fornecida pela teoria de flexão para flecha quando a peça está submetida a duas cargas concentradas. Têm-se uma relação entre a carga e a distância entre o ponto de aplicação da carga e o apoio.

Bush & Wu (1998) utilizando as equações de Allen realizaram modificações no valor do módulo de rigidez do núcleo, considerando o efeito dos conectores tipo treliça. Segundo os autores, desde que os conectores sejam mais rígidos que o material isolante, estes podem contribuir para o aumento da rigidez no painel. Propõe-se o cálculo do módulo de cisalhamento do núcleo levando em conta o efeito dos conectores, recalculando o valor do módulo de cisalhamento (G), como mostra a Figura 2.31. Dessa forma as equações fornecidas pela Teoria de Allen são alteradas a partir da modificação do parâmetro a^2 .

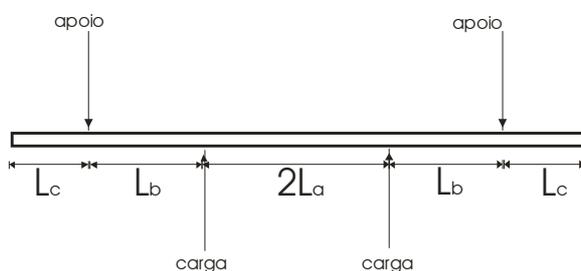


Figura 2.29 - Viga com carregamento em dois pontos (ALLEN, 1969).

A força desenvolvida por uma diagonal submetida a uma deformação de cisalhamento γ pode ser expressa pela equação (2.44).

$$F = A_{sc} E_{sc} \gamma \sin \theta \cos \theta \quad (2.55)$$

Sendo E_{sc} o módulo de elasticidade do aço da diagonal e A_{sc} a área da seção transversal da diagonal.

A componente da força é então multiplicada pelo número de linhas de conectores obtendo-se a força total, a qual é dividida pela área líquida do painel, obtendo-se uma tensão de cisalhamento equivalente na interface. Esta tensão é dividida pela deformação (γ), obtendo-se um módulo de cisalhamento equivalente para os conectores,

que é adicionado ao módulo de cisalhamento do núcleo. Obtém-se assim um módulo de cisalhamento efetivo dado pela equação (2.56).

$$G_{ef} = G_{nuc} + G_{con} = G_{nuc} + \frac{NE_{sc}A_{sc} \sin^2 \theta \cos \theta}{bS} \quad (2.56)$$

Sendo

N – número de linhas de conectores;

b – largura do painel;

S_1 – espaçamento entre diagonais consecutivas ao longo do comprimento do conector.

A validade desta aproximação é melhorada quando se aumenta o número de linhas de conectores, distribuindo-os ao longo do painel.

Pode-se, ainda, converter a tensão de cisalhamento em uma força horizontal resistida pelo núcleo e pelas diagonais da treliça em proporções relativas à rigidez ao cisalhamento de cada um. Logo a força resistida por uma diagonal da treliça pode ser obtida através da equação (2.57).

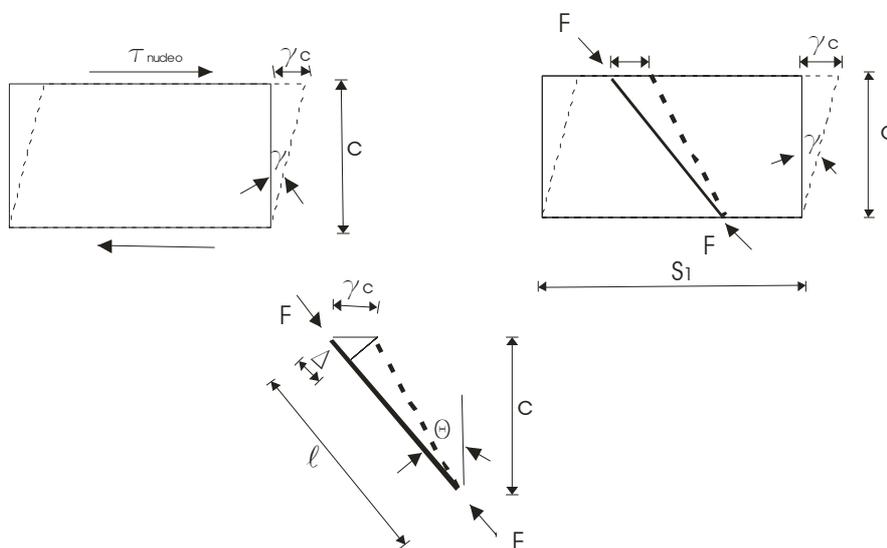


Figura 2.30 – Contribuição do conector na rigidez ao cisalhamento (BUSH & WU, 1998).

$$F = \frac{G_{con}}{G_{ef}} \frac{\tau b S_1}{N \sin \theta} \quad (2.57)$$

2.3.2 - Deslocamento horizontal relativo entre as placas

Considera-se que uma seção composta, interligada através de conectores com resistência suficiente para permitir a deformação como elemento único, não apresentará deslizamento relativo na interface entre a placa e o núcleo. Além disso haverá apenas uma linha neutra na seção transversal, classificando-se a interação como total. Por outro lado, quando ocorre certo deslizamento relativo entre as superfícies, com o aparecimento de mais de uma linha neutra, a interação é parcial. Neste caso, porém, as deformações não são independentes (DAVID, 2003).

Quando a resistência dos conectores é maior que a resistência isolada dos elementos que compõem a seção composta, estes não influenciam diretamente na resistência à flexão da peça estrutural. Entretanto, quando a resistência dos conectores for menor que a resistência da seção, esta será limitada pela resistência dos conectores. No primeiro caso, costuma-se dizer que o grau de composição é total, enquanto no segundo caso a composição é parcial. O grau de composição depende, fundamentalmente, da resistência dos conectores, enquanto o grau de interação depende da rigidez dos mesmos. Esta classificação é usual em vigas mistas formadas por viga metálica e laje de concreto.

A capacidade dos conectores flexíveis de se deformarem mais que os conectores rígidos praticamente não afeta o comportamento da viga em regime de utilização. Já no regime último ocorre redistribuição do fluxo de cisalhamento longitudinal entre os conectores. Observa-se que como um conector flexível sob carregamento continua a deformar-se com solicitações próximas a sua ruptura, os conectores seguintes absorvem maior força de cisalhamento até atingirem sua capacidade total. Há uma uniformização da resistência da conexão o que permite um espaçamento uniforme deste tipo de conector.

Nos painéis tipo sanduíche normalmente é analisado apenas o grau de composição, uma vez que não se admite deslizamento relativo entre as faces e o núcleo. Isto é particularmente verdade quando o conector atravessa todo o núcleo e está ligado em ambas as placas. No caso de painéis sem conector (apenas com núcleo isolante) ou quando este não está ligado às duas placas, pode ocorrer o deslizamento entre a placa e o núcleo. Em ambos os casos, o comportamento à flexão do painel pode se aproximar do comportamento de vigas mistas. Neste caso, as teorias aplicadas às vigas mistas podem ser aplicadas aos painéis com as devidas alterações.

Vale apenas ressaltar que é possível se conseguir um grau de composição total com interação parcial, isto é, com o aparecimento de duas linhas neutras. Neste caso, não há redução na resistência da seção composta, porém há um incremento nos deslocamentos verticais da viga quando comparado com uma viga com interação total (David, 2003).

A FIP (1982) e a NBR-9062 (ABNT, 1985) fornecem indicações para a verificação da resistência ao cisalhamento na interface de elementos fletidos de concreto, válidas apenas para elementos simplesmente apoiados, no estado último. Este procedimento é válido nas seguintes situações: seções compostas por elementos de concreto pré-moldado com superfície da interface plana e larga (Figura 2.32a); seções compostas por nervuras pré-moldadas e elementos de enchimento (Figura 2.32b); seções compostas por elementos pré-moldados tipo viga (Figura 2.32c).

A verificação é feita comparando-se a tensão de cisalhamento solicitante (τ_d) com a resistência ao cisalhamento de projeto da interface. A tensão solicitante de cálculo (ou tensão de referência) no estado limite último deve ser avaliada pela equação (2.65).

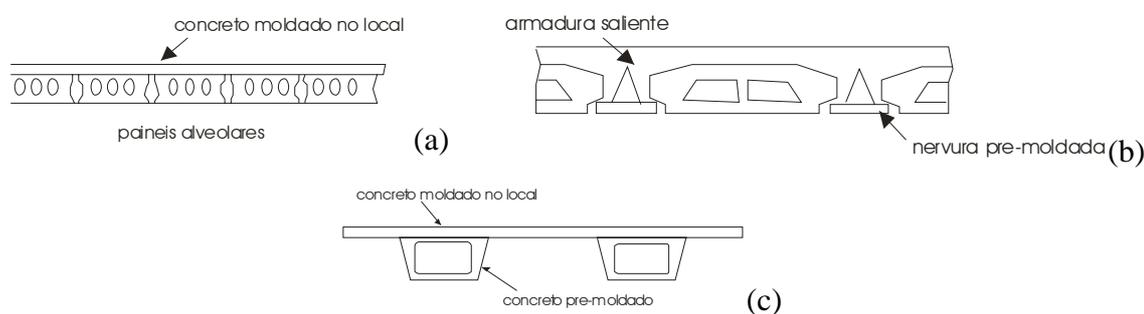


Figura 2.31 – Seções compostas (FIP, 1982 apud EL DEBS, 2000).

$$\tau_{sd} = \frac{V_d}{b_{int} d} \quad (2.65)$$

Esta expressão, em certos casos, fornece valores conservadores, especialmente quando a interface está situada na região comprimida da seção no estado limite último.

Para o dimensionamento de vigas compostas (situações de alta solicitação, ou seja, pequena largura de contato da interface), a resistência de cálculo da interface ao cisalhamento horizontal pode ser estimada por:

$$\tau_{Rd} = \beta_s \rho f_{yd} + \beta_c f_{td} < 0,31 f_{ck} \quad (2.66)$$

Essa expressão pode sofrer ainda modificações quando se considera a inclinação da armadura transversal em relação ao plano de cisalhamento, conforme equação (2.67).

$$\tau_{rd} = \beta_c f_{td} + \rho f_y (\beta_s \operatorname{sen} \alpha + \cos \alpha) \quad (2.67)$$

Sendo

$$\rho = \frac{A_{sw}}{sb_{int}} \geq 0,001 \quad (2.67)$$

ρ : taxa geométrica de armadura que atravessa a interface;

A_{sw} : área de armadura transversal à interface e totalmente ancorada nos elementos;

s : espaçamento da armadura transversal;

b_{int} : largura ou comprimento transversal à interface;

f_{yd} : resistência de cálculo do aço (MPa);

f_{ck} : resistência característica do concreto medida em corpos-de-prova cúbicos (MPa);

$f_{td} = 0,25\sqrt{f_{ck}}$: resistência de cálculo do concreto à tração (MPa);

β_s e β_c : coeficientes multiplicadores da resistência fornecida pela armadura e pela superfície de contato, obtidos do Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Coeficientes β_s e β_c da FIP (1982).

coeficiente	Categoria da superfície	
	1	2
β_s	0,60	0,90
β_c	0,20*	0,40

*Para superfícies lisas é recomendado $\beta_c=0,10$.

Sendo:

Categoria 1: Superfícies obtidas naturalmente durante o processo de produção dos elementos pré-moldados. A amplitude das irregularidades da superfície geralmente é menor que 1 mm de acordo com “ Swedish Standard SIS 81 20 05 ” (FIP, 1982 apud ARAÚJO, 1997).

Categoria 2: A superfície dos elementos pré-moldados é deliberadamente tornada rugosa durante o processo de fabricação (FIP, 1982 apud ARAÚJO, 1997).

Para o dimensionamento para baixa sollicitação de cisalhamento, a resistência de cálculo da interface ao cisalhamento horizontal pode ser estimada por:

$$\tau_{Rd} = \beta_c f_{td} \quad (2.68)$$

Ainda segundo a FIP (1982), na situação de baixa sollicitação com cargas repetitivas, os valores obtidos no cálculo devem ser reduzidos em 50 %.

2.4 Modelagem Numérica

São abordados neste item estudos realizados sobre modelos numéricos cujo objetivo é enriquecer a análise de resultados apresentados pelos autores, averiguando os resultados experimentais e formulações analíticas. Essas modelagens mostram-se viáveis ao auxiliar na compreensão do comportamento de painéis sanduíche.

Bush & Wu (1998) modelaram pelo Método dos Elementos Finitos painéis com núcleo de 50 mm de espessura, placas de 75 mm de espessura e dimensões de 2,44 m x 4,88 m, com duas e três linhas de conectores ao longo do comprimento do painel. Para a modelagem utilizaram elemento sólido de oito nós representando o material isolante e as placas e elementos de treliça representando as diagonais dos conectores.

Valores de tensões e deformações foram previstos por um modelo analítico simplificado e não divergiram em mais de 5 % dos valores fornecidos pelo M.E.F. Diferenças maiores foram observadas nos esforços na treliça. Para os painéis com duas linhas de treliça ao longo do comprimento, a solução aproximada forneceu valores 20% maiores que o M.E.F. Para o painel com três linhas essa diferença foi de 10%. Portanto, os autores concluíram que a consideração de se adotar a rigidez das treliças distribuída na largura do painel torna-se mais real quanto mais linhas de treliças existirem.

Alguns dos fatores que podem ter ocasionado as diferenças entre o M.E.F. e os valores experimentais são: (1) diferenças entre as propriedades do material assumidas e a real; (2) diferenças nas condições de contorno adotadas nos ensaios experimentais e na modelagem numérica; (3) a presença de caminhos indutores de cisalhamento no ensaio introduzidos durante a fabricação do painel, como, por exemplo, o fornecimento de alguma resistência ao redor das alças de içamento. Algumas considerações foram realizadas pelos autores com relação aos ensaios experimentais de Bush & Stine (1994) utilizados na

comparação para justificar essas diferenças: (1) o sistema de apoio adotado nos ensaios consistia em almofadas de elastômero o que não representa verdadeiros apoios de primeiro gênero; (2) o carregamento do painel foi aplicado em apenas uma das faces; (3) algumas restrições longitudinais aplicadas excêntricamente no painel podem ter ocorrido nos apoios. Levando em conta essas considerações, os autores modelaram painéis com três condições de restrição: roletes (apoio do primeiro gênero), pinos (apoio do segundo gênero) e apoios elásticos orientados longitudinalmente. Os apoios elásticos e os pinos apresentaram alterações mais consideráveis nos deslocamentos verticais e nas tensões previstas que o modelo apoiado por roletes. Portanto, os roletes mostraram-se mais apropriados nas modelagens realizadas.

Salmon & Einea (1995) desenvolveram equações visando fornecer as deflexões devido a mudanças diferenciais no volume para painéis parcialmente compostos com conectores do tipo treliça. Os resultados obtidos por estas equações foram comparados com uma análise pelo Método dos Elementos Finitos para testar sua eficiência.

Modelou-se um painel longo com comprimento de 10 m, largura de 3 m, espessura das placas e do núcleo de 80 mm. Utilizou-se um elemento de malha bidimensional. O tipo de elemento usado foi o *QM6 elements*. (Figura 2.33). A placa superior era sujeita a um aumento uniforme de temperatura de 25°C. Os conectores foram modelados utilizando elementos de treliça de dois nós posicionados de acordo com a condição 1 (Equações 2.7, 2.8 e 2.9). O deslocamento total no meio do vão pelo MEF foi de 17,3mm. Pelo método analítico esse valor foi de 17,4mm. O erro de 0,5% é devido à diferença entre o modelo de conector discreto usado no MEF e o modelo contínuo usado na análise analítica.

Os autores modelaram também um painel curto com comprimento de 2,44 m, largura de 1,22 m e espessura das placas e do núcleo de 76,2 mm. Neste caso o deslocamento total no meio do vão pelo método analítico foi de 0,424mm. Para a modelagem numérica o elemento usado foi o *QM6 elements*, sendo o carregamento, as condições de contorno e os conectores os mesmos na modelagem anterior. Pelo MEF o valor total do deslocamento no meio do vão foi de 0,419mm, fornecendo um erro de 1,2%. Salmon & Einea (1995) concluíram que para se obter as deflexões em painéis parcialmente compostos deve-se levar em conta o deslocamento relativo entre as placas devido ao cisalhamento. Por último, observaram que a análise de um modelo contínuo é compatível com a análise numérica quando se utiliza o modelo discreto.

Einea *et al* (1994) utilizaram um modelo linear para modelar painéis que foram submetidos ao cisalhamento direto e um modelo não-linear para representar o ensaio à flexão.

Para tensões abaixo do limite de proporcionalidade, elementos isoparamétricos no estado plano de tensões (Q4) foram usados para modelar as placas de concreto e o material isolante, sendo utilizado para cada placa duas camadas deste elemento. Para modelar as barras dos conectores e a armadura das placas, utilizaram-se elementos de barras (EB2), sendo que a armadura das placas no momento do escoamento era representada por elementos de barra no estado plástico e as barras do conector no estado elástico. Elementos de treliça (T2) foram usados para modelar apenas as condições de contorno, e uma combinação de elementos de interface (I2) e de controle (C2) foi usada para simular o concreto fissurado.

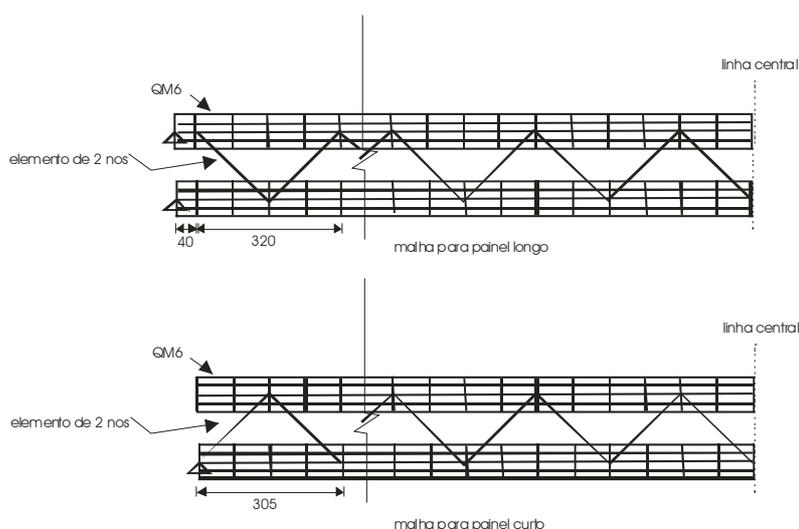


Figura 2.32 – Malha utilizada nos modelos numéricos utilizados por Salmon & Einea (1995).

Utilizou-se um modelo linear para representar o ensaio de cisalhamento direto porque os painéis não apresentaram fissuras durante o ensaio. Um modelo no estado plano de tensões foi utilizado porque a variação de tensões ao longo da largura do painel foi negligenciada. Duas camadas de elementos (Q4) foram usados em cada placa. Para o isolante utilizou-se o mesmo elemento desconsiderando-se o módulo de cisalhamento de modo a não considerar a contribuição do isolante na resistência ao cisalhamento do painel. As barras dos conectores consistiam de elementos (EB2). As condições de contorno representaram o comportamento do painel durante o ensaio, ou seja, elementos (T2)

modelaram o apoio vertical e uma das extremidades da estrutura utilizada para o ensaio (Figura 2.34).

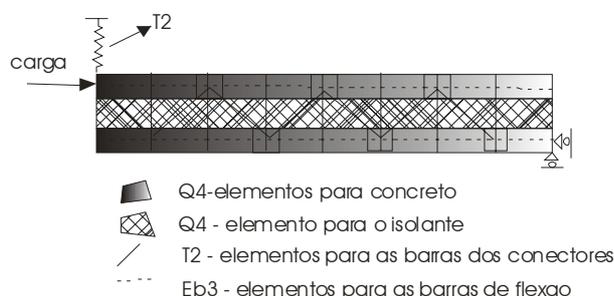


Figura 2.33 – Modelo linear utilizado por Einea *et al* (1994).

A curva força-deslocamento fornecida pelo M.E.F. foi significativamente mais rígida que a experimental. A razão desta diferença é que o modelo linear não considerou o deslizamento relativo do conector. Quanto aos valores das tensões nas diagonais dos conectores, estes se apresentaram próximos dos obtidos experimentalmente. As barras dos conectores contribuíram em 15 % na resistência à flexão.

A aderência entre o concreto e os conectores foi desconsiderada, logo o concreto forneceu apoio lateral para as partes dos conectores inseridos no concreto. Entretanto, conectores submetidos a tensões axiais apresentaram deslizamento relativo nas regiões inseridas no concreto. Este comportamento é simulado no modelo não-linear.

Para o modelo não-linear foram usadas quatro camadas de elemento Q4 na modelagem das placas para melhor precisão. A modelagem das barras de ancoragem dos conectores e da camada isolante foi similar à usada no modelo linear. As propriedades dos materiais são derivadas dos ensaios realizados com amostras representativas. As condições de contorno usadas no modelo simulado foram semelhantes às do modelo experimental.

Para modelar o concreto fissurado, nós duplos foram definidos em cada posição nodal. Um dos nós conecta-se no elemento Q4 pela esquerda enquanto o outro nó conecta-se no elemento Q4 pela direita. A conexão dos dois nós se dá através do uso simultâneo de dois elementos, o C2 e o I2 (Figura 2.35).

Os conectores plásticos reforçados por fibras (FRP) são diretamente conectados, ao longo dos cabos de aços, aos nós no centro das placas. Na interface concreto-isolante, entretanto, dois nós duplicados são definidos. Um dos nós é conectado

aos elementos Q4 que modelam a camada de concreto e o isolante, enquanto que o outro é conectado aos elementos EB2 que modelam as barras FRP.

O método numérico forneceu uma curva relacionando carga e deslocamento semelhante à obtida experimentalmente. A curva apresentou-se inicialmente linear para tensões de tração menores que o esforço designado por estes elementos, cuja rigidez cai a zero simulando a ruptura.

Concluiu-se, portanto, pela utilidade de modelos numéricos para uma melhor análise do comportamento dos painéis sanduíche, sendo que mesmo os modelos lineares mostraram ser eficientes em uma análise de resultados.

No Anexo B, encontra-se uma simulação numérica para painéis sanduíche com núcleo preenchido com argamassa com Vermiculita Expandida e conector tipo treliça, realizada para complementar a análise do comportamento dos painéis estudados.

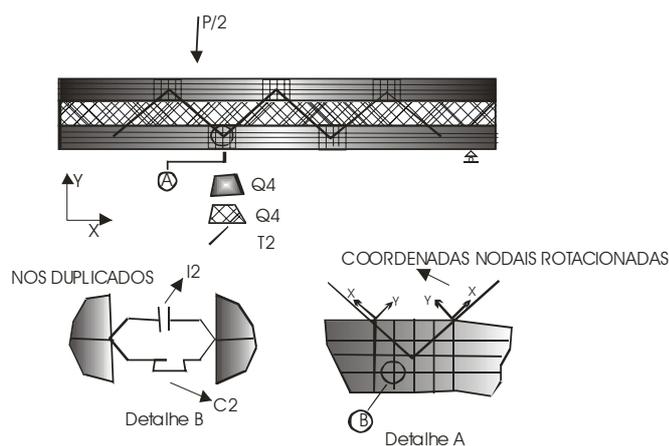


Figura 2.34 – Modelo não-linear utilizado por Einea *et al* (1994).

Capítulo 3 Estudo do traço para a argamassa de preenchimento

Foi realizado um estudo de traços de argamassas contendo na sua composição Vermiculita Expandida. Esta argamassa foi utilizada como material de enchimento no núcleo dos painéis tipo sanduíche, objeto de estudo nesta dissertação.

A princípio a Vermiculita Expandida seria usada nas placas também, mas os resultados para concreto com Vermiculita Expandida não se apresentaram satisfatórios conforme será mostrado neste capítulo.

Procura-se, um painel com resistência mecânica adequada, maior isolamento térmico e menor peso que painéis maciços de concreto convencional. Além disso, pretende-se desenvolver uma metodologia própria para o cálculo de traços e moldagem de concretos e argamassas com Vermiculita Expandida.

3.1 Traços de argamassa

3.1.1 Metodologia

Inicialmente foram caracterizados os materiais utilizados na pesquisa (cimento, areia e Vermiculita Expandida). Em seguida foram analisados vários traços de argamassa e, para cada um deles, foram determinadas suas propriedades no estado fresco (massa unitária, ar incorporado e índice de consistência) e no estado endurecido (resistências à tração por compressão diametral e à compressão, módulo de elasticidade, massa específica aparente seca e absorção). Também foi determinada a condutividade térmica de alguns traços de modo a verificar a influência da Vermiculita Expandida na isolação térmica de argamassas.

3.1.1.1 Caracterização dos materiais

Os materiais foram caracterizados com relação à massa específica, massa unitária e dimensão máxima característica (areia e Vermiculita Expandida).

O cimento Portland utilizado foi o CP-II F 32, com massa específica (γ_{cimento}) de 3,08 kg/dm³ determinada conforme a NBR-NM 0023/2001 (ABNT, 2001). Foram utilizados dois lotes de areia natural com dimensão máxima de 4,8 mm, módulo de finura igual a 2,11 e 2,35, conforme a NBR-NM 248/03 (ABNT, 2003), massa específica (γ_{areia}) de 2,66 e 2,62 kg/dm³ conforme NBR-NM 52/03 (ABNT, 2003) e massa unitária de 1,58 e 1,44 kg/dm³ conforme NBR- NM 52/03. A Vermiculita Expandida utilizada nos ensaios foi fornecida pela empresa Brasil Minérios com granulometria super fina. Após os ensaios, verificou-se que esta Vermiculita expandida apresentava massa específica (γ_{vermic}) de 2,413 kg/dm³ determinada conforme a NBR-NM 52/03 com ponto de ebulição de 60° C, massa unitária de 0,12 kg/dm³ conforme NBR-NM 52/03 e módulo de finura de 2,99 conforme NBR-NM 248/03. A água utilizada era limpa e captada da rede pública.

3.1.1.2 Traços de Argamassa

Foram estudados cinco traços de argamassa. O primeiro traço (traço 1) consistia de uma argamassa com areia e Vermiculita Expandida e alto teor de cimento. O segundo traço (traço 2) consistia de uma argamassa com um teor de cimento intermediário e o terceiro traço (traço 3) consistia de uma argamassa apenas com areia e um baixo teor de cimento. O traço 4, obtido a partir do traço 2, correspondia a um traço com um teor intermediário de cimento e, inicialmente, apenas com Vermiculita Expandida que foi parcialmente substituída por areia. O traço 5 foi uma repetição do traço 4, com fator água/cimento ligeiramente reduzido, para medidas de condutividade térmica. A Tabela 3.1 mostra as quantidades de material por metro cúbico dos cinco traços estudados.

O terceiro traço (traço 3) foi descartado quando da primeira tentativa de substituição da areia por Vermiculita Expandida por apresentar-se desagregado. Isto ocorreu, basicamente, pelo baixo teor de cimento do traço, fato confirmado pela

literatura que afirma que em concretos leves deve-se utilizar no mínimo 400 kg de cimento por metro cúbico (Neville, 1997). O traço 2, com 100% de Vermiculita Expandida, foi utilizado como referência para determinar as novas quantidades de materiais utilizados nos dois traços seguintes admitindo 30% e 50% de substituição da Vermiculita Expandida por areia. Optou-se por começar o estudo da substituição pela maior quantidade de Vermiculita Expandida (100%) de modo que a relação água/cimento fosse mantida constante nos demais traços. Além disso, verificou-se não ser possível utilizar como referência um traço sem Vermiculita Expandida e a partir daí realizar a substituição da areia, uma vez que a adição de Vermiculita Expandida sempre desagregava a mistura. Para os traços 4 e 5 seguiu-se a mesma metodologia do traço 2.

Tabela 3.1 – Resumo dos traços de argamassa estudados (consumo por m³).

Traço	Amostra	Cimento (kg)	Areia (kg)	Vermiculit. (kg)	Água (L)	Aditivo (kg)	a/c
1	E-11471	760,8	231,7	111,1	456,5	0,0	0,60
2	E-11472	435,0	0,0	169,0	574,0	0,0	1,32
	E-11601-01	435,0	155,0	175,0	536,0	1,5	1,23
	E-11610-02	435,0	395,0	189,0	585,0	1,5	1,34
3	E-11571	234,7	1457,2	0,0	283,6	0,0	1,21
4	E-11673	403,7	0,0	157,8	533,6	0,0	1,32
	E-11898	403,8	0,0	179,1	533,6	0,0	1,32
	E-11675	365,4	366,2	115,5	483,0	0,0	1,32
	E-11676	361,6	507,1	83,1	478,0	0,0	1,32
	E-11677	379,8	1011,8	0,0	496,3	0,0	1,32
5	E-11899	474,4	229,6	166,7	523,1	0,0	1,10
	E-11748	474,5	231,6	166,7	526,1	0,0	1,11
	E-11749	430,9	274,4	154,2	476,3	0,0	1,11
	E-11750	374,2	441,8	106,4	413,6	0,0	1,11
	E-11751	279,2	1403,7	0,0	305,7	0,0	1,11

Obs: Os números das amostras são do controle interno de Furnas.

As porcentagens de areia e Vermiculita Expandida do volume de agregado miúdo podem ser calculadas a partir das Equações 3.1.

$$\text{Vol}_{\text{AGR_TOTAL}} = \text{Vol}_{\text{AREIA}} + \text{Vol}_{\text{VERMIC}} = \frac{P_{\text{AREIA}}}{\gamma_{\text{AREIA}}} + \frac{P_{\text{VERMIC}}}{\gamma_{\text{vermic,ef}}}$$

$$\begin{aligned} \%AREIA &= \frac{Vol_{AREIA}}{Vol_{AGR_TOTAL}} \\ \%VERMICULITA &= \frac{Vol_{VERMIC}}{Vol_{AGR_TOTAL}} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Sendo $\gamma_{vermic,ef}$ a massa específica da Vermiculita Expandida considerada parcialmente preenchida pela água de amassamento da mistura. Esta massa específica foi calculada para o traço com 100% de Vermiculita Expandida e admitida constante nos demais traços com areia. Dessa forma, era possível estimar a substituição de Vermiculita Expandida por areia nos demais traços e, assim, determinar as quantidades de material. Posteriormente, verificou-se que esta massa específica variava ligeiramente com a substituição, sendo a porcentagem de substituição recalculada. Os valores constantes na Tabela 3.1 já levam em consideração esta variação e foram ajustados para produzir um metro cúbico de argamassa.

3.1.2 Procedimento de dosagem da argamassa

Os equipamentos utilizados no estudo dos traços de argamassa foram: paquímetro, argamassadeira, espátula, balança, equipamento de flow test e betoneira.

Inicialmente era realizada a correção da quantidade de areia e água da mistura de acordo com a Equação 3.2, de modo a considerar o agregado em estado de superfície saturada seca. O fator de correção é dado por:

$$FC = \frac{h' - a_b}{100} \times P_{SSS} \quad (3.2)$$

onde:

P_{SSS} = Quantidade de agregado miúdo no estado de superfície saturada seca;

h' = umidade (%);

a_b = Absorção (%).

Uma das dificuldades de dosagens de concretos leves está na correta estimativa do volume de concreto gerado na mistura. Esta dificuldade surge, basicamente, pelo fato de parte da água de amassamento ser absorvida pelos poros do

agregado. Este problema é resolvido, no caso de concretos normais, levando o agregado ao estado de superfície saturada seca. Este procedimento, entretanto, nem sempre é possível de ser realizado com os agregados leves e, em especial, com a Vermiculita Expandida. Dessa forma, a correta quantidade de materiais por metro cúbico de concreto leve somente é determinada de posse da massa específica do concreto no estado fresco. Sendo assim, nas argamassas com Vermiculita Expandida, antes de se produzir o volume final com o qual seriam moldados os corpos-de-prova, foi produzida uma argamassa com volume menor de modo a se determinar a massa específica no estado fresco e o teor de ar incorporado.

A ordem de colocação dos materiais na argamassadeira para as argamassas com Vermiculita Expandida foi: cimento e um terço da água com aditivo dissolvido, misturados por 1 minuto; areia, metade da Vermiculita Expandida e outro terço da água, misturados por 2 minutos; restante da Vermiculita Expandida e da água, misturados por 3 minutos. Esta ordem de colocação foi adotada para evitar que a Vermiculita Expandida, e mesmo, a areia absorvessem o aditivo e a água da mistura. Também para evitar a formação de “pelotas”, a Vermiculita Expandida foi acrescentada em partes.

Após 5 minutos de mistura, retirou-se uma amostra da argamassa para verificar a consistência conforme a NBR – 9778/87 (ABNT, 1987), ensaio também conhecido como “flow test” (Figura 3.1).

No caso do segundo traço, com 100% de Vermiculita Expandida, (Tabela 3.1) a quantidade de Vermiculita Expandida do traço foi obtida empiricamente de modo a se obter uma argamassa com índice de consistência em torno de 180 mm. Dessa forma, quando o *flow* encontrado foi menor que o desejado acrescentou-se à mistura uma maior quantidade de aditivo em relação ao peso de cimento equivalente, sendo novamente misturada por mais dois minutos. A maior quantidade de aditivo necessária nas argamassas com Vermiculita Expandida é devido à perda de eficiência do aditivo pela absorção da Vermiculita. Mediu-se, então, o índice de consistência e repetiu-se o processo até ser obtida a consistência desejada. Quando o *flow* encontrado foi maior que o desejado, acrescentou-se certa quantidade de Vermiculita Expandida, medindo-se novamente o índice de consistência.



Figura 3.1 – Determinação do índice de consistência conforme a NBR-13276/02 (ABNT, 2002)

Após alcançada a consistência desejada, foram realizados os ensaios de massa específica no concreto fresco ($\gamma_{conc \text{ fresco}}$) e teor de ar incorporado de modo a ajustar o traço para que as quantidades de materiais corresponderem a um metro cúbico. Este ajuste era realizado dividindo as quantidades de materiais empregadas na dosagem pelo volume real da mistura (Equação 3.3a).

No volume real da mistura estão incluídos além dos volumes de cimento, areia, água e ar incorporado à mistura, também o volume de Vermiculita Expandida com seus poros parcialmente preenchidos com água. Sendo assim, é possível, empregando a Equação 3.3b, calcular uma massa específica efetiva de valor intermediário entre a massa específica real e a massa unitária da Vermiculita Expandida que pode ser empregada na previsão do volume final dos traços ($\gamma_{vermic,f}$). O sentido dessa massa específica está no fato que a Vermiculita Expandida adicionada estava seca ao ar, ou seja, não estava saturada, e que durante a mistura da argamassa os seus poros não foram totalmente preenchidos com água. Esse preenchimento é tanto mais dificultado quanto menor for o volume de nata (cimento e água) disponível, o qual, por apresentar maior viscosidade, acaba selando os poros do agregado. Dessa forma, essa massa específica representa o peso unitário da Vermiculita Expandida mais o peso da água absorvida durante a mistura.

$$Vol_{real} = \frac{P_{cim} + P_{agua} + P_{areia} + P_{Vermiculita} + P_{aditivo}}{\gamma_{conc \text{ fresco}}} \quad (3.3a)$$

$$Vol_{real} = \frac{P_{cim}}{\gamma_{cim}} + P_{\acute{a}gua} + \frac{P_{areia}}{\gamma_{areia}} + \frac{P_{vermic}}{\gamma_{vermic,f}} + Vol_{ar_incrp_medido} + \frac{P_{aditivo}}{\gamma_{aditivo}} \quad (3.3b)$$

Para o quarto e quinto traço utilizou-se como traço referência a mistura com 100% de Vermiculita Expandida, pelos motivos já apresentados. A metodologia para a determinação desses traços foi a mesma empregada no segundo traço. Entretanto, para o quinto traço, com ligeira redução do fator a/c, não foi possível obter o traço com 100% de Vermiculita Expandida, uma vez que este se apresentava desagregado. Determinados os traços com 100% de Vermiculita Expandida, procedeu-se a substituição de Vermiculita Expandida por areia conforme detalhado no item anterior (Equação 3.1). Em cada um desses traços segue-se o procedimento de dosagem descrito neste item, sendo a quantidades de material também corrigidas para um metro cúbico de argamassa.

3.1.3 Ensaios realizados com argamassa no estado fresco

Massa específica aparente

Para se obter o valor da massa específica utilizou-se a Equação (3.5):

$$\gamma_{ap} = \frac{M_{TARA+ARG} - M_{TARA}}{Vol_{TARA}} \quad (3.5)$$

Onde:

γ_{ap} - massa específica;

$M_{TARA+ARG}$ - massa da tara e da argamassa;

M_{TARA} - massa da tara;

Vol_{TARA} - volume da tara.

Teor de ar incorporado

Para a medição do ar incorporado na argamassa utilizou-se aparelho medidor de ar incorporado pelo método pressiométrico, segundo a NB-NM 47:2002 (ABNT, 2002).

Índice de consistência

O índice de consistência foi medido conforme NBR-13276/02 (ABNT, 2002).

3.1.4 Ensaios realizados com argamassa no estado endurecido

Resistência à compressão axial

A resistência à compressão foi determinada de acordo com a NBR-5739/94 (ABNT, 1994). Foram utilizados três corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm para ensaio de resistência à compressão aos 28 dias. Este ensaio foi realizado para todos os traços. Em alguns traços também foram realizados ensaios aos sete e 14 dias. Os corpos-de-prova ensaiados à compressão receberam um capeamento a base de enxofre, pozolana e sulfex.

Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral foi determinada de acordo com a NBR-7222/94 (ABNT, 1994). Foram utilizados três corpos-de-prova cilíndricos para ensaio de resistência à tração aos 28 dias.

Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade foi determinado de acordo com a NBR-8522/03 (ABNT, 2003). O ensaio de módulo de deformação é um ensaio não destrutivo, sendo então possível realizá-lo com o mesmo corpo-de-prova a ser utilizado para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Estes ensaios foram realizados aos 28 dias para o primeiro e segundo traço (com 100% de Vermiculita Expandida), terceiro e quarto.

Massa específica e absorção

A massa específica aparente seca e a absorção foram determinadas de acordo a NBR-9778/87 (ABNT, 1987). Foram utilizados três corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm para ensaio de absorção e massa específica aparente aos 28 dias. Estes ensaios foram realizados para o primeiro e segundo traço (com 100% de Vermiculita Expandida) e quarto.

Condutividade Térmica

A condutividade térmica foi determinada conforme a NBR-12820/93 (ABNT, 1993) (Figura 3.2). Foram utilizados dois corpos-de-prova de 20 cm x 40 cm para o ensaio de condutividade que foi realizado após oito dias da moldagem. Este ensaio foi realizado para o primeiro e segundo traço (com 100% de Vermiculita Expandida), terceiro e quinto.



Figura 3.2 – Ensaio de condutividade.

3.2 Traços de Concreto

Foram moldados seis traços de concreto para a análise da influência da Vermiculita Expandida. As quantidades de material por metro cúbico para as seis alternativas são mostradas na Tabela 3.2. Os traços de 1 a 4 eram de referência e não foi adicionado Vermiculita Expandida aos mesmos. Nestes traços foram estudados vários teores de argamassa, calculados pela Equação 3.6:

$$\text{teor de argamassa} = \frac{1 + a_1}{1 + a_2} \quad (3.6)$$

Onde:

a_1 = relação areia/cimento;

a_2 = relação (areia + brita)/cimento.

Tabela 3.2 – Traços de concreto estudados (consumo por m³)

Traço	Amostr.	Ciment. (kg)	Sílica (kg)	Areia (kg)	Vermiculit. (kg)	Brita (kg)	Água (L)	Aditivo (kg)	a/c	Teor de argamassa
1	E-11435	379,3	24,0	808,7	0,0	950,0	190,7	1,3	0,48	56%
2	E-11436	326,9	12,0	682,8	0,0	1200,4	176,2	2,8	0,54	46%
3	E-11469	363,9	22,2	756,1	0,0	1074,8	189,4	2,4	0,52	51%
4	E-11470	353,5	21,7	841,3	0,0	941,4	188,3	2,3	0,53	56%
5	E-11678	461,2	0,0	0,0	88,4	1152,0	368,2	0,0	0,80	32%
	E-11679	457,2	0,0	70,5	61,4	1142,2	365,1	0,0	0,80	34%
	E-11680	427,2	0,0	183,9	69,1	1067,1	340,5	0,0	0,80	39%
	E-11681	400,8	0,0	339,1	54,7	1001,4	319,5	0,0	0,80	44%
	E-11682	275,2	0,0	1017,9	0,0	687,4	219,3	0,2	0,80	65%
6	E-11741	380,4	24,1	828,1	0,0	942,7	185,2	4,0	0,50	57%
	E-11746	357,3	22,9	543,7	88,3	885,6	285,3	15,1	0,80	57%
	E-11747	341,5	21,5	646,4	48,3	847,0	271,9	7,2	0,80	56%
	E-11752	468,7	19,0	300,8	114,0	690,0	380,0	9,5	0,80	57%

O traço 5 foi obtido seguindo a mesma metodologia da argamassa, ou seja, um traço com 100% de Vermiculita Expandida ajustado empiricamente até atingir um slump de aproximadamente 80 mm. A partir daí foram realizadas as substituições de Vermiculita Expandida por areia, em volume. O traço 6 era idêntico ao traço 1 ao qual foi adicionado Vermiculita Expandida. Apesar de usar-se o termo substituição para o traço 6, o que se realizou para produzir concreto com menor massa específica foram adições de Vermiculita Expandida. Após a moldagem dos corpos-de-prova, as quantidades de material foram ajustadas para um volume de um metro cúbico o que equivale a uma substituição e não a uma adição.

No traço 5 não foi possível moldar o traço com 0% de Vermiculita Expandida e fator a/c = 0,8 por este apresentar-se muito fluido. Neste caso, o traço foi ajustado adicionando areia até atingir um slump de aproximadamente 80 mm, o que resultou num aumento significativo do teor de argamassa quando comparado aos traços com Vermiculita Expandida.

No traço 6, a adição de Vermiculita Expandida com fator a/c = 0,5 não permitiu a homogeneização da mistura. Sendo assim, seu fator a/c foi aumentado para 0,8, o que mostra a elevada absorção da água de amassamento pela Vermiculita Expandida.

Obs: Os números das amostras são do controle interno de Furnas

3.2.1. Procedimento de dosagem

Os equipamentos utilizados no estudo dos traços de concreto foram: paquímetro, espátula, balança e Betoneira.

Para as dosagens das seis alternativas a ordem de colocação dos materiais na betoneira foi: brita, cimento, sílica e um terço da água com aditivo dissolvido, misturados por 2 minutos; metade da areia, metade da Vermiculita Expandida e outro terço da água, misturados por mais 2 minutos; o restante da areia, da Vermiculita Expandida e da água, misturados por mais 3min. Esta ordem de colocação foi adotada para evitar que a Vermiculita Expandida, e mesmo a areia, absorvessem o aditivo e a água da mistura. Também para evitar a formação de “pelotas”, a Vermiculita Expandida e a areia foram acrescentadas em partes.

Em cada moldagem foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone adicionando aditivo quando necessário.

3.2.2. Ensaio realizados com concreto no estado fresco e endurecido.

No estado fresco foram realizados os mesmos ensaios feitos na argamassa, com exceção do índice de consistência, que foi substituído pelo ensaio do tronco de cone conforme a NBR-NM 67/1998 (ABNT, 1998).

No estado endurecido, foram realizados os seguintes ensaios:

Resistência à compressão axial

Foram moldados 03 corpos-de-prova de 15 cm x 30 cm para ensaio de resistência à compressão aos 28 dias. Este ensaio foi realizado para todos os traços. Em alguns traços também foram realizados ensaios aos 7 e 14 dias. Os corpos-de-prova ensaiados à compressão receberam um capeamento a base de enxofre, pozolana e sulfix.

Resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade

Foram moldados 03 corpos-de-prova de 15 cm x 30 cm para ensaio de resistência à tração por compressão diametral e Módulo de deformação aos 28 dias. O

ensaio de módulo de deformação é um ensaio não destrutivo, sendo então possível realizá-lo com o mesmo corpo-de-prova a ser utilizado para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Estes ensaios foram realizados para os traços 1, 2, 3 e 4.

Massa específica e absorção

Foram moldados 03 corpos-de-prova de 15 cm x 30 cm para ensaio de absorção e massa específica aparente aos 28 dias. Estes ensaios foram realizados para os traços 1, 2, 3 e 4.

Condutividade Térmica

Foram moldados 02 corpos-de-prova de 20 cm x 40 cm para ensaio de condutividade térmica após oito dias. Foram analisados os traços 1, 2, 3 e 4;

3.3 Resultados e discussões

3.3.1. Argamassa

Neste item são apresentados os resultados referentes aos estudos realizados com as argamassas. Os resultados foram divididos em ensaios com a argamassa no estado fresco e no estado endurecido.

3.3.1.1 Massa Específica fictícia da Vermiculita Expandida

Uma das maiores dificuldades na dosagem de concretos e argamassas com agregado leve é a alta absorção de água pelo agregado. Normalmente este problema é resolvido saturando o agregado antes da mistura. No caso da Vermiculita, que possui elevada taxa de absorção de água, tentou-se equacionar o problema da dosagem adotando uma massa específica efetiva que leva em conta a absorção de parte da água da mistura pela Vermiculita Expandida. Esta massa específica foi obtida da Equação

(3.17b) a partir do conhecimento do peso dos materiais, do volume de ar incorporado à mistura e de sua massa específica. De posse deste valor, foi possível determinar a porcentagem de Vermiculita em relação ao volume total de agregado miúdo. À seguir é exemplificado o cálculo da massa específica fictícia para o traço 4 (amostra E-11673).

$$Vol_{real} = \frac{P_{cim} + P_{agua} + P_{areia} + P_{Vermiculita} + P_{aditivo}}{\gamma_{conc\ fresco}} \quad (3.17a)$$

$$Vol_{real} = \frac{P_{cim}}{\gamma_{cim}} + P_{agua} + \frac{P_{areia}}{\gamma_{areia}} + \frac{P_{vermic}}{\gamma_{vermic,f}} + Vol_{ar_incrp_medido} + \frac{P_{aditivo}}{\gamma_{aditivo}} \quad (3.17b)$$

As massas específicas efetiva das argamassas ($\gamma_{vermic,f}$) e as respectivas porcentagens de Vermiculita Expandida são apresentadas na Tabela 3.3. A relação entre $\gamma_{vermic,f}$ e o volume de nata de cimento, assim como a relação entre essa massa específica e a soma dos pesos de cimento e água é mostrada na Figura 3.3. Também é mostrada na Figura 3.4 a relação entre o consumo de cimento e as diferentes porcentagens de Vermiculita Expandida.

Observa-se da Figura 3.3 que há uma tendência de aumento da massa específica efetiva da Vermiculita Expandida com o aumento do volume de nata, ou seja, com o aumento de consumo de cimento mais água. Não foi possível obter uma boa correlação estatística entre essas variáveis, porém esta tendência pode ser explicada pelo fato da maior disponibilidade de água na mistura resultar numa maior absorção da Vermiculita Expandida.

Tabela 3.3 – Argamassa: massa específica da Vermiculita Expandida.

Traço	Amostra	vermiculita (%)	$\gamma_{vermic,f}$ (kg/m ³)	Vnata (%)
1	E-11471	46	1,49	70
2	E-11472	100	1,00	71
	E-11601-01	70	1,27	68
	E-11610-02	50	1,34	73
4	E-11673	100	0,84	66
	E-11898	100	1,03	67
	E-11675	50	0,82	60
	E-11676	35	0,80	60
5	E-11899	60	1,28	68
	E-11748	56	1,47	68
	E-11749	59	1,03	62
	E-11750	50	0,64	53

Obs: Os números das amostras são do controle interno de Furnas

Da figura 3.4 observa-se que as argamassas com Vermiculita Expandida apresentam consumo de cimento próximo de 400 kg/m³, o que está de acordo com a literatura que recomenda este valor com consumo mínimo em concretos e argamassas leves (Neville, 1997). Os maiores consumos no traço 5 são explicados pelo menor fator água /cimento da mistura.

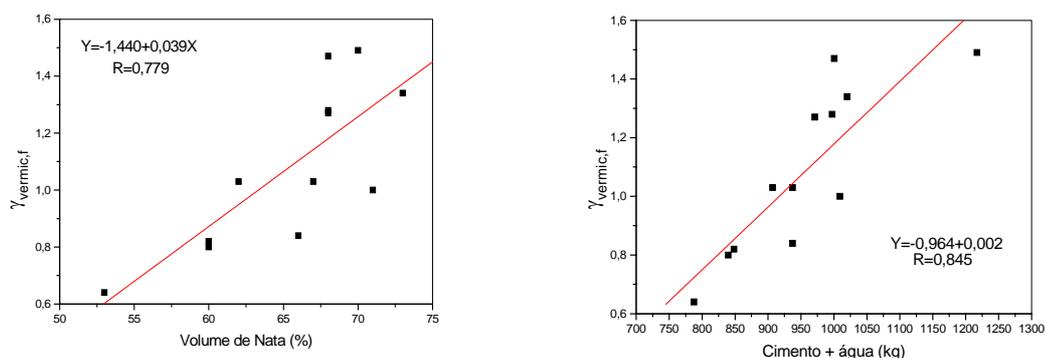


Figura 3.3 - Relação entre a massa específica efetiva da Vermiculita com o volume de Nata de Cimento e com os pesos de cimento e água.

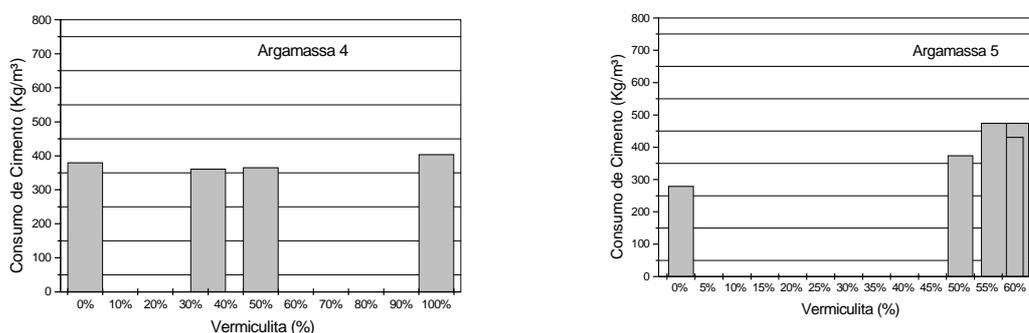


Figura 3.4 – Consumo de Cimento x Porcentagem de Vermiculita

3.3.1.2 Ensaio da argamassa no estado fresco

Os resultados do ar incorporado, da massa unitária e do índice de consistência para as 5 alternativas de argamassa com diferentes porcentagens de Vermiculita Expandida são mostrados na Tabela 3.4 e nas Figuras 3.5 a 3.6.

Observa-se, em todos os traços, um aumento do volume de ar incorporado com o aumento da porcentagem de Vermiculita no traço. Isto se deve ao aumento da

quantidade de vazios proporcionado pela Vermiculita. No traço 4 este aumento foi da ordem de 180%, com um limite máximo de ar incorporado próximo de 15%, quando todo o agregado miúdo foi substituído pela Vermiculita Expandida.

Com relação ao índice de Consistência, observou-se uma redução na trabalhabilidade da mistura com o aumento da porcentagem de Vermiculita, mantido o fator água/cimento constante. Esta redução chega a 50% quando todo o agregado miúdo é substituído pela Vermiculita Expandida. Este comportamento era esperado, uma vez que o aumento da quantidade de Vermiculita resulta numa maior absorção pela mesma da água da mistura. No traço 5, com menor fator a/c, foi observada uma menor redução da trabalhabilidade da mistura pela adição de Vermiculita.

Tabela 3.4 – Resultados da Argamassa no estado fresco.

Traço	Amostra	Vermiculita (%)	Ar incorporad. (%)	Índice de consist. (mm)	Massa unitária (kg/m ³)
1	E-11471	46	13,5	258,0	1560
2	E-11472	100	14,0	166,0	1146
	E-11601-01	70	12,0	250,0	1311
	E-11610-02	50	10,0	211,0	1425
3	E-11571	0	5,2	238,0	1976
4	E-11673	100	14,8	167,5	1095
	E-11898	100	14,8	201,5	1346
	E-11675	50	12,0	295,5	1335
	E-11676	35	11,0	305,5	1435
	E-11677	0	5,2	321,5	1967
5	E-11899	60	10,5	178,0	1346
	E-11748	56	11,8	238,0	1399
	E-11749	59	13,0	255,0	1336
	E-11750	50	13,0	237,0	1336
	E-11751	0	9,0	235,0	1969

Obs: Os números das amostras são do controle interno de Furnas

Observa-se da Figura 3.7 uma redução na massa unitária das argamassas com o aumento da porcentagem de Vermiculita. Esta redução é mais acentuada pela incorporação inicial da Vermiculita, sendo menos sensível com o aumento do volume da Vermiculita. Isto indica que baixos volumes de Vermiculita ($\approx 30\%$) já são suficientes para proporcionar uma redução sensível na massa unitária ($\approx 27\%$). Quando se compara uma argamassa com 100% de Vermiculita com outra sem Vermiculita, observa-se uma redução de 44% na massa unitária.

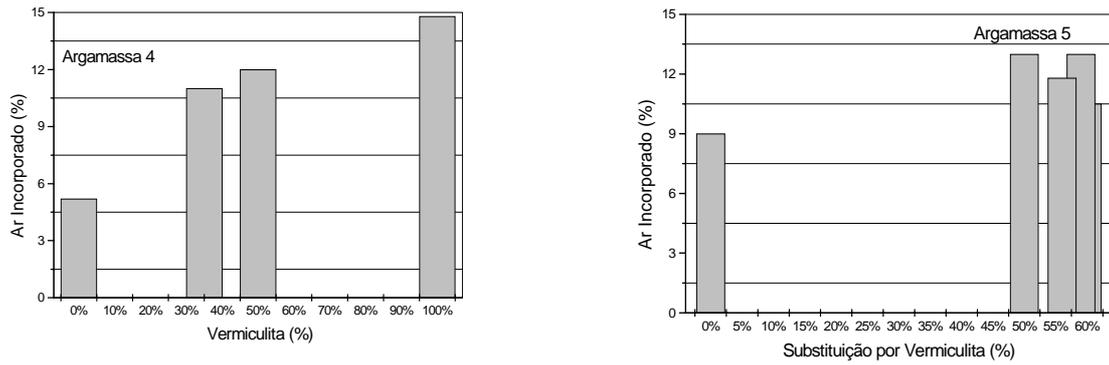


Figura 3.5 – Ar incorporado x Porcentagem de Vermiculita nos traços de argamassa

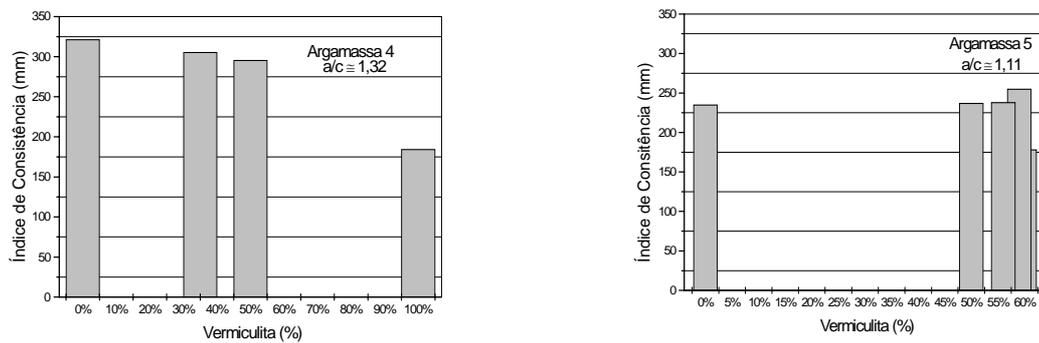


Figura 3.6 – Índice de Consistência x Porcentagem de Vermiculita nos traços de argamassa

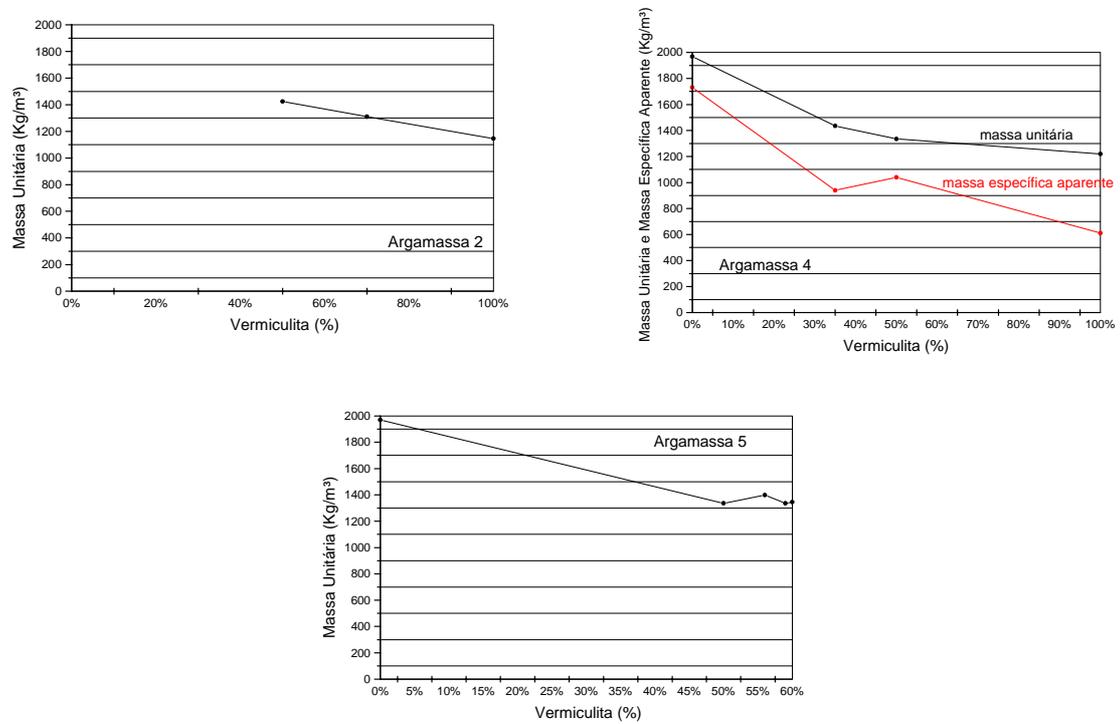


Figura 3.7 - Massa Unitária e massa específica aparente x porcentagem de Vermiculita nos traços de argamassa.

3.3.1.3 Ensaios da argamassa no estado endurecido

Na Figura 3.9 é mostrada a influência da adição de Vermiculita Expandida no módulo de elasticidade do traço 4 de argamassa. Observa-se uma redução de 62% no módulo devido à adição de 35% de Vermiculita quando comparada à argamassa sem Vermiculita. A taxa de redução diminui com o aumento do volume de Vermiculita, sendo que a argamassa com 100% de Vermiculita apresentou um módulo igual a 25% do obtido na argamassa sem Vermiculita. Este comportamento era esperado, uma vez que o módulo de elasticidade é influenciado pela resistência à compressão. Porém, a taxa de redução do módulo foi superior à observada na compressão, o que evidencia a influência da rigidez do agregado no módulo de elasticidade. Isto sugere que uma expressão que possa avaliar o módulo de elasticidade de argamassas com Vermiculita deve, necessariamente, incluir o volume de vermiculita como parâmetro. Nesta figura é apresentado, também, o módulo de elasticidade avaliado pela expressão do ACI 523.3R-93 (ACI, 1994) que leva em consideração a massa específica do concreto. Nota-se que, em média, os valores experimentais são 30% superiores aos avaliados por esta expressão, com exceção do traço com 100% de Vermiculita que apresentou valores cerca de 50% superiores. Isto mostra que esta expressão pode ser usada como primeira avaliação do módulo de elasticidade das argamassas apesar dela ser recomendada apenas para concretos com massa específica acima de 1440 kg/m³. A Tabela 3.5 apresenta as propriedades das argamassas no estado endurecido.

Tabela 3.5 – Propriedades das argamassas estudadas no estado endurecido.

Traç.	Amostra	Verm. (%)	f _{cm} (MPa)			28 dias				8 dias	
			7	14	28	f _{ctm} (MPa)	E _c (GPa)	γ _{seco} (kg/dm ³)	absorção (%)	K (W/m ² °C)	E _{c,cal} (GPa)
1	E-11471	46	-	-	7,2	1,43	5,7	1,24	25,47	1,137	5,0
2	E-11472	100	-	-	2,2	0,49	1,6	0,60	66,74	0,910	-
	E-11601-01	70	3,1	3,6	3,9	-	-	-	-	-	-
	E-11610-02	50	2,7	3,1	3,4	-	-	-	-	-	-
3	E-11571	0	2,7	3,5	5,5	0,70	8,1	-	-	2,792	-
4	E-11673	100	1,9	1,9	2,7	2,00	2,0	0,61	68,75	-	1,1
	E-11898	100	1,2	1,8	2,5	0,60	2,1	0,61	74,59	0,878	1,0
	E-11675	50	1,8	2,4	2,6	1,90	2,8	1,04	52,66	-	2,2
	E-11676	35	2,0	2,8	3,3	2,00	3,1	0,94	38,79	-	2,3
	E-11677	0	3,3	3,8	4,4	2,70	8,2	1,73	14,48	-	6,6
5	E-11899	60	1,5	2,7	3,5	0,70	3,4	0,81	47,51	1,094	1,9
	E-11748	56	3,0	3,9	4,4	-	-	-	-	1,208	-
	E-11749	59	2,9	3,6	3,8	-	-	-	-	1,194	-
	E-11750	50	3,0	3,9	3,9	-	-	-	-	1,238	-
	E-11751	0	5,2	6,4	7,2	-	-	-	-	2,516	-

Na tabela 3.5, o valor $E_{c, cal}$ representa o valor de módulo de elasticidade fornecido pela equação do ACI 523.3R-93 (ACI, 1994). $[E_{c, cal} = \gamma_{seco}^{1,5} \times 0,043 \sqrt{f_{cm}}]$.

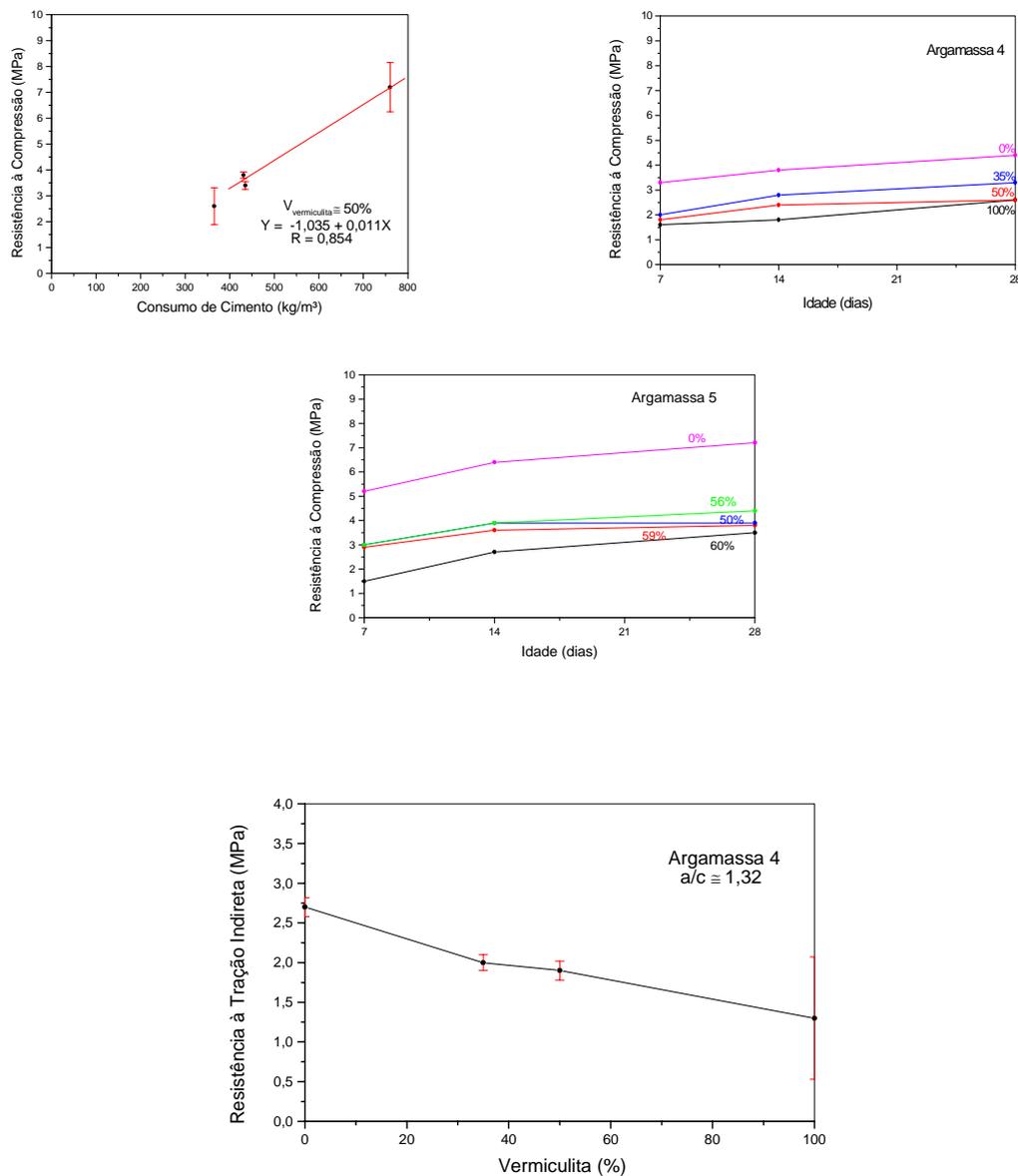


Figura 3.8 - Resistência à Compressão e à Tração Indireta x Porcentagem de Vermiculita nos traços de argamassa.

Da Figura 3.10 observa-se que houve um elevado aumento da absorção com o aumento do volume de Vermiculita, chegando a cerca de 70% quando foi adicionado 100% de Vermiculita. Esta certa absorção, típica da Vermiculita, proporcionou uma diferença significativa entre a massa unitária e a massa específica aparente para elevados volumes de Vermiculita. No caso do traço 4 com 100% de Vermiculita a massa unitária de 1095 kg/m³ da mistura foi reduzida para 610 kg/m³ após 28 dias.

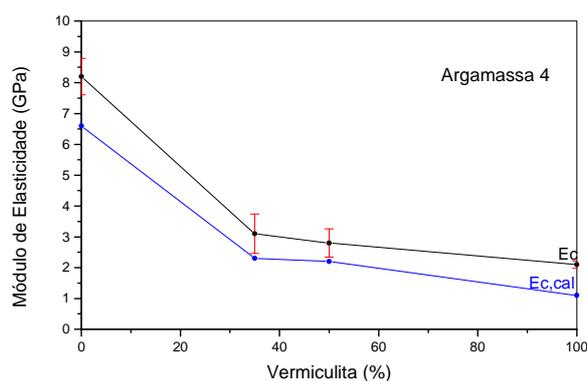


Figura 3.9 - Módulo de Elasticidade x percentagem de Vermiculita nos traços de argamassa.

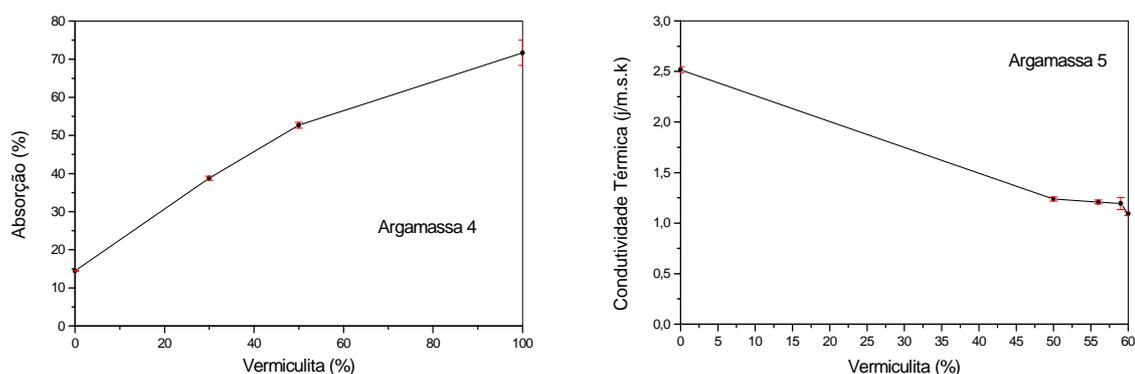


Figura 3.10 – Absorção aos 28 dias e Condutividade Térmica x Percentagem de Vermiculita.

A condutividade também foi reduzida com a adição de Vermiculita, sendo esta redução mais expressiva quando comparado com a argamassa sem Vermiculita. Aparentemente há uma relação direta entre a condutividade e o volume de Vermiculita, porém não foi possível quantificá-la em função da pequena variação no volume de Vermiculita. A adição de 60% de Vermiculita reduziu em 56% a condutividade térmica da argamassa. O menor valor de condutividade obtido foi de 0,878 W/m°C correspondente a uma argamassa com 100% de Vermiculita e γ_{seco} igual a 610 kg/m³. Este valor ainda é mais de três vezes superior ao valor de 0,26 W/m°C recomendado pelo ACI 523.3R-93 (ACI, 1994) para concretos isolantes com massa específica em torno de 800 kg/m³. Isto sugere que esta granulometria de Vermiculita não é tão

eficiente para isolamento como outros agregados leves. Este comportamento talvez possa ser melhorado empregando Vermiculita com maior granulometria.

Da Figura 3.8 nota-se como era esperado, um aumento na resistência à compressão proporcionado pelo aumento do consumo de cimento. A correlação indicada na figura foi obtida para os traços com 50% de Vermiculita, mas tal comportamento é verdadeiro independente da quantidade de Vermiculita no traço. Observa-se, também, desta figura que a adição de Vermiculita reduz a resistência à compressão do traço em qualquer idade analisada.

Foi traçado para a argamassa 4 a relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e a massa específica seca, conforme Figura 3.11. Verifica-se que entre os traços com 100% e 50% de Vermiculita Expandida não há grandes diferenças em termos de resistência à compressão já em termos de massa específica houve um aumento de 70% quando se compara o traço com 50% e 100% de Vermiculita Expandida.

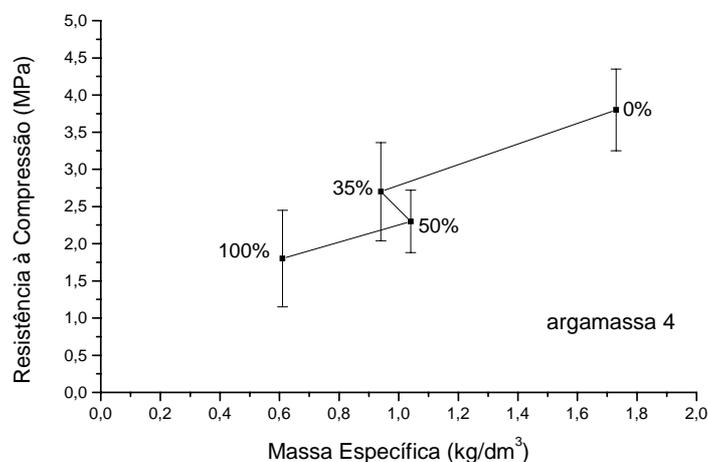


Figura 3.11 – Relação entre a resistência à compressão e a massa específica.

Para a argamassa 5 foi traçado a relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e a condutividade térmica, conforme Figura 3.12. Observa-se que a relação entre a resistência à compressão e a condutividade térmica foi praticamente linear para os traços da argamassa 5.

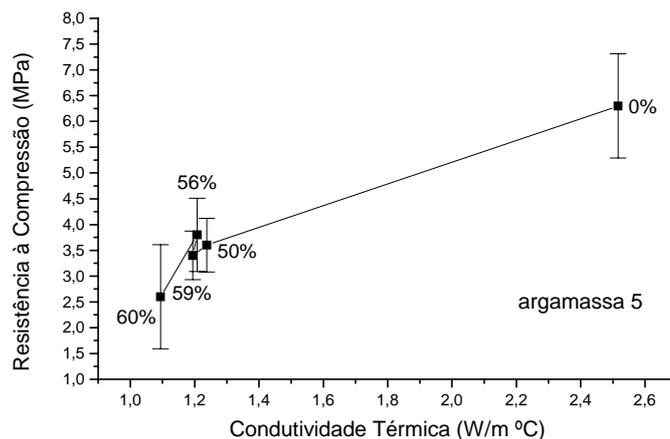


Figura 3.12 – Relação entre resistência à compressão e condutividade térmica.

3.3.2. Concreto

A seguir são apresentados os resultados referentes aos estudos realizados com os traços de concreto. Os resultados estão divididos em ensaios com o concreto no estado fresco e no estado endurecido.

3.3.2.1 Massa específica efetiva da Vermiculita Expandida

As massas específicas efetiva do concreto com diferentes proporções de Vermiculita Expandida são apresentadas na Tabela 3.6, e na Figura 3.13 é apresentada a relação entre o consumo de cimento e as diferentes porcentagens de Vermiculita Expandida.

Tabela 3.6 – Concreto: massa específica efetiva.

Traço	Amostra	Vermiculita (%)	$\gamma_{vermc,f}$ (kg/m ³)
5	E-11678	100	2,50
	E-11679	44	2,90
	E-11680	33	2,00
	E-11681	18	2,00
6	E-11746	12	2,98
	E-11747	6	3,07
	E-11752	28	2,50

Obs: Os números das amostras são do controle interno de Furnas

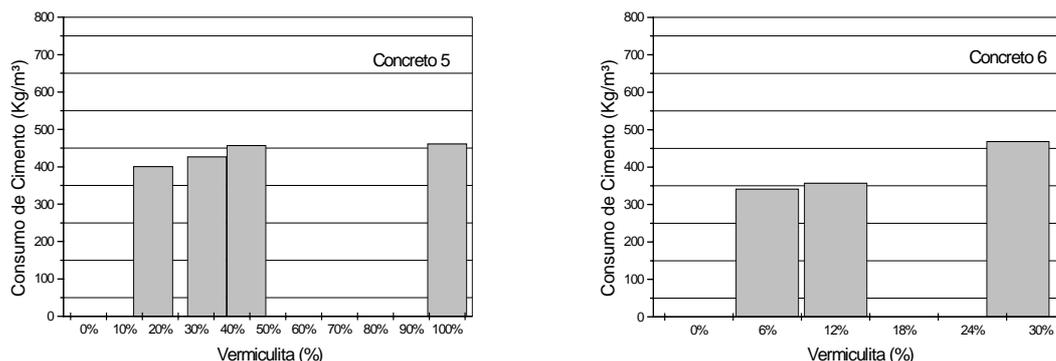


Figura 3.13 – Consumo de Cimento x porcentagem de Vermiculita nos traços de concreto.

Nota-se da Tabela 3.6 que houve pequena alteração no valor da massa específica efetiva à medida que o agregado miúdo foi substituído pela Vermiculita Expandida. Além disso, observa-se que estes valores estão próximos à massa específica real da Vermiculita. Isto indica que a Vermiculita Expandida sofreu um processo de compactação durante a mistura pela ação do agregado graúdo, reduzindo seus vazios internos. Tal fato também é comprovado pela observação dos demais resultados apresentados a seguir. Com relação ao consumo de cimento, nota-se que o aumento da quantidade de Vermiculita exigiu um aumento no consumo, o qual se manteve próximo ou maior que 400 kg/m³.

3.3.2.2 Ensaios do concreto no estado fresco

Os resultados do ar incorporado, da massa unitária e do ensaio de tronco de cone, para as 6 alternativas de concreto com diferentes porcentagens de Vermiculita Expandida, são mostrados na Tabela 3.7 e nas Figuras 3.14 a 3.16.

Comparando os resultados do ar incorporado com os obtidos dos ensaios de argamassa, verifica-se que esses valores são inferiores, o que indica a compactação da Vermiculita pelo agregado graúdo. Além disso, também não se observa variação sensível no valor do ar incorporado quando se varia o volume de Vermiculita Expandida.

Tabela 3.7 – Resultados do concreto no estado fresco

Traço	Amostra	Vermiculit. (%)	Ar incorporado (%)	Abatimento (mm)	Massa unitária (kg/m ³)
1	E-11435	0	1,8	70	2361
2	E-11436	0	1,3	90	2409
3	E-11469	0	1,3	90	2409
4	E-11470	0	2,2	80	2349
5	E-11678	100	3	80	2070
	E-11679	44	2,5	90	2096
	E-11680	33	3	60	2089
	E-11681	18	3,2	85	2116
	E-11682	0	5,6	75	2201
6	E-11741	0	3	65	2362
	E-11746	12	1,8	65	2197
	E-11747	6	3,2	75	2184
	E-11752	28	4	70	1982

Obs: Os números das amostras são do controle interno de Furnas

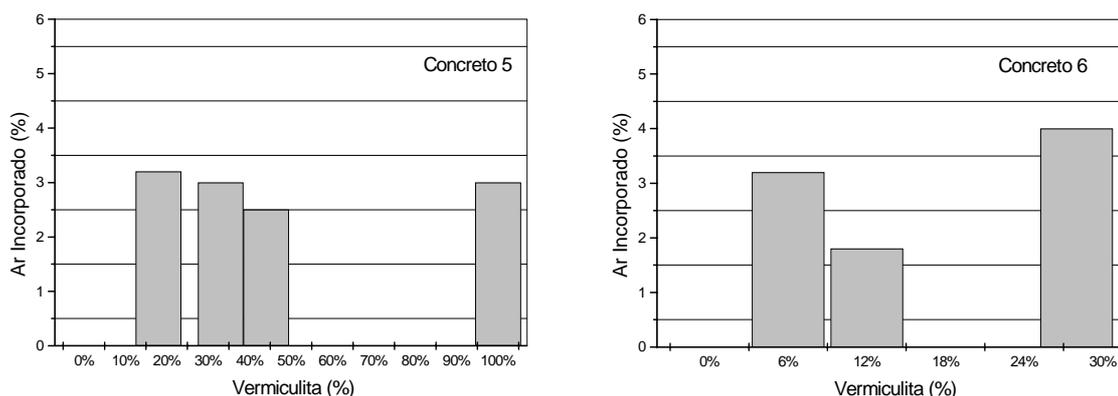


Figura 3.14 – Ar Incorporado x Volume de Vermiculita nos traços de Concreto

Analisando a Figura 3.15, nota-se que a introdução da Vermiculita Expandida na mistura reduz a massa unitária, porém esta redução é menor que a observada nos traços de argamassa. Isto se deve, obviamente, pela presença do agregado graúdo na mistura. A sua influência pode ser comprovada, por exemplo, ao se observar que a redução da massa específica foi mais sensível no traço 6 que no traço 5 (16% contra 6%), apesar de o segundo traço possuir mais Vermiculita. Isto está relacionado, basicamente, ao teor de argamassa da mistura, que era maior no traço 6. Dessa forma, ele apresentava mais agregado miúdo para ser substituído.

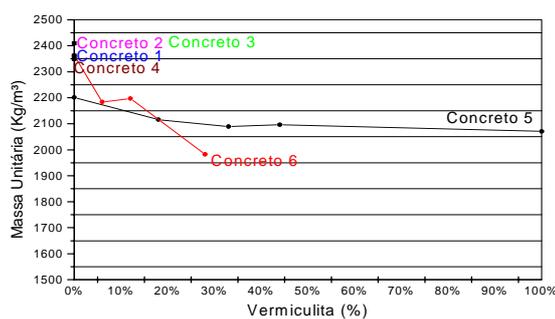


Figura 3.15 – Massa unitária x Volume de Vermiculita nos traços de concreto.

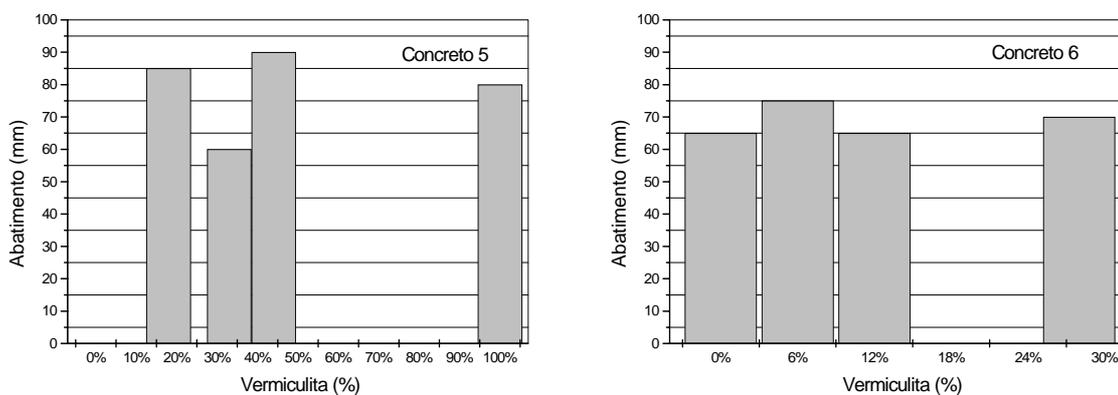


Figura 3.16 - Abatimento x Volume de Vermiculita nos Traços de Concreto.

Com relação ao abatimento observa-se que não houve grandes alterações. A adição de Vermiculita, porém, prejudicou a trabalhabilidade do traço, uma vez que não foi possível moldar o traço 6 com relação água/cimento igual a 0,5. O abatimento semelhante nos traços com Vermiculita Expandida só foi obtido quando a relação água/cimento foi aumentada para 0,8.

3.3.2.3 Ensaios do concreto no estado endurecido

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração indireta, módulo de elasticidade, massa específica aparente seca, absorção e condutividade térmica são apresentados na Tabela 3.8 e na Figura 3.17. Nos traços 5 e 6 foram realizados apenas os ensaios compressão. Procedeu-se assim pelo fato da adição da Vermiculita Expandida não ter proporcionado redução sensível da massa unitária.

Como o objetivo deste estudo era um concreto leve para ser usado como placa em painéis tipo sanduíche, concluí-se que este concreto não atendia ao especificado por apresentar-se ainda muito denso. Dessa forma, optou-se por sugerir que as placas dos painéis fossem confeccionadas sem Vermiculita, permitindo assim o emprego de um concreto mais resistente e com menor absorção. A isolamento térmica do painel, portanto, deverá ser garantida apenas pelo núcleo, uma vez que a condutividade do concreto sem Vermiculita é alta.

Tabela 3.8 – Resultados do Concreto no estado endurecido.

Traço	Amostra	Vermiculit. (%)	f_{cm} (MPa)			28 dias				8 dias
			7	14	28	f_{ctm} (MPa)	E_c (GPa)	γ_{seco} (Kg/dm ³)	Absorção (%)	K (W/m ² °C)
1	E-11435	0	33,7	39,3	42,7	3,45	28,8	2,31	2,49	2,529
2	E-11436	0	28,9	34,6	38,6	3,26	26,9	2,36	2,63	2,604
3	E-11469	0	26,0	32,0	33,8	2,91	27,8	2,28	5,96	2,495
4	E-11470	0	26,5	32,8	34,3	3,07	28,3	2,34	5,92	2,666
5	E-11678	100	8,0	9,6	11,4	-	-	-	-	-
	E-11679	44	7,7	9,3	11,5	-	-	-	-	-
	E-11680	33	8,1	10,1	12,1	-	-	-	-	-
	E-11681	18	8,3	10,3	12,1	-	-	-	-	-
	E-11682	0	11,6	14,3	15,7	-	-	-	-	-
6	E-11741	0	31,3	32,9	44,2	-	-	-	-	-
	E-11746	12	10,9	14,6	19,2	-	-	-	-	-
	E-11747	6	13,0	16,7	19,5	-	-	-	-	-
	E-11752	28	-	-	13,3	-	-	-	-	-

Obs: Os números das amostras são do controle interno de Furnas

A influência da Vermiculita Expandida na resistência à compressão pode ser vista na Figura 3.17, de onde se conclui que o volume de Vermiculita não teve grande influência quando se observa o traço 5, onde a resistência dos concretos com Vermiculita foi pouco inferior à do concreto sem Vermiculita. Isto pode ser explicado porque este traço apresentava relação água/cimento elevada, o que reduziu sua resistência. O traço 6 sem Vermiculita apresentou resistência elevada devido ao fator água/cimento utilizado (0,5). Neste caso, a adição de 6% de Vermiculita reduziu em mais de 50% sua resistência, o que mostra a grande influência da Vermiculita na resistência do concreto.

A baixa qualidade da Vermiculita como agregado estrutural fica mais claro quando se compara o resultado do traço 6 com 28% de Vermiculita com os resultados do ACI 523.3R-93 (ACI, 1994) obtidos para outros agregados leves. Este indica que concretos com densidade da ordem de 1920 kg/m³ e relação água/cimento de 0,6

apresentam resistência próximo de 23 MPa, valor mais de 70% superior ao obtido neste trabalho. Os resultados aqui obtidos podem ser melhorados caso se consiga reduzir o fator água/cimento, o que pode ser obtido pelo tratamento da Vermiculita para reduzir sua absorção.

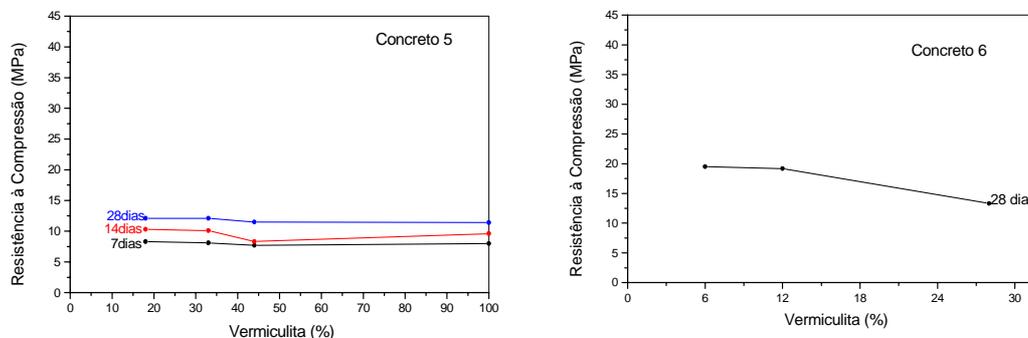


Figura 3.17 – Resistência à Compressão x Porcentagem de Vermiculita nos traços de concreto.

3.4 Considerações finais

A partir dos resultados dos ensaios constatou-se que é possível obter argamassas com Vermiculita Expandida de granulometria super fina com resistência à compressão variando de 2 MPa a 7 MPa, o que indica que ela pode ser aplicada como elemento de enchimento de painéis tipo sanduíche com vantagem em relação a outros tipos de enchimento do ponto de vista de resistência mecânica do painel. A adição de Vermiculita reduziu em mais de 50% a condutividade térmica das argamassas e diminuiu sua massa específica para um terço da massa de uma argamassa sem Vermiculita (610 kg/m^3). Isto mostra que elas apresentam as propriedades básicas para materiais de enchimento que são baixa densidade e boa isolamento térmica. Apesar disto, a condutividade térmica obtida ($0,878 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) ainda é cerca de três vezes maior que a recomendada para concretos isolantes de mesma densidade. Outras granulometrias de Vermiculita devem ser estudadas para verificar a possibilidade de redução de condutividade térmica das argamassas.

No caso de concreto, observou-se que a adição da Vermiculita Expandida não apresentou melhoras significativas, visto que o agregado gráudo compactou a

Vermiculita reduzindo seus vazios internos. Obteve-se pequena redução da massa específica acompanhada de mais de 50% de redução na resistência à compressão. Nos traços com massa específica em torno de 2000 kg/m^3 foram obtidas resistências à compressão próximas de 13 MPa, mesmo com consumo de cimento em torno de 450 kg/m^3 . Este valor é inferior ao mínimo recomendado para concretos estruturais (17 MPa). Dessa forma, recomenda-se o emprego do concreto convencional na confecção das placas de painéis sanduíche portantes de modo a aproveitar sua baixa absorção e boa resistência mecânica, mesmo este apresentando maior densidade. Devem-se estudar outros traços com agregado graúdo de menor dimensão ou tratamentos superficiais na Vermiculita que diminuam sua absorção de modo a se obter concretos com resistência mais elevadas.

Capítulo 4 Ensaio Experimental em Painéis Tipo Sanduíche.

Concluído o estudo dos traços de concreto e argamassa com Vermiculita Expandida, passou-se ao estudo experimental do comportamento à flexão de painéis sanduíche. O objetivo deste estudo é verificar a eficiência de conectores tipo treliça como elemento de ligação em painéis com núcleo de Vermiculita Expandida. Os conectores utilizados consistem de treliças eletrosoldadas comumente empregadas na confecção de lajes treliçadas. Neste trabalho, os conectores são moldados juntos com as placas, entretanto no painel sanduíche eles são ancorados no núcleo, facilitando a produção em série. Esta forma de ligação é diferente do comumente empregado nos painéis sanduíche onde o conector é ancorado em ambas as placas. Sendo assim, neste trabalho o núcleo de Vermiculita Expandida além de funcionar como isolante tem função estrutural, uma vez que ele é responsável pela transmissão de esforços entre as placas.

A Vermiculita Expandida foi empregada neste trabalho com o objetivo de reduzir a massa específica do concreto. Entretanto, como visto no capítulo anterior, o seu emprego reduziu sensivelmente a resistência do concreto além de aumentar sua absorção. Sendo assim, optou-se na confecção dos painéis em utilizar a Vermiculita Expandida apenas como argamassa de preenchimento para a confecção do núcleo. As placas, portanto, foram confeccionadas com concreto convencional de modo a reduzir a absorção do painel.

4.1 Descrição dos modelos

Foram moldados painéis sanduíche com 2,50 m de comprimento, 0,55 m de largura e 0,15 m de espessura. Eles eram formados por duas placas de concreto com 40 mm de espessura, resultando em um núcleo com 70 mm de espessura. As dimensões

em planta foram determinadas em função das dimensões da laje de reação do laboratório de Furnas onde os ensaios foram realizados. A espessura do painel foi determinada em função das alturas das treliças eletrosoldadas disponíveis no mercado local, cujo menor valor era de 80 mm. Admitindo esta treliça ancorada a um centímetro e meio da face externa de uma das placas e apoiada no núcleo, isto resulta numa espessura total para o painel em torno de 150 mm, conforme Figura 4.1.

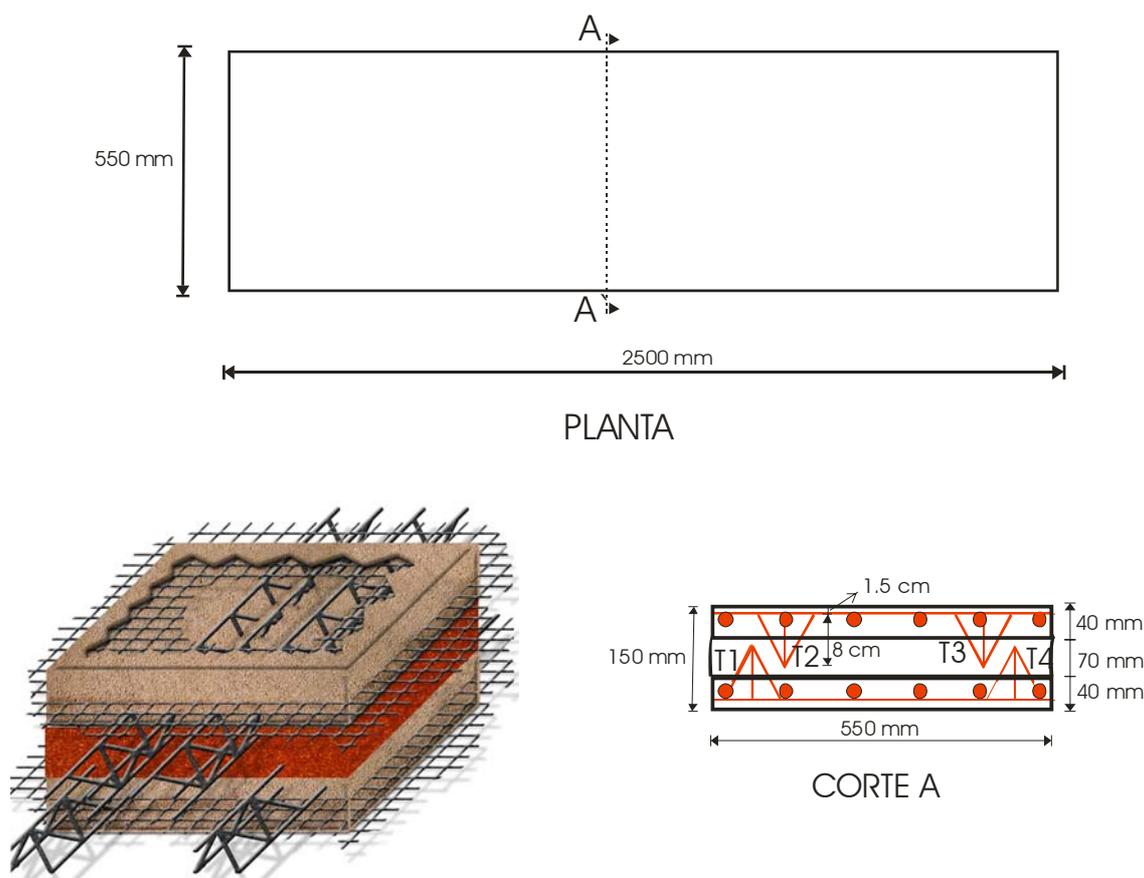


Figura 4.1 - Dimensão dos painéis ensaiados.

As variáveis analisadas foram a resistência do núcleo e a configuração do conector no painel. Foram confeccionados doze modelos de painéis, sendo três repetições. A resistência da argamassa do núcleo foi alterada modificando a porcentagem de substituição, em volume, de areia natural por Vermiculita Expandida (45% e 100%). Seis deles foram divididos aos pares, sendo variada a resistência do núcleo (dois volumes de Vermiculita Expandida) e o número de linhas de conector tipo treliça dispostos longitudinalmente no painel (duas linhas, uma linha e sem conector). Cada painel teve suas placas armadas com tela eletrosoldada com malha de 100 mm x

100 mm e fios de 4,2 mm de aço CA-60, nas quais eram fixadas as treliças antes da concretagem. O cobrimento de concreto adotado foi de 15 mm.

Na tabela 4.1 é mostrado um resumo dos painéis ensaiados com suas características e nomenclatura. Eles são divididos em cinco diferentes configurações para os conectores.

Tabela 4.1 - Descrição dos modelos de painéis ensaiados.

Nomenclatura	Número de linhas de conector	Forma de ligação	Porcentagem de Vermiculita Expandida	Altura da treliça utilizada (cm)
P-2L-PN-45	2	Placa-núcleo	45	8
P-2L-PN-100	2	Placa-núcleo	100	8
P-1L-PN-45	1	Placa-núcleo	45	8
P-1L-PN-100	1	Placa-núcleo	100	8
P-SL-45	0	-	45	8
P-SL-100	0	-	100	8
P-2L-CPN-45	2	Placa-núcleo	45	8
P-2L-PP-45	2	Placa-placa	45	12
P-2L-PP-45b	2	Placa-placa	45	10
P-1L-PN-45b	1	Placa-núcleo	45	8
P-2L-PN-100b	2	Placa-núcleo	100	8
P-SL-100b	0	-	100	8

O primeiro grupo continha duas linhas de conectores com conexão de placa a núcleo. O segundo apresentava uma linha de conector com conexão de placa a núcleo. O terceiro grupo foi confeccionado sem nenhum conector. Cada linha de conector nestes painéis era composta de duas treliças, uma ancorada na placa superior e no núcleo e a outra ancorada na placa inferior e no núcleo, ficando ambas dispostas o mais próximo possível entre si. Em cada um dos grupos foi variada a resistência do núcleo.

Foram confeccionados ainda mais dois modelos. Um modelo no qual foi modificado a forma de ancoragem das treliças, passando esta a ser de placa a placa e não de placa a núcleo. O outro modelo consistia de duas linhas de conectores colocados apenas na região de cisalhamento do painel e com conexão de placa a núcleo. Para ambos os modelos a porcentagem de substituição, em volume, da areia por Vermiculita Expandida era de 45%. Nesta tabela constam ainda mais quatro painéis. Estes modelos foram ensaiados em duplicata devido a problemas no ensaio ou para confirmação de resultados. O modelo P-2L-PP-45b, com ancoragem de placa a placa e treliça com altura de 10 cm, apresentou deficiência de ancoragem do conector na placa e serviu para demonstrar a importância da boa ancoragem do conector na resistência do painel.

4.2 Caracterização do concreto e do aço

Para a caracterização do concreto das placas e do núcleo foram moldados 20 corpos-de-prova cilíndricos. Foram determinadas as seguintes propriedades no estado fresco: massa unitária, teor de ar incorporado, abatimento do tronco de cone e índice de consistência da argamassa conforme NBR-13276 (ABNT, 1987). No estado endurecido o concreto utilizado nas placas foi caracterizado quanto à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. Para cada ensaio eram moldados três corpos-de-prova cilíndricos com dimensão de 15 cm x 30 cm, totalizando 12 corpos-de-prova, seis para cada placa. O mesmo corpo-de-prova do ensaio de módulo era utilizado no ensaio de tração por compressão diametral. Para a argamassa do núcleo a dimensão dos corpos-de-prova era de 5 cm x 10 cm, sendo realizados os mesmos ensaios da placa, totalizando seis corpos-de-prova. Foi realizado também o ensaio de condutividade térmica conforme NBR-12820 (ABNT, 1993), sendo moldados para este ensaio dois corpos-de-prova cilíndrico com dimensão de 20 cm x 40 cm. A Tabela 4.2 apresenta a quantidade de material, por metro cúbico, utilizado para confecção do painel (placa e núcleo). Os materiais empregados foram os mesmos utilizados no estudo dos traços, estando suas propriedades descritas no Capítulo 3.

A caracterização do aço foi realizada através do ensaio de tração para arame de aço conforme NBR-6207/82 (ABNT, 1982) (Figura 4.2). A caracterização foi feita

para os fios da tela eletrosoldada, para os banzos inferior e superior das treliças de oito e doze centímetros e para as barras usadas nos painéis com menos de duas linhas de conector, que também contribuem para a resistência à flexão. Pelo gráfico pode-se caracterizar o aço como tipo B, ou seja, sem patamar de escoamento definido.

Tabela 4.2 - Quantidade de material, por m³, utilizado na confecção dos painéis.

Material	Placa de concreto armado	Argamassa para o núcleo com 45% de Vermiculita	Argamassa para o núcleo com 100% de Vermiculita
Cimento CII F 32	378,6 kg	670,1 kg	418,8 kg
Areia Natural	807,3 kg	203,3 kg	-
Vermiculita Expandida	-	97,9 kg	168,8 kg
Brita – d _{máx} =12.5mm	944,0 kg	-	-
Fumo de Sílica	24,0 kg	-	-
Aditivo COMPLAST SP430	0,925 kg	-	-
Água	203,6 kg	401,5 kg	507,5 kg
Fator a/c	0,538	0,599	1,223

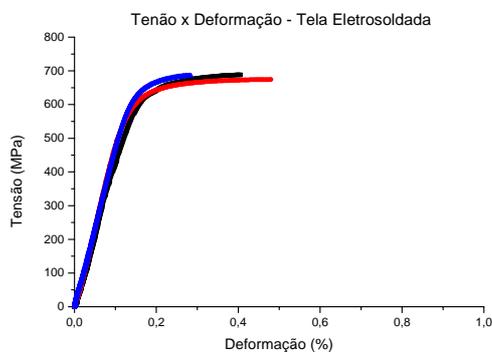
A Tabela 4.3 mostra os valores obtidos de resistência à tração das armaduras utilizadas nos painéis.

Tabela 4.3 – Resistência última à tração para o aço utilizado nos painéis.

Aço	f_y (MPa)
Banzo superior da treliça de 8 cm de altura ϕ – 6,3 mm	785 ± 10,23
Banzo superior da treliça de 12 cm de altura ϕ – 6,3 mm	706 ± 34,46
Banzo inferior da treliça de 8 cm de altura ϕ – 4,2 mm	684 ± 5,32
Banzo inferior da treliça de 12 cm de altura ϕ – 4,2 mm	659 ± 6,27
Fios da tela eletrosoldada ϕ – 4,2 mm	674 ± 12,96
Barras ϕ – 5 mm	707 ± 0,26
Barras ϕ – 6,3 mm	1141 ± 24,70

Na Tabela 4.4 são mostradas as propriedades do concreto e da argamassa no estado fresco para todos os painéis ensaiados. As propriedades do concreto e da

argamassa no estado endurecido são mostradas na Tabela 4.5 e Tabela 4.6, respectivamente.



(a)

(b)

Figura 4.2 – Caracterização do aço da tela.

Tabela 4.4 – Propriedades do concreto e da argamassa no estado fresco.

Descrição	Placa Tractionada			Placa Comprimida			Núcleo		
	$\gamma_{unit.}$ kg/m ³	Ar %	Slump (mm)	$\gamma_{unit.}$ kg/m ³	Ar %	Slump (mm)	$\gamma_{unit.}$ kg/m ³	Ar %	flow (mm)
P-2L-PN-45	2349	2,5	25	2349	2,5	25	-	-	-
P-2L-PN-100	2354	1,9	10	2354	1,9	10	1190	6	194
P-1L-PN-45	2354	1,9	10	2354	1,9	10	1543	10	205
P-1L-PN-100	2356	2,0	15	2364	2,0	15	1096	15	170
P-SL-45	2341	2,4	10	2354	2,4	15	1571	10	277
P-SL-100	2356	2,0	15	2364	2,0	15	1126	12	277
P-2L-CPN-45	2364	1,7	10	2378	1,3	9	1533	10	210
P-2L-PP-45	2317	2,8	10	2329	2,6	20	1536	10	277
P-2L-PP-45b	2350	2	70	2330	2,8	55	1556	8	207
P-1L-PN-45b	2345	2,5	5	2344	2,5	10	1581	9	248
P-2L-PN-100b	2334	2,7	25	2334	2,7	25	1131	12	196
P-SL-100b	2354	1,9	10	2368	1,7	10	1197	12	195

Tabela 4.5 - Propriedades do concreto das placas.

Descrição	Placa Tracionada			Placa Comprimida		
	f_{cm}	f_{ctm}	E_{cm}	f_{cm}	f_{ctm}	E_{cm}
	MPa	MPa	GPa	MPa	MPa	GPa
P-2L-PN-45	$36,1 \pm 0,2$	$3,1 \pm 0,2$	$25,0 \pm 1,9$	$36,1 \pm 0,2$	$3,1 \pm 0,2$	$25,0 \pm 1,9$
P-2L-PN-100	$40,4 \pm 0,7$	$3,4 \pm 0,3$	$25,3 \pm 0,7$	$40,2 \pm 0,6$	$3,4 \pm 0,3$	$24,2 \pm 1,0$
P-1L-PN-45	$34,2 \pm 1,8$	$3,5 \pm 0,2$	$23,5 \pm 1,0$	$34,7 \pm 0,7$	$3,3 \pm 0,2$	$24,7 \pm 1,1$
P-1L-PN-100	$34,5 \pm 0,2$	$3,0 \pm 0,4$	-	$34,4 \pm 0,9$	$3,5 \pm 0,1$	-
P-SL-45	$34,8 \pm 0,7$	$2,9 \pm 0,1$	$20,5 \pm 1,9$	$34,1 \pm 0,1$	$3,1 \pm 0,2$	$20,5 \pm 1,2$
P-SL-100	-	-	-	$36,7 \pm 0,9$	$3,8 \pm 0,2$	$24,2 \pm 4,7$
P-2L-CPN-45	$33,3 \pm 0,5$	-	$24,8 \pm 0,9$	$35,2 \pm 0,5$	-	$25,0 \pm 1,2$
P-2L-PP-45	-	-	-	$32,9 \pm 1,1$	$2,9 \pm 0,2$	$21,7 \pm 0,4$
P-2L-PP-45b	$27,6 \pm 0,4$	-	-	$30,8 \pm 0,7$	-	-
P-1L-PN-45b	$33,0 \pm 1,1$	$3,6 \pm 0,0$	$21,0 \pm 0,8$	$34,1 \pm 0,3$	$3,0 \pm 0,2$	$19,8 \pm 1,2$
P-2L-PN-100b	$28,7 \pm 0,2$	$2,9 \pm 0,2$	$22,1 \pm 1,0$	$28,7 \pm 0,2$	$2,9 \pm 0,2$	$22,1 \pm 1,0$
P-SL-100b	$32,7 \pm 0,7$	$2,6 \pm 0,3$	$24,8 \pm 1,1$	$36,8 \pm 1,1$	$3,3 \pm 0,0$	$24,3 \pm 0,5$

Tabela 4.6 - Propriedades da argamassa do núcleo.

Descrição	Núcleo			
	f_{cm} - MPa	f_{ctm} - MPa	E_{cm} - MPa	C.T.(j/m.s. K)
P-2L-PN-45	$8,5 \pm 0,3$	$1,6 \pm 0,1$	$9,3 \pm 0,3$	-
P-2L-PN-100	$3,3 \pm 0,2$	$0,6 \pm 0,0$	$2,3 \pm 0,2$	-
P-1L-PN-45	$8,6 \pm 0,6$	$1,4 \pm 0,1$	$6,4 \pm 0,2$	$1,192 \pm 0,01$
P-1L-PN-100	$2,4 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,0$	$1,9 \pm 0,1$	$0,922 \pm 0,00$
P-SL-45	$10,1 \pm 1,0$	$1,4 \pm 0,3$	$7,2 \pm 1,5$	$1,260 \pm 0,06$
P-SL-100	$2,7 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,1$	$3,7 \pm 0,6$	-
P-2L-CPN-45	$7,1 \pm 0,6$	-	$5,2 \pm 0,1$	-
P-2L-PP-45	$9,4 \pm 1,0$	$1,5 \pm 0,4$	$3,8 \pm 0,0$	-
P-2L-PP-45b	$7,2 \pm 0,4$	$1,7 \pm 0,4$	$7,9 \pm 0,5$	$1,303 \pm 0,06$
P-1L-PN-45b	$10,4 \pm 0,5$	$1,9 \pm 0,2$	$13,3 \pm 0,5$	$1,215 \pm 0,00$
P-2L-PN-100b	$2,3 \pm 0,1$	$0,5 \pm 0,0$	$3,0 \pm 0,5$	$0,427 \pm 0,08$
P-SL-100b	$3,0 \pm 0,1$	$0,6 \pm 0,0$	$1,9 \pm 0,2$	$1,020 \pm 0,03$

Nota: Os valores não indicados nas Tabelas 4.5 e 4.6 não foram determinados por problemas nos corpos-de-prova após a moldagem.

4.3 Instrumentação

Quanto à instrumentação, foram utilizados dois extensômetros elétricos de resistência com base de 30 mm coladas no concreto na face comprimida do painel (Figura 4.3). Foram colados quatro extensômetros elétricos de resistência com base de cinco milímetros na tela eletrosoldada no meio do vão do painel, conforme Figura 4.3. Do mesmo tipo de extensômetro, oito foram colados em cada uma das treliças, como mostram as Figura 4.4 e 4.5. Nas diagonais, os extensômetros foram fixados no meio do vão e a quarenta centímetros do meio do vão, a partir do qual o esforço cortante é constante. Foram fixados extensômetros também nos banzos inferior e superior da treliça no meio do vão do painel.

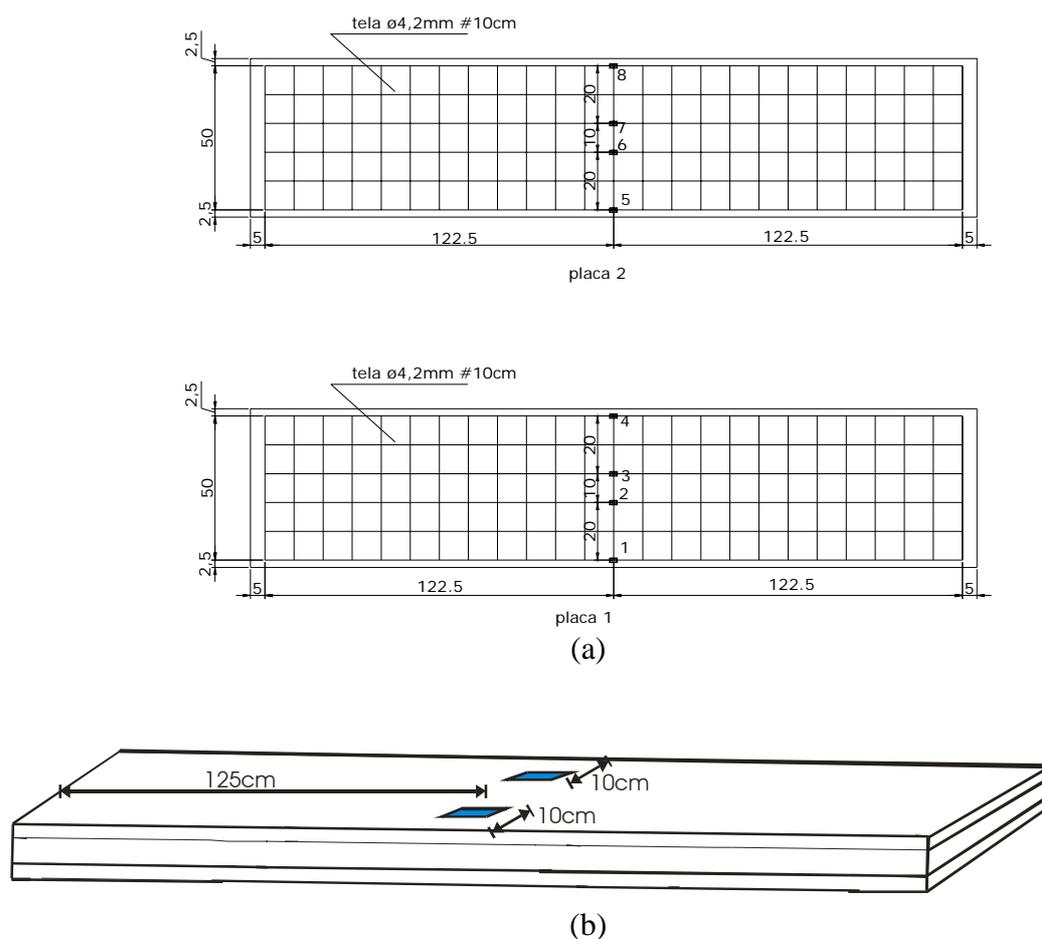


Figura 4.3 – Posição dos extensômetros na tela eletrosoldada (a) e no concreto (b).

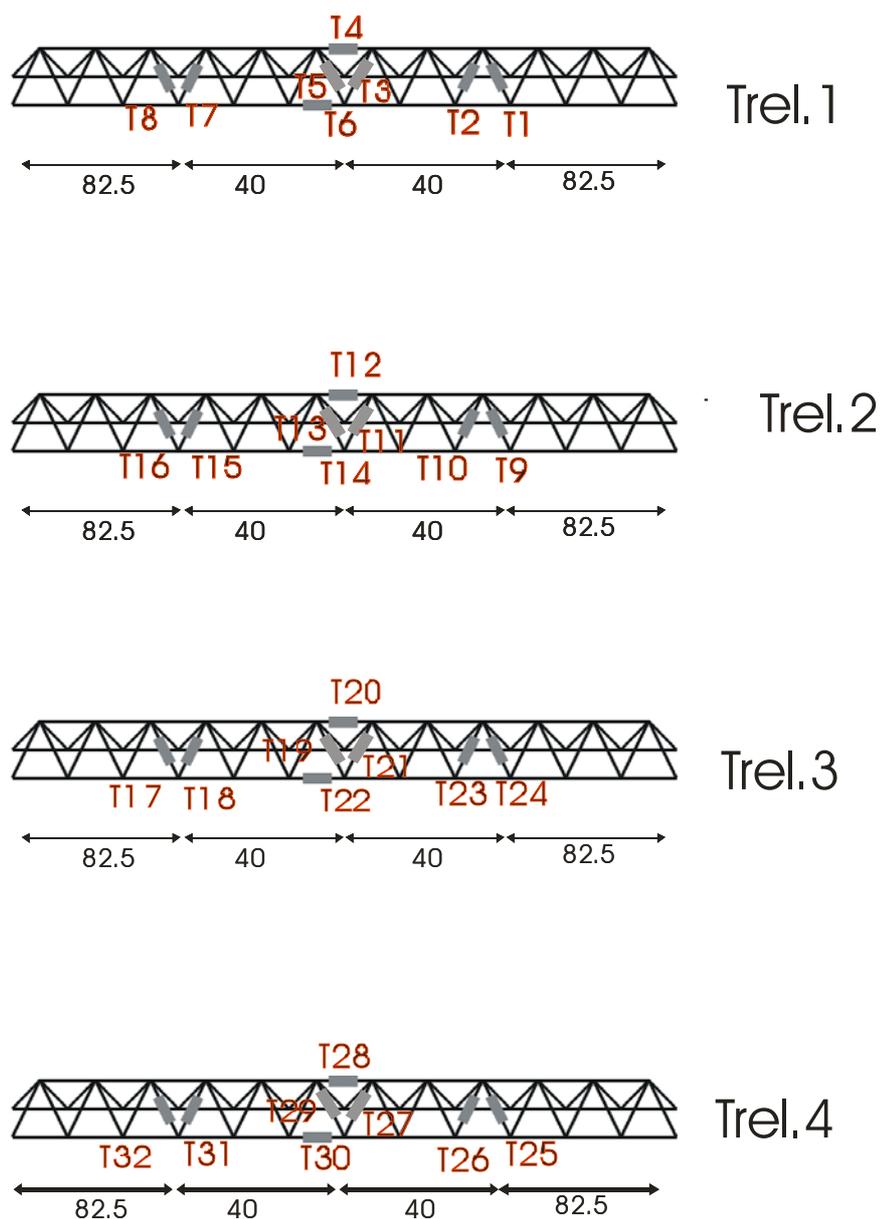


Figura 4.4 – Posição dos extensômetros no conector adotado para todos os painéis.

Obs: Para o painel P-2L-CPN-45 foi mantida a mesma numeração da posição dos extensômetros.

Com exceção dos modelos com duas linhas de conector e ancoragem de placa a núcleo (P-2L-PN-45, P-2L-PN-100), nos demais modelos foram adicionadas barras longitudinais à tela eletrosoldada. Este procedimento foi adotado para manter constante a taxa de armadura de flexão nos painéis à medida que era diminuída a quantidade de linhas de conector, visto que foi constatado que os banzos das treliças contribuíam para a resistência à flexão do painel.

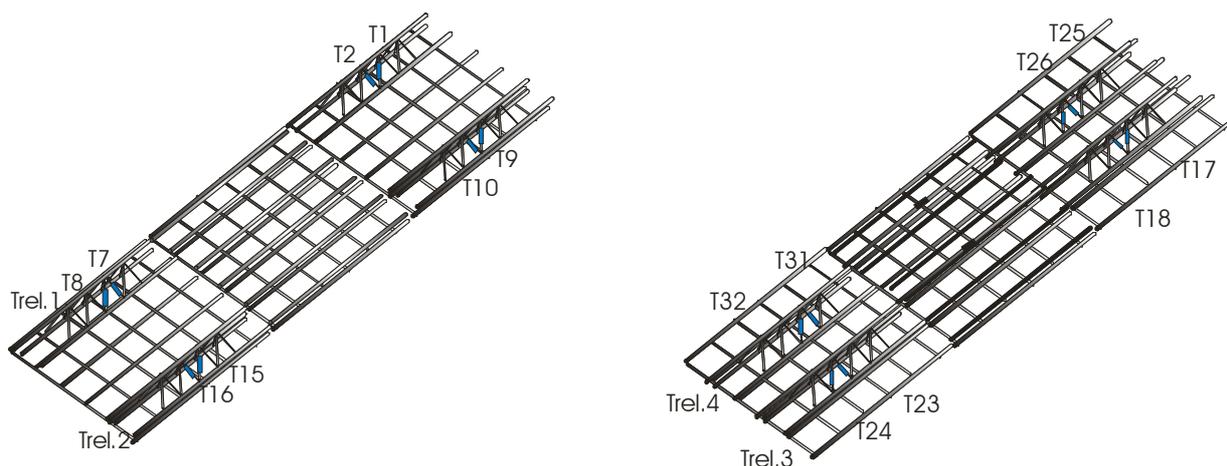


Figura 4.5 - Posição dos extensômetros no conector para o modelo P-2L-CPN-45.

Nos modelos com apenas uma linha de conector (P-1L-PN-45, P-1L-PN-100) foram adicionadas três barras de cinco milímetros de diâmetro com 2450 mm de comprimento na tela eletrosoldada em cada placa. Nos modelos sem linha de conector, foram adicionadas cinco barras de cinco milímetros de diâmetro com 2450 mm de comprimento na tela eletrosoldada em cada placa do modelo P-SL-45, e três barras de 6,3 mm em cada placa do modelo P-SL-100. O modelo com duas linhas de conector apenas na região de cisalhamento (P-2L-CPN-45) recebeu cinco barras de cinco milímetros de diâmetro, com 110 mm de comprimento na tela eletrosoldada em cada placa, na região onde não havia treliças. O modelo com conexão de placa a núcleo (P-2L-PP-45) recebeu três barras de cinco milímetros de diâmetro com 2450 mm de comprimento na tela eletrosoldada em cada placa. A Figura 4.6 mostra os esquemas de armação utilizados nos painéis.

O modelo P-2L-CPN-45 recebeu além do reforço à flexão, barras de cinco milímetros de diâmetro completando o banzo superior das treliças. Estas barras ficaram imersas no núcleo e em cada uma delas foi colado um extensômetro de base cinco milímetros para que fosse possível posteriormente o desenho da linha neutra. Adotando este procedimento a linha neutra contaria não apenas com as leituras de deformação na face comprimida do painel e nas telas eletrosoldadas tracionada e comprimida, mas também na altura dos banzos superiores das treliças tanto da placa tracionada quanto da placa comprimida.

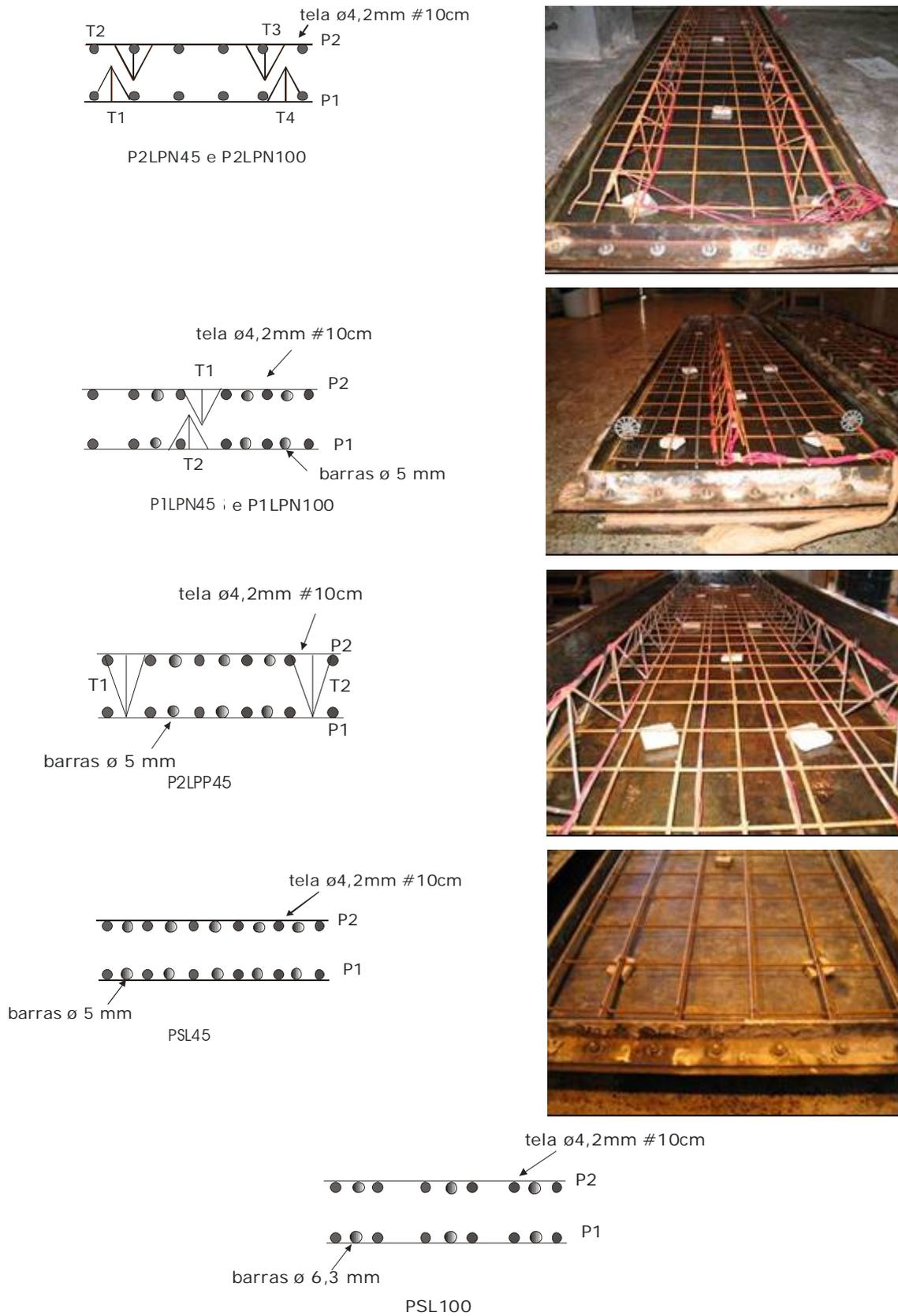


Figura 4.6 – Esquema de armação dos painéis.

Foram medidos os deslocamentos verticais através de relógio comparador para se obter a flecha do painel. Na direção horizontal foram afixados quatro relógios comparador de cada lado do painel para medição de eventuais deslizamentos relativos entre as placas (Figura 4.7). Foram, também, posicionados relógios comparador junto aos apoios de modo a medir eventuais deslocamentos verticais do mesmo. Observou-se, entretanto, que não houve deslocamento do apoio em nenhum dos ensaios realizados.

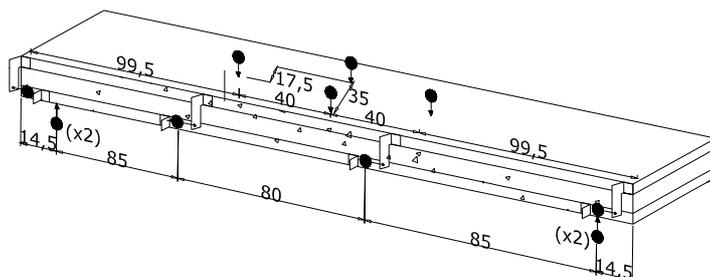


Figura 4.7 - Posição do relógio comparador.

4.4 Confeção dos painéis.

A concretagem das placas dos painéis sanduíches realizou-se empregando mesa vibratória. Para os modelos com conectores ancorados de placa a núcleo as duas placas foram concretadas em uma mesma etapa. Ambas encontravam-se devidamente armadas com tela eletrosoldada de fios de 4,2 mm de diâmetro e malha de 100 mm x 100 mm e com os conectores, treliças de oito centímetros de altura, na posição conforme projeto (Figura 4.8). As placas tinham 550 mm de largura 2500 mm de comprimento e 40 mm de espessura.



Figura 4.8 - Primeira etapa da concretagem para o modelo P-2L-PN-100.

A desforma ocorreu após três dias de cura, sendo lançada a argamassa com Vermiculita Expandida que constituiu o núcleo isolante do painel com 550 mm de largura 2500 mm de comprimento e espessura de 70 mm. Para esta segunda etapa da confecção dos painéis, as duas placas foram posicionadas verticalmente uma em frente da outra, ficando o painel com uma espessura final de 150 mm, sendo que essas placas foram umedecidas antes do preenchimento do núcleo. A concretagem foi realizada com ajuda de mesa vibratória. A Figura 4.9 mostra o esquema empregado nas concretagens do núcleo.



Figura 4.9 – Segunda etapa para concretagem para painel com ancoragem de placa a núcleo.

Após concretado o núcleo, o painel foi mantido sob cura úmida até dois dias antes da data do ensaio, que se realizou, em média, 14 dias depois de concluído a confecção do painel.

Para o modelo P-2L-PP-45, com conector ancorado de placa a placa, a concretagem ocorreu em três fases. Na primeira fase foi concretada a primeira placa, na segunda etapa confeccionou-se o núcleo de argamassa com 45% de substituição em volume de areia por Vermiculita Expandida e na terceira etapa foi concretada a segunda placa, que foi a placa comprimida durante o ensaio (Figura 4.10). O núcleo foi

preenchido após três dias de cura da primeira placa e a segunda placa foi concretada após três dias de cura do núcleo. Todas as concretagens foram realizadas com auxílio da mesa vibratória, sendo que a primeira placa foi umedecida antes da confecção do núcleo. O ensaio foi realizado após 14 dias da concretagem da segunda placa, sendo o painel mantido sob cura até dois dias antes da data do ensaio.



1ª Fase



2ª Fase



3ª Fase

Figura 4.10 – Concretagem modelo P-2L-PP-45.

Para a confecção do modelo P-2L-PP-45 utilizou-se apenas uma fôrma com 15 cm de altura, entretanto a concretagem foi feita em três fases o que dificulta uma produção em série dos painéis. Já os modelos com ancoragem dos conectores de placa a núcleo, apesar do uso de duas fôrmas, a produção em série foi favorecida, o que foi verificado durante a confecção dos painéis. Foi possível a execução do núcleo de um painel e a concretagem das duas placas de outro painel em um mesmo dia, apesar de

existirem apenas um par de fôrmas para a placa e a fôrma do núcleo. A Figura 4.11 mostra o esquema da fôrma utilizado na concretagem dos painéis.

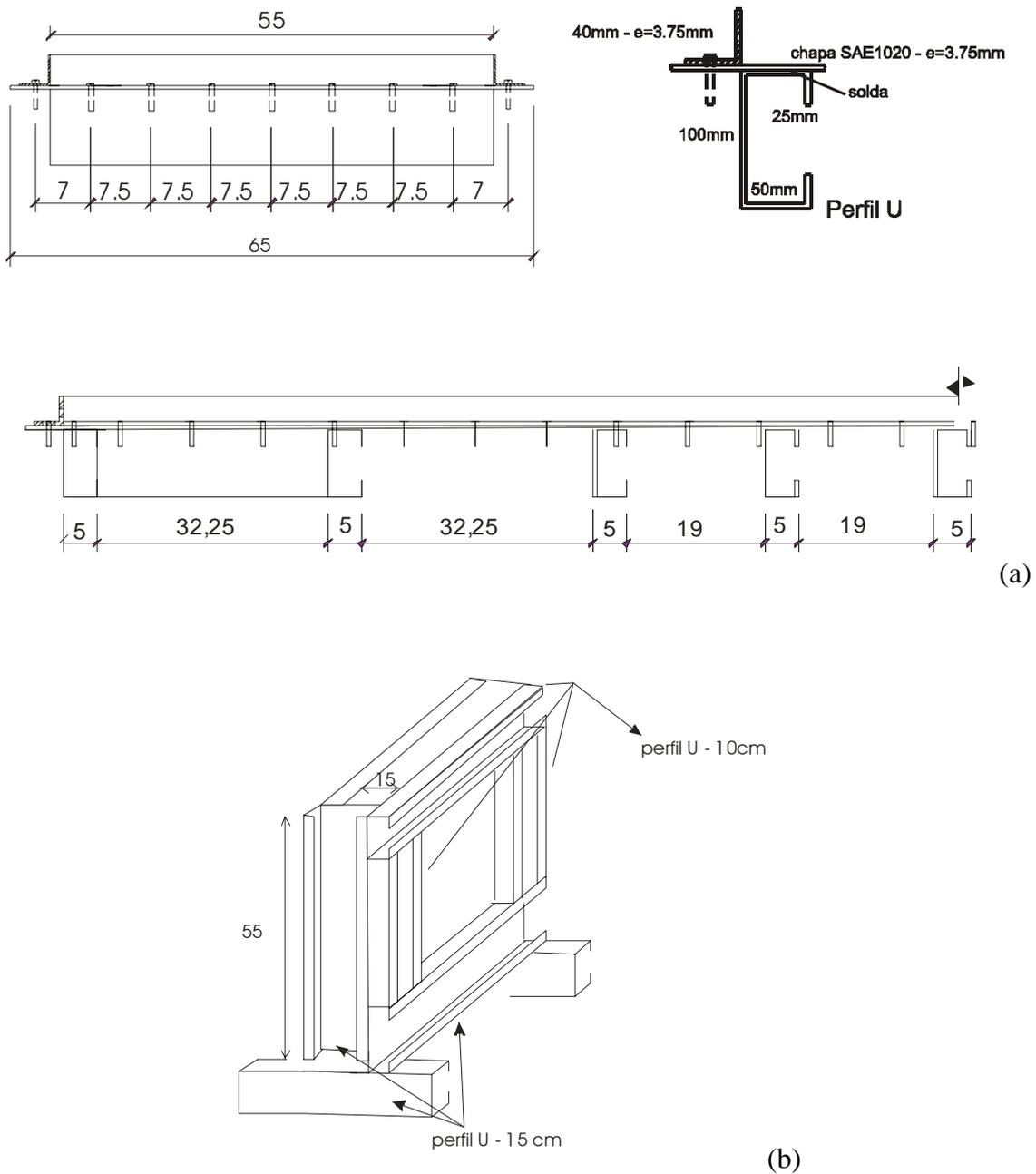


Figura 4.11 – Esquema da fôrma utilizada nos painéis. (a) concretagem das placas. (b) confecção do núcleo.

4.5 Esquema de ensaio à flexão

Para o ensaio à flexão foram confeccionados doze painéis do tipo sanduíche com núcleo isolante de argamassa com Vermiculita Expandida, com comprimento de 2500 mm, largura de 550 mm e espessura de 150 mm. O carregamento foi aplicado de baixo para cima nos terços médios do painel, ao longo de sua largura, conforme os esquemas mostrados na Figura 4.12.

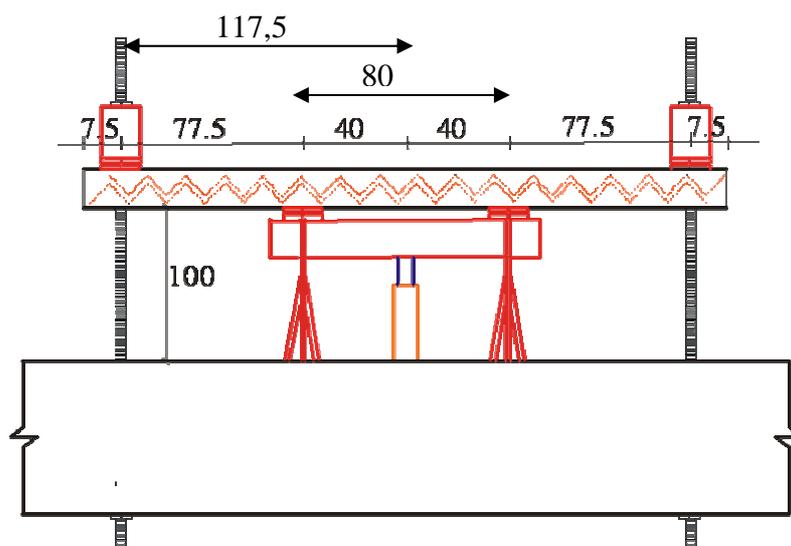


Figura 4.12 - Esquema de ensaio à flexão.

O carregamento foi aplicado em incrementos de 1,5 kN até a fissuração do concreto e depois em incrementos de 3 kN até sua ruína. A leitura dos extensômetros foi realizada através de sistema de aquisição de dados enquanto a leitura dos relógios

comparadores foi manual. O carregamento foi aplicado através de um atuador hidráulico, sendo a intensidade de força controlada através de célula de carga com capacidade de 500 kN.

Capítulo 5 Análise dos Resultados

Neste capítulo são descritos os modos de ruptura e a configuração das fissuras dos painéis ensaiados. São discutidas também as relações entre força e deformação e força e deslocamento. Os resultados obtidos pela teoria de flexão para concreto armado e o procedimento da FIP (FIP, 1982) também são comparados com os resultados experimentais. É apresentado um procedimento para se obter a linha neutra em painéis com interação parcial e, conseqüentemente, com descontinuidade na deformação da seção transversal.

5.1 Configuração das fissuras e forma de ruptura dos painéis.

Todos os painéis com núcleo preenchido com argamassa com 45% de Vermiculita Expandida apresentaram ruptura por flexão, independente da configuração do conector. Nestes painéis não foram observadas fissuras na região de cisalhamento e não houve deslizamento entre as placas e o núcleo. No modelo com duas linhas de conector (P-2L-PN-45) a primeira fissura ocorreu a 35% da carga de ruptura. As fissuras iniciaram-se no meio do vão do painel a partir da placa tracionada, estendendo-se ao longo da profundidade do painel até atingir a placa comprimida (Figura 5.1). A carga de ruptura foi de 71,85 kN.



Figura 5.1 – Configuração das fissuras no painel P-2L-PN-45.

No modelo com uma linha de conector (P-1L-PN-45) a primeira fissura devido à flexão ocorreu a 39% da carga de ruptura. A Figura 5.2-a mostra a configuração das fissuras deste painel. Apareceu uma fissura na interface com uma carga de 72% da carga de ruptura do painel (Figura 5.2-b). Esta fissura, no entanto, não afetou a resistência do painel, uma vez que ela surgiu entre os pontos de aplicação da força onde o esforço cortante é nulo. A carga de ruptura foi de 54,24 kN.



(a)



(b)

Figura 5.2 – Configuração das fissuras no painel P-1L-PN-45.

No modelo sem conector (P-SL-45) ocorreu fissuração precoce durante o processo de montagem do esquema de ensaio, comprometendo a fase elástica do painel. Isto, entretanto, não afetou a resistência do painel, uma vez que as deformações que surgiram na tela eletrosoldada foram muito inferiores à deformação de escoamento do aço. A Figura 5.3 mostra a configuração das fissuras deste painel. A carga de ruptura foi de 46,21 kN.



Figura 5.3 – Configuração das fissuras no painel P-SL-45.

No modelo com duas linhas de conectores apenas na região de cisalhamento (P-2L-CPN-45) a primeira fissura devido à flexão ocorreu a 39% da carga de ruptura. A Figura 5.4 mostra a configuração das fissuras deste painel. A carga de ruptura foi de apenas 38,57 kN. Mesmo com duas linhas de conectores e mesma resistência do núcleo, o painel apresentou carga de ruptura 46% menor que o modelo P-2L-PN-45. Isto provavelmente ocorreu devido à concentração de tensões no concreto ao se interromper o conector, o que pode ser comprovado pelo fato da maior fissura de flexão ter ocorrido onde esta interrupção encontrava-se, aproximadamente, na região de aplicação da carga.



Figura 5.4 – Configuração das fissuras no painel P-2L-CPN-45.

No modelo com duas linhas de conectores e conexão de placa a placa (P-2L-PP-45) a primeira fissura ocorreu a 45% da carga de ruptura. As fissuras iniciaram-se no meio do vão do painel pela placa tracionada, estendendo-se ao longo da profundidade do painel até atingir a placa comprimida (Figura 5.5). A carga de ruptura foi de 52,95 kN.



Figura 5.5 – Configuração das fissuras no painel P-2L-PP-45.

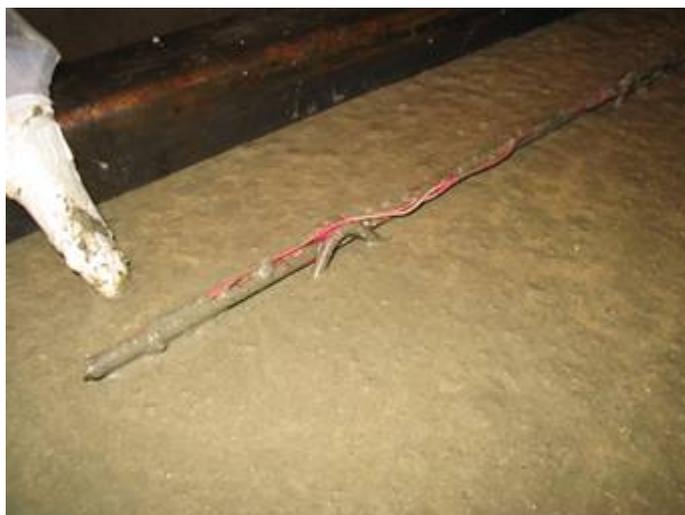
Foi ensaiado, também, um modelo com conexão placa a placa, mas com uma treliça de 10 cm de altura (P-2L-PP-45b). Como consequência da baixa altura da treliça, não houve ancoragem suficiente da mesma nas duas placas. Isto ocasionou uma ruptura devido à insuficiência de ancoragem na placa superior, caracterizada pela separação entre as placas seguida por ruptura por flexão da placa superior (Figura 5.6a e 5.6b). A Figura 5.6c mostra a concretagem deste painel antes execução da segunda placa, observa-se o pequeno comprimento do conector que ficou ancorado na segunda placa que foi a face tracionada no ensaio.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.6 – (a) e (b) Configuração das fissuras no painel P-2L-PP-45b (c) Segunda etapa da concretagem do painel P-2L-PP-45b.

A primeira fissura devido à flexão foi surgida com 43% da carga de ruptura e a primeira fissura na interface surgiu com 95% da carga de ruptura. A carga de ruptura foi de 45,36 kN. Esta força foi 14% inferior à do painel com ligação placa a placa e treliça com 12 cm de altura (P-2L-PP-45).

Quanto aos painéis com núcleo preenchido com argamassa com 100% de Vermiculita Expandida, ocorreram rupturas por flexão, por cisalhamento vertical e por cisalhamento horizontal na interface entre a placa e o núcleo.

No modelo com duas linhas de conectores (P-2L-PN-100) a primeira fissura ocorreu a 34% da carga de ruptura. A primeira fissura na interface e a fissura de cisalhamento vertical surgiram com 96% da carga de ruptura. A carga de ruptura, que ocorreu por flexão, foi de 53,34 kN (Figura 5.7).



Figura 5.7 – Configuração das fissuras no painel P-2L-PN-100.

Para o modelo com uma linha de conector (P-1L-PN-100) a primeira fissura ocorreu a 43% da carga de ruptura. A primeira fissura na interface surgiu com 78% da carga de ruptura. A carga de ruptura foi de 50,09 kN (Figura 5.8). A ruptura se deu provavelmente devido ao cisalhamento vertical no núcleo, porque apenas depois que as fissuras de cisalhamento vertical prolongaram-se até a interface é que as fissuras na interface, devido ao cisalhamento horizontal entre as placas, começaram a se destacar. O modo de ruptura será mais bem caracterizado através da comparação com os modelos analíticos.

Para o modelo sem conector (P-SL-100) a primeira fissura, devido à flexão, ocorreu a 30% da carga de ruptura. A primeira fissura na interface surgiu com 80% da carga de ruptura que foi de 30 kN (Figura 5.9). A ruptura foi caracterizada por

cisalhamento vertical ao longo da espessura do núcleo e pela ruptura na interface. A ruptura deste painel foi mais brusca que nos demais painéis. O modo de ruptura será mais bem caracterizado através da comparação com os modelos analíticos.



Figura 5.8 – Configuração das fissuras no painel P-1L-PN-100.



Figura 5.9 – Configuração das fissuras no painel P-SL-100.

Os painéis P-2L-PN-100, P-1L-PN-45 e P-SL-100 foram repetições dos painéis P-1L-PN-45b, P-2L-PN-100b, P-SL-100b que apresentaram problemas com o resultado experimental. A carga de ruptura obtida para estes três painéis foram, respectivamente, 49,66 kN, 56,11 kN e 52,50 kN. Os modelos P-1L-PN45 e P-2L-PN-100 apresentaram problemas com a rigidez, que ficou bem abaixo do esperado, sendo menor que a dos painéis sem conectores. Já o painel P-SL-100 que deveria apresentar o menor valor de carga de ruptura, apresentou carga máxima de 52,50 kN, cerca de 14 % superior ao valor obtido pelo painel P-SL-45.

Com exceção do modelo P-2L-PN-45 que apresentou interação total, os demais painéis com interação parcial apresentaram cargas de ruptura próximas. O modelo P-2L-PP-45 apresentou carga de ruptura 14,5% maior que o modelo P-SL-45,

provavelmente devido à contribuição da treliça na resistência à flexão, e 2,4% menor que o modelo P-1L-PN-45, onde praticamente não houve diferença. A diferença entre os valores foi maior comparando-se os painéis com interação total e parcial. O modelo P-2L-PN-45 apresentou carga de ruptura 36% maior que a do modelo P-2L-PP-45, mostrando que um painel com interação total pode fornecer maior resistência que um painel com interação parcial.

Tabela 5.1 – Resumo das resistências obtidas no ensaio experimental.

Descrição	Carga de Ruptura (kN)	Modo de Ruptura
P-2L-PN-45	71,85	flexão
P-2L-PN-100	53,34	flexão
P-1L-PN-45	54,24	flexão
P-1L-PN-100	50,09	Cisalhamento
P-SL-45	46,21	flexão
P-SL-100	30,00	Cisalhamento
P-2L-PP-45	52,95	flexão
P-2L-CPN-45	38,57	flexão
P-2L-PP-45b	45,36	flexão
P-2L-PN-100b	56,11	flexão
P-1L-PN-45b	49,66	flexão
P-SL-100b	52,50	Cisalhamento

5.2 Curva força x deformação do aço e do concreto

Através dos dados obtidos experimentalmente, foram traçados gráficos relacionando a força e a deformação do concreto e do aço. O gráfico da Figura 5.10 mostra a deformação na tela eletrosoldada tracionada para os painéis com núcleo preenchido por argamassa com 45% de Vermiculita Expandida.

Observa-se neste gráfico que para os painéis com conexão placa a núcleo o aumento do número de linhas de conectores forneceu um aumento na carga de ruptura. O painel com duas linhas de conector foi 32% mais resistente que o painel com uma linha de

conector e 55% mais resistente que o painel sem conector. Comparando-se os painéis P-2L-PN-45, com ligação placa a núcleo, e P-2L-PP-45, com ligação placa a placa, observa-se uma carga de ruptura 36% maior para o modelo com conexão placa a núcleo. Isto provavelmente ocorreu porque o painel com conexão placa a núcleo tem uma linha de conector representada por duas treliças, enquanto que o painel com conexão placa a placa tem uma linha de conector representada por apenas uma treliça. Isto implica em um maior número de diagonais para o modelo P-2L-PN-45 o que fornece maior rigidez ao painel e também uma maior resistência. Quanto aos valores de deformação do aço, observa-se escoamento do aço em todos os painéis antes da plastificação do concreto, caracterizando que a ruína do painel ocorreu no domínio 2 conforme a teoria de flexão do concreto armado.

O gráfico da Figura 5.11 mostra a deformação na tela eletrosoldada tracionada para os painéis com núcleo preenchido por argamassa com 100% de Vermiculita Expandida. Neste gráfico aparece novamente a curva correspondente ao painel P-2L-PP-45 que foi considerado referência por se tratar de um modelo de conexão (placa-placa) usado comercialmente.

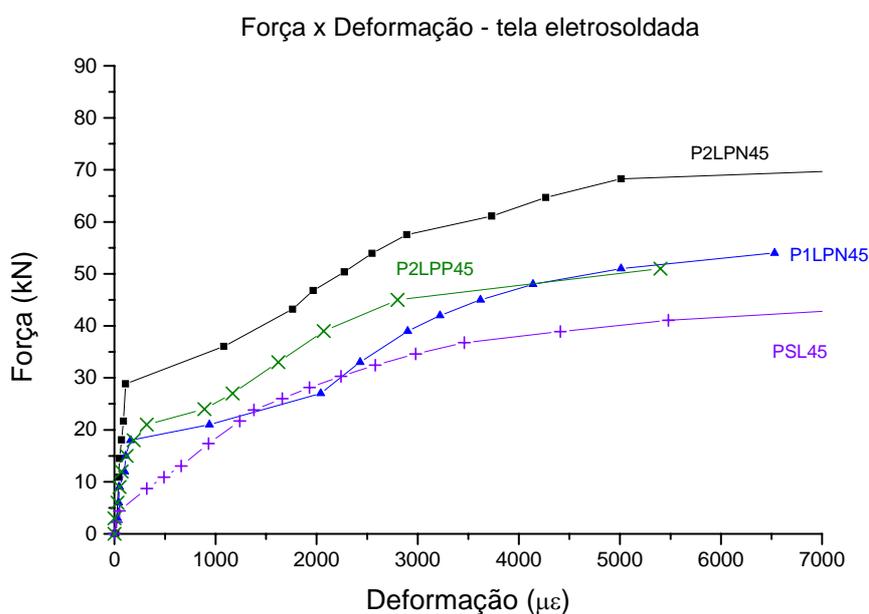


Figura 5.10 – Gráfico Força x Deformação na tela eletrosoldada – Painéis com 45% de Vermiculita.

Neste caso, não houve influência do conector nos modelos P-2L-PN-100 e P-1L-PN-100 com duas e uma linha de conector, respectivamente. A diferença entre as cargas de ruptura foi de apenas 6%. A carga de ruptura do modelo P-2L-PP-45, com ligação placa a placa, foi apenas 5,7% maior que a carga de ruptura do modelo P-1L-PN-100 e 2% menor que a carga de ruptura do modelo P-2L-PN-100. Entretanto, para o modelo P-SL-100, sem linha de conector, a carga de ruptura foi 43% menor que no modelo P-2L-PP-45. Isto provavelmente ocorreu devido sua ruptura ter sido por cisalhamento horizontal na interface entre a placa e o núcleo, como será mostrado posteriormente através dos modelos analíticos. Quanto aos valores da deformação do aço, observa-se escoamento do aço tracionado em todos os painéis, exceto no painel P-SL-100.

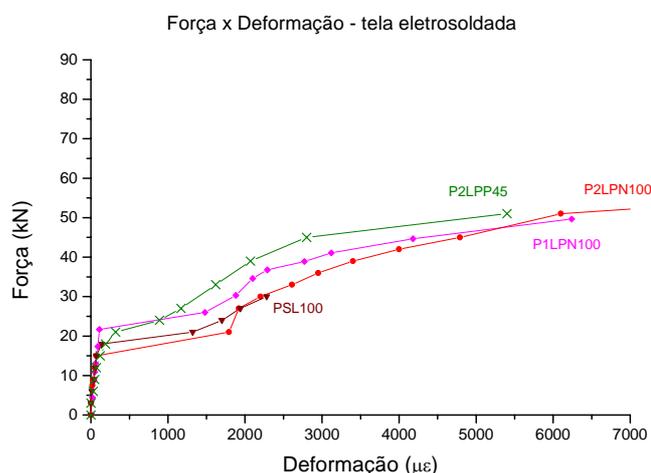


Figura 5.11 - Gráfico Força x Deformação na tela eletrosoldada – Painéis com 100% de Vermiculita.

O gráfico da Figura 5.12 mostra a deformação do concreto para os painéis com núcleo preenchido por argamassa com 45% de Vermiculita Expandida. Com relação à deformação no concreto, verifica-se que os valores de deformação última entre os modelos P-2L-PN-45 e P-1L-PN-45, com duas e uma linha de conector, apresentaram uma diferença de apenas 20%. O modelo P-2L-PP-45, com ligação placa a placa, apresentou uma deformação última 21% menor que a dos modelos P-2L-PN-45 e P-1L-PN-45, enquanto o modelo P-SL-45, sem conector, apresentou uma deformação última 35% menor que a do modelo P-2L-PP-45.

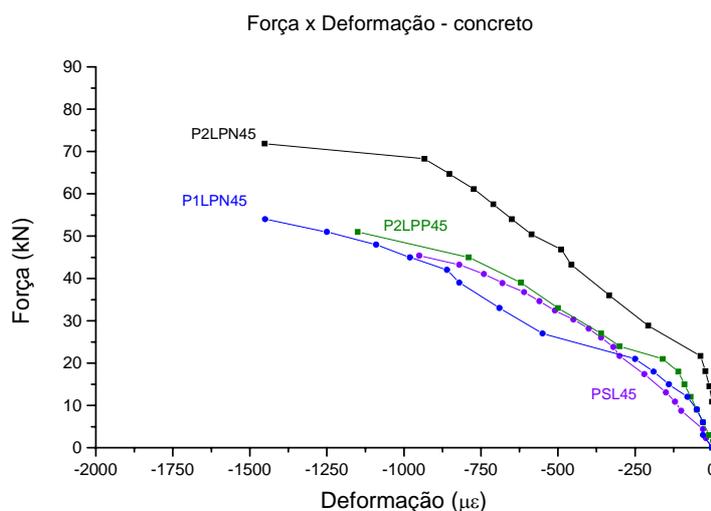


Figura 5.12 – Gráfico Força x Deformação no concreto – Painéis com 45% de Vermiculita.

O gráfico da Figura 5.13 mostra a deformação do concreto para os painéis com núcleo preenchido por argamassa com 100% de Vermiculita Expandida.

Observa-se que a contribuição dos conectores quando o núcleo fornece menor resistência é pequena. Neste caso, o modelo P-2L-PP-45, com ligação placa a placa, apresentou uma deformação 21% menor que a do modelo P-2L-PN-100 com ligação placa a núcleo. A diferença foi maior para o modelo P-SL-100 tanto em termos de resistência quanto em termos de deformação. Isto ocorreu porque este painel apresentou ruptura brusca na interface entre a placa e o núcleo antes que o mesmo atingisse sua resistência à flexão.

As deformações das diagonais das treliças também foram medidas para uma melhor análise do comportamento dos painéis.

Observa-se pelos gráficos das Figuras 5.14 e 5.15 que o comportamento dos painéis ao esforço cortante é semelhante ao modelo idealizado por Ritter e Morsch, que admite que logo após a fissuração uma viga retangular de concreto armado funciona como uma treliça. Os painéis apresentaram diagonais comprimidas e tracionadas, apresentando maiores deformações nas diagonais perpendiculares às fissuras, ou seja, nas diagonais tracionadas que funcionaram como armadura transversal à fissura. Pode-se dizer que o conector tipo treliça com diagonal inclinada resiste tanto ao cisalhamento vertical provocado pelo esforço cortante quanto ao cisalhamento horizontal na interface. Portanto,

pode-se dizer que ele trabalha tanto como estribo quanto como um dispositivo para garantir a conexão entre as placas.

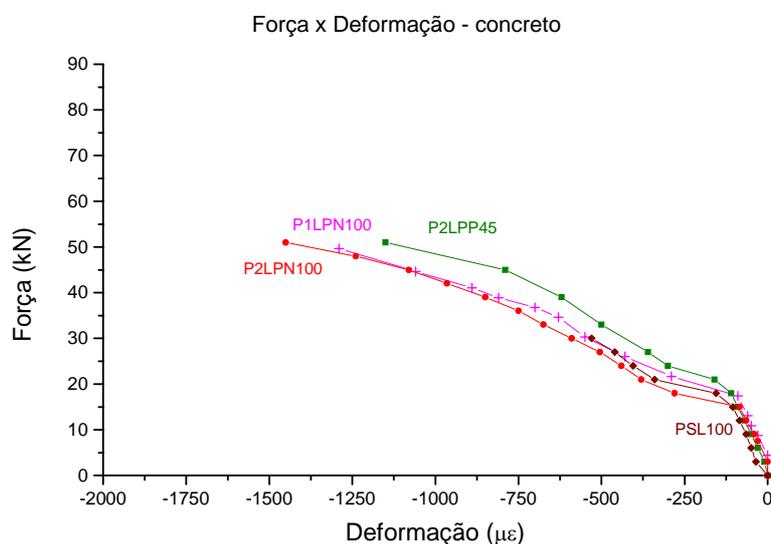


Figura 5.13 – Gráfico Força x Deformação concreto – Painéis com 100% de Vermiculita.

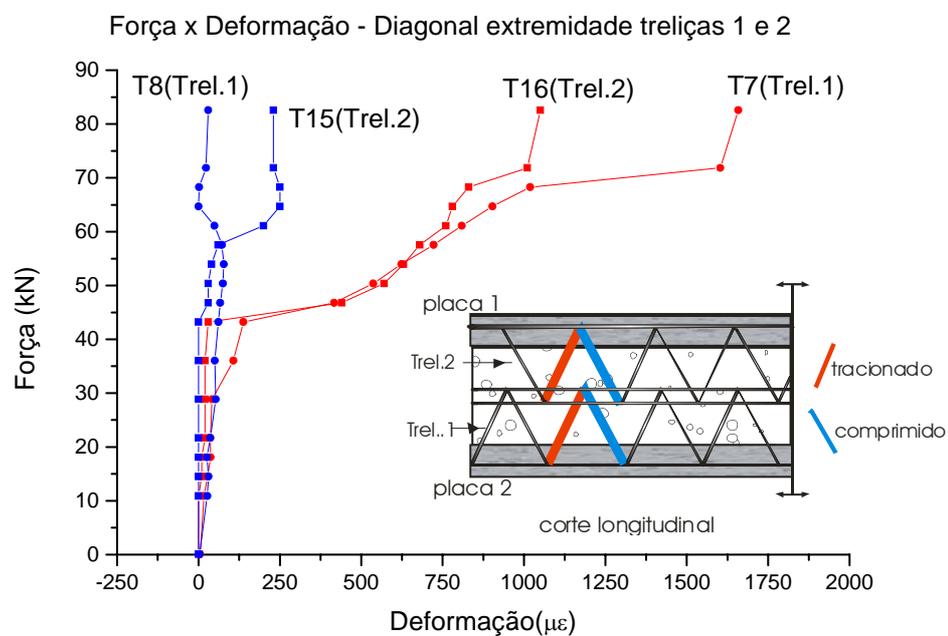


Figura 5.14 – Gráfico Força x Deformação Diagonal Treliça 1 e 2 – P-2L-PN-45

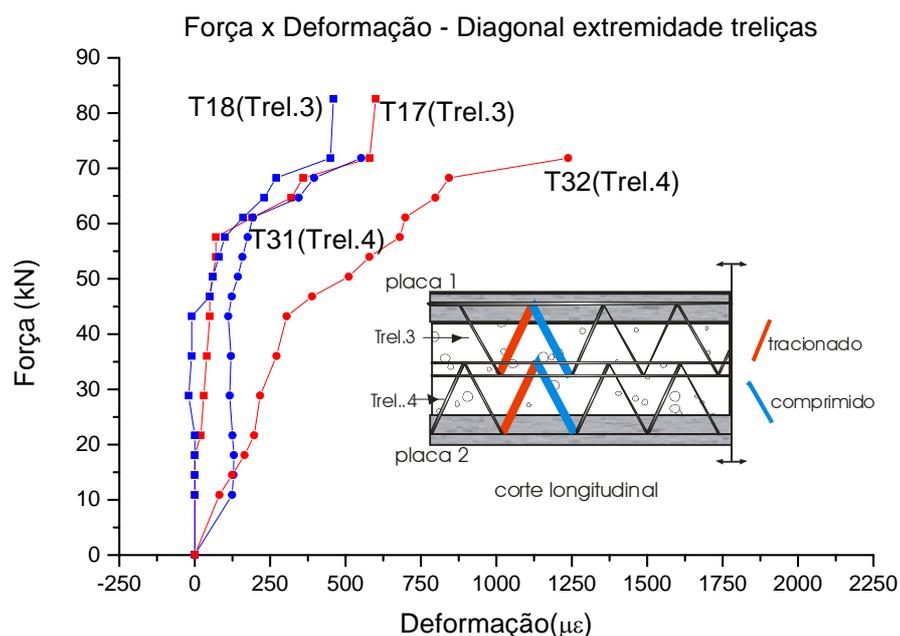


Figura 5.15 – Gráfico Força x Deformação Diagonal Treliça 3 e 4 – P-2L-PN-45.

Os gráficos das Figuras 5.16 a 5.19 mostram as deformações nas diagonais em ambas as extremidades de uma mesma treliça do painel P-2L-PN-45. Observam-se valores diferentes nas deformações, tanto na diagonal tracionada quanto na diagonal comprimida, apesar da simetria. Pode ter havido pequena rotação em torno da largura do painel o que implicou em uma distribuição não homogênea da carga durante o ensaio do painel. Isto pode ter acontecido também ao longo do comprimento do painel, solicitando-se mais um lado do que o outro. Evidentemente, a diferença é foi pequena não acarretando em problemas na análise do comportamento do painel.

Quanto à influência do número de linhas de conector na deformação das diagonais das treliças, observa-se pelo gráfico da Figura 5.20 que a deformação da diagonal tracionada no modelo P-1L-PN-100, com uma linha de conector, é maior que no modelo P-2L-PN-100 com duas linhas de conector. Uma possível explicação é que no modelo com duas linhas de conector os esforços são divididos entre quatro treliças enquanto no modelo com uma linha estes esforços são distribuídos em duas treliças. Portanto, os esforços nas diagonais do painel P-1L-PN-100 serão maiores.

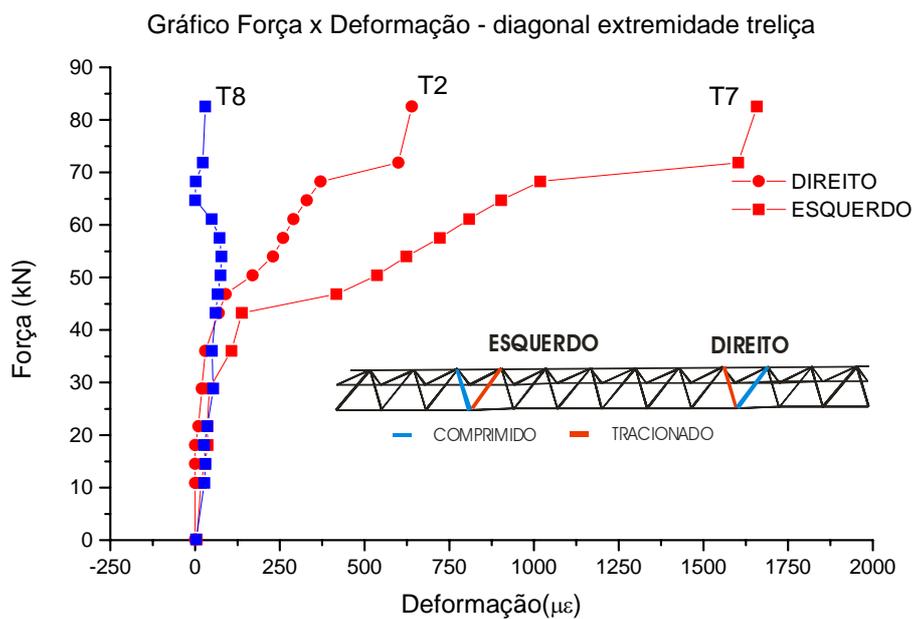


Figura 5.16 – Gráfico Força x Deformação Diagonal Treliça 1 – P-2L-PN-45.

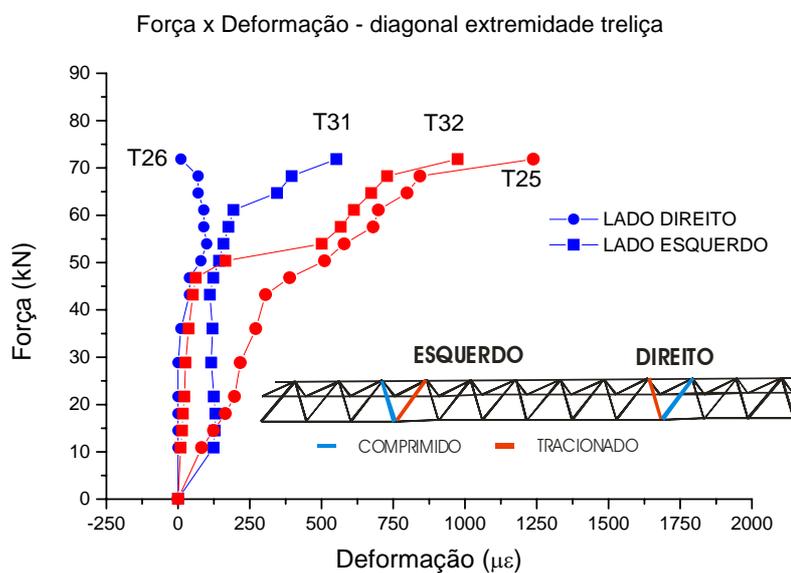


Figura 5.17 – Gráfico Força x Deformação Diagonal Treliça 4 – P-2L-PN-45.

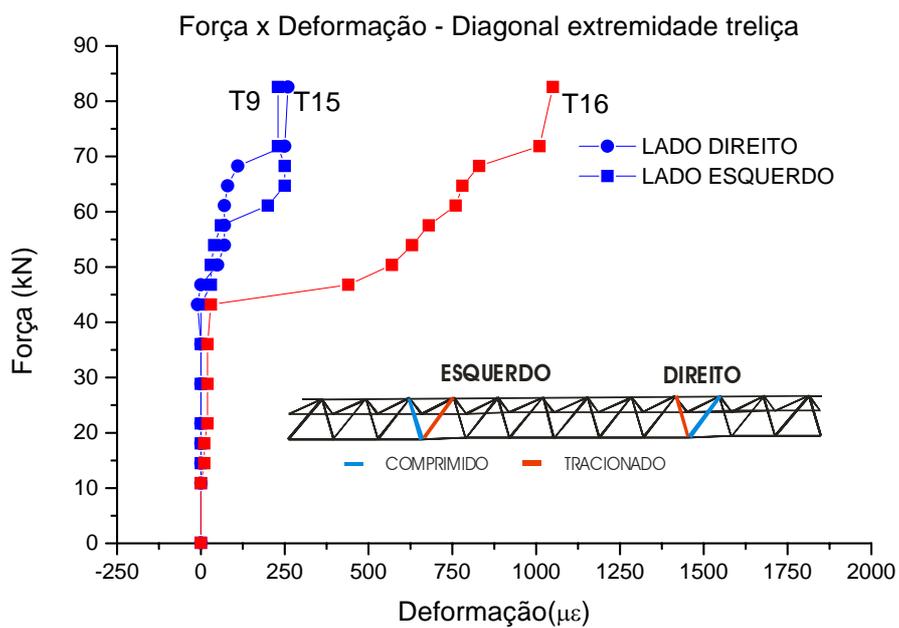


Figura 5.18 – Gráfico Força x Deformação Diagonal Treliça 2 – P-2L-PN-45.

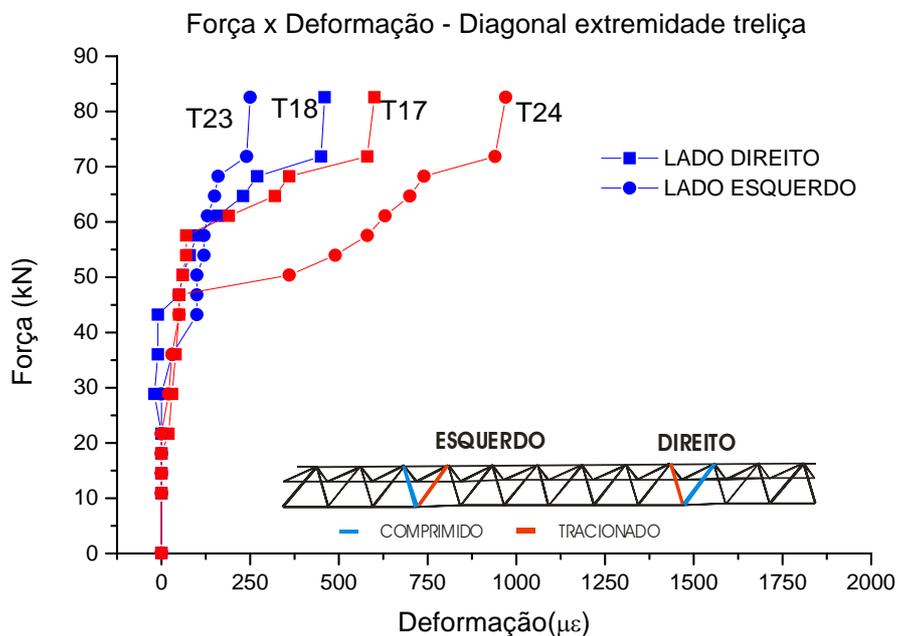


Figura 5.19 – Gráfico Força x Deformação Diagonal Treliça 3 – P-2L-PN-45.

Uma outra hipótese seria o modo de ruptura, que para o painel P-1L-PN-100 foi por cisalhamento vertical enquanto que no P-2L-PN-100 a ruptura foi por flexão.

Portanto, o modelo com apenas uma linha de conector estaria mais propício a romper por cisalhamento porque a taxa de armadura de cisalhamento foi reduzida pela metade sendo que a carga de ruptura permaneceu praticamente a mesma para os dois painéis. Contudo, devido o aço da diagonal não ter escoado, pode-se concluir que a ruptura por cisalhamento foi acompanhada por fissuras na interface, sendo a ruptura ocasionada pela atuação conjunta das fissuras na interface e de cisalhamento.

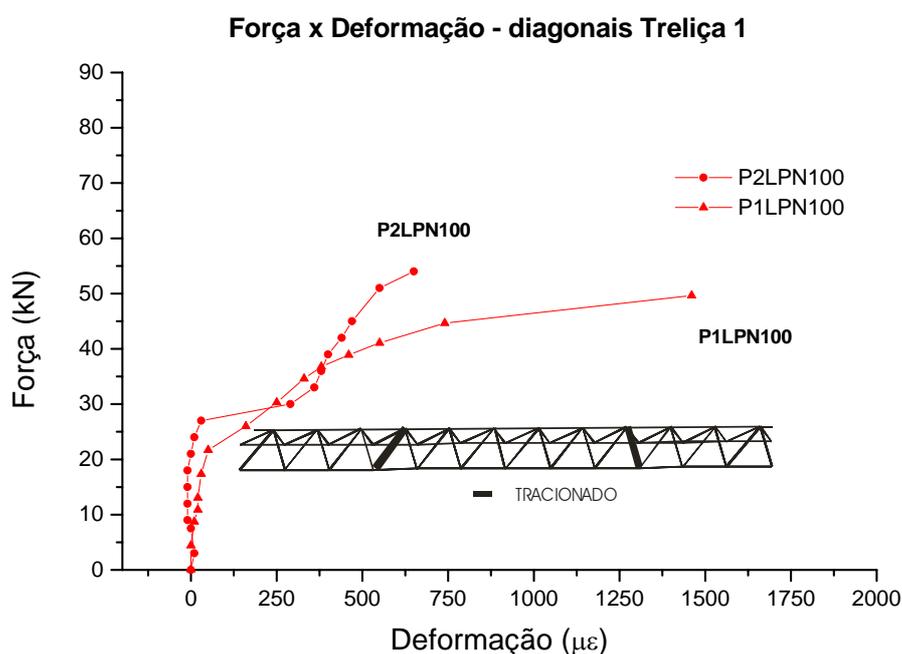


Figura 5.20 – Gráfico Força x Deformação Diagonais Treliça 1 – Painéis com 100% de Vermiculita.

A deformação das diagonais das treliças nos painéis com núcleo preenchido por argamassa com 45% de Vermiculita Expandida é apresentada pelo gráfico da Figura 5.21. Observa-se que a deformação última da diagonal tracionada para os modelos P-2L-PN-45 e P-1L-PN-45, com duas e uma linhas de conector, respectivamente, são praticamente iguais. Diferentemente dos painéis com núcleo com 100% de Vermiculita Expandida, estes painéis apresentam uma maior participação do núcleo na resistência ao cisalhamento do painel. Portanto, é possível que a deformação da treliça para estes painéis não seja alterada pelo número de conectores do painel, já que uma parcela maior do esforço cortante é resistida por um núcleo mais resistente, restando uma pequena parcela a ser distribuída aos conectores.

Observa-se e pelo gráfico da Figura 5.21 que o modelo P-2L-CPN-45 acompanhou o modelo P-2L-PN-45, mas rompeu com carga menor, o que aponta para uma falha neste modelo de configuração de conectores devido à indução de tensões no concreto.

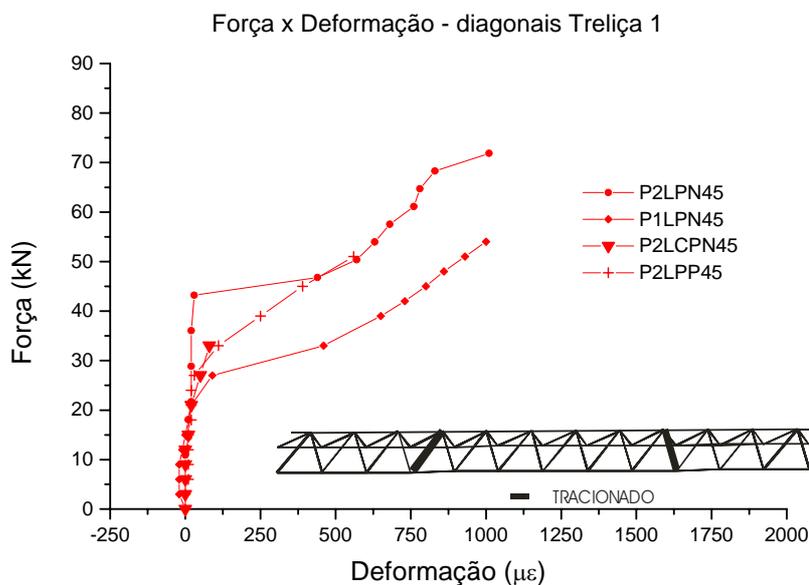
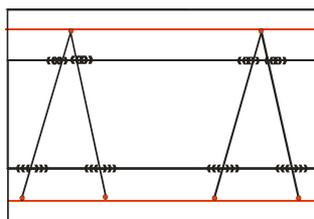


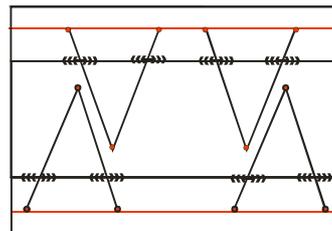
Figura 5.21 – Gráfico Força x Deformação Diagonais Tracionadas Treliza 1 – Painéis com 45% de Vermiculita.

Quanto ao modelo P-2L-PP-45, com ligação placa a placa, observa-se uma deformação última menor que nos modelos com conexão placa a núcleo. Apesar do comportamento deste painel ser considerado com interação parcial, o conector encontra-se ancorado nas placas de concreto, enquanto nos modelos placa a núcleo o conector encontra-se ancorado em uma placa e no núcleo do painel.

Pode-se considerar como aproximação da condição de contorno dos conectores para o modelo P-2L-PP-45 engastamento em todas as extremidades do conector (Figura 5.22-a). Para a conexão placa a núcleo pode-se adotar engastamento na região ancorada na placa e possibilidade de rotação na região ancorada no núcleo (Figura 5.22-b). Se estas condições de contorno estiverem próximas do modelo real de ancoragem, as diagonais do modelo P-2L-PP-45 seriam mais rígidas que as diagonais do modelo P-2L-PN-45 e, portanto apresentariam menores deformações.



(a) ligação placa a placa



(b) ligação placa a núcleo

Figura 5.22 – Condição de contorno do conector.

Foram medidas também as deformações dos banzos superior e inferior das treliças, obtendo-se os gráficos das Figuras 5.23 a 5.26. Observa-se que os banzos inferiores das treliças fixadas na tela tracionada obtiveram deformações semelhantes às apresentadas pela tela eletrosoldada. Os banzos superiores também se comportaram como armadura de flexão.

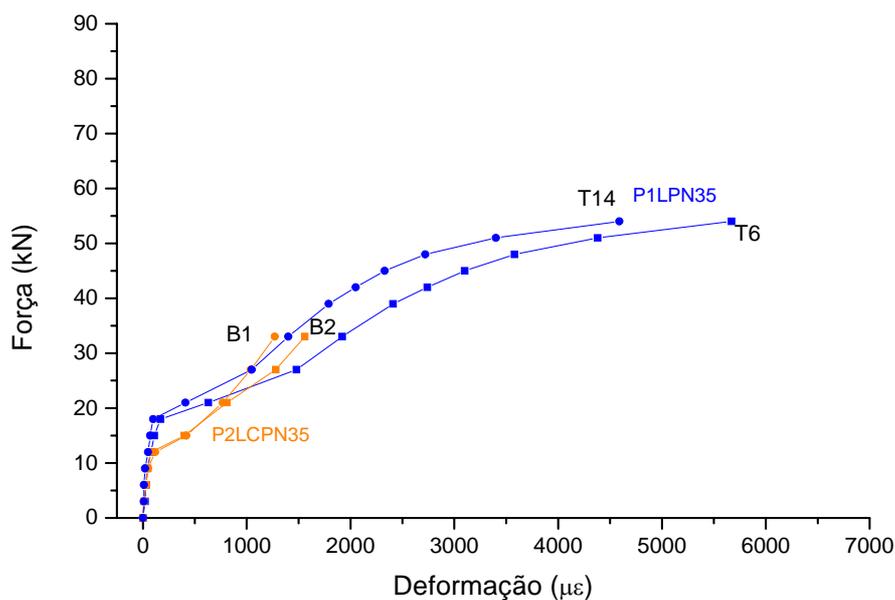


Figura 5.23 – Gráfico Força x Deformação Banzo Inferior para painéis com 45% de Vermiculita..

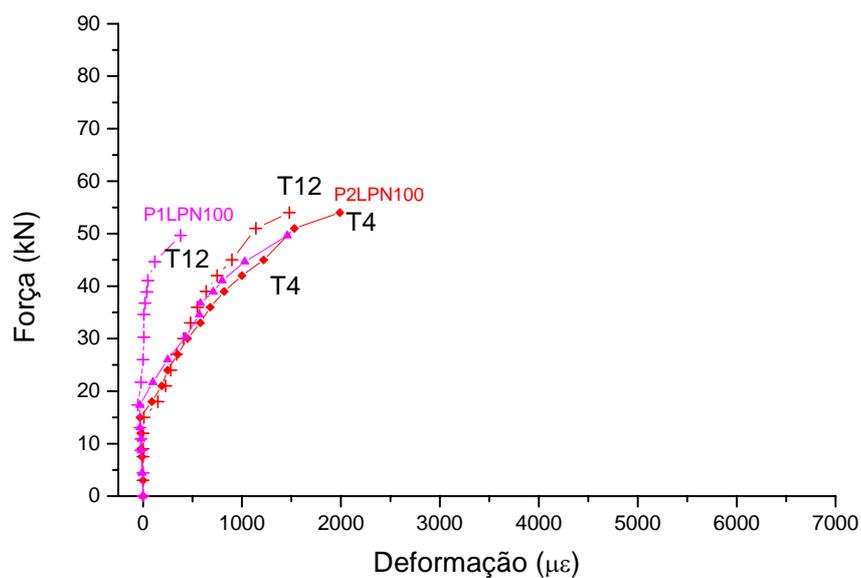


Figura 5.24 – Gráfico Carga x Deformação Banzo Superior para painéis com 100% de Vermiculita.

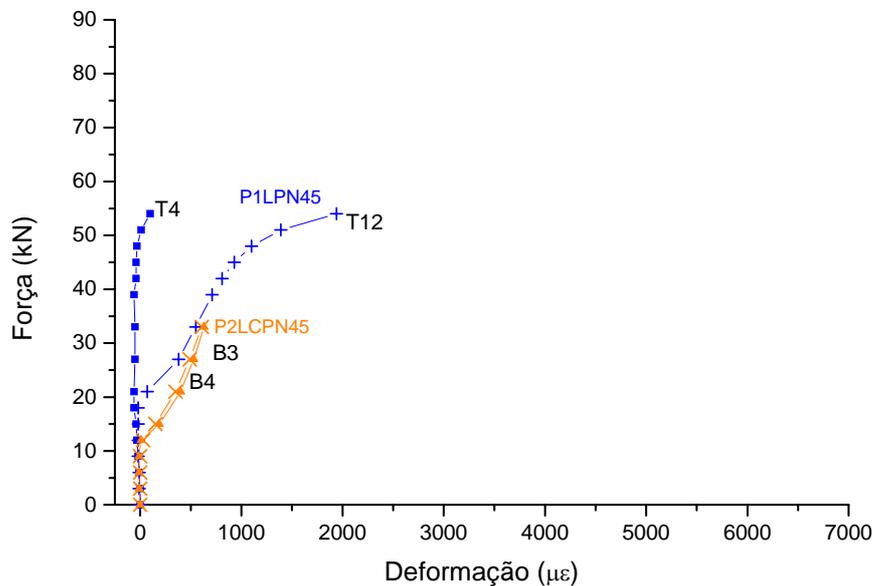


Figura 5.25 – Gráfico Força x Deformação Banzo Superior para painéis com 45% de Vermiculita.

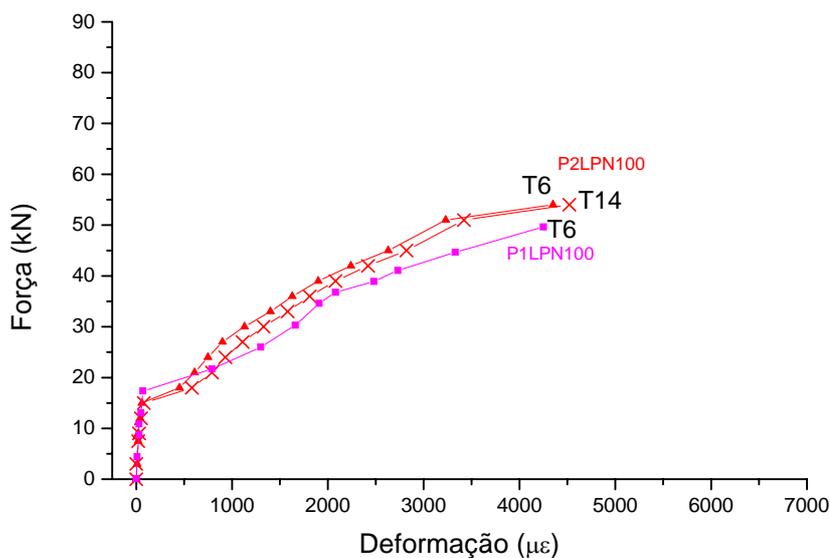


Figura 5.26 – Gráfico Força x Deformação Banzo Inferior para painéis com 100% de Vermiculita.

5.3 Curva força x deslizamento da interface

Durante os ensaios dos painéis não foram observados deslocamentos horizontais relativos entre as placas através do relógio comparador, provavelmente porque o conector tipo treliça e a aderência do núcleo forneceram uma ligação não dúctil. Portanto, não foi possível a leitura de deslizamento entre as placas, porque este ocorreu quando o painel atingiu a ruptura. Uma forma utilizada para quantificar o deslizamento entre as placas foi através da deformação de deslizamento. Esta deformação foi obtida graficamente prolongando-se a linha neutra obtida pela deformação da seção transversal a meio vão até a interface. Foram obtidos valores de deformação na ordem de $1000 \mu\epsilon$, um valor que forneceria um deslizamento em torno de $0,07 \text{ mm}$ no meio do vão do painel. Este valor de deslizamento poderia ter sido lido pelo relógio comparador com precisão de $0,01 \text{ mm}$. Entretanto, segundo Pessiki e Mlynarczyk (2003) foi observado que a deformação da seção transversal não se mantém constante ao longo do comprimento do painel. Portanto, possivelmente o deslizamento deve ser menor na região de cisalhamento ao longo do vão do painel, região onde estavam posicionados os relógios.

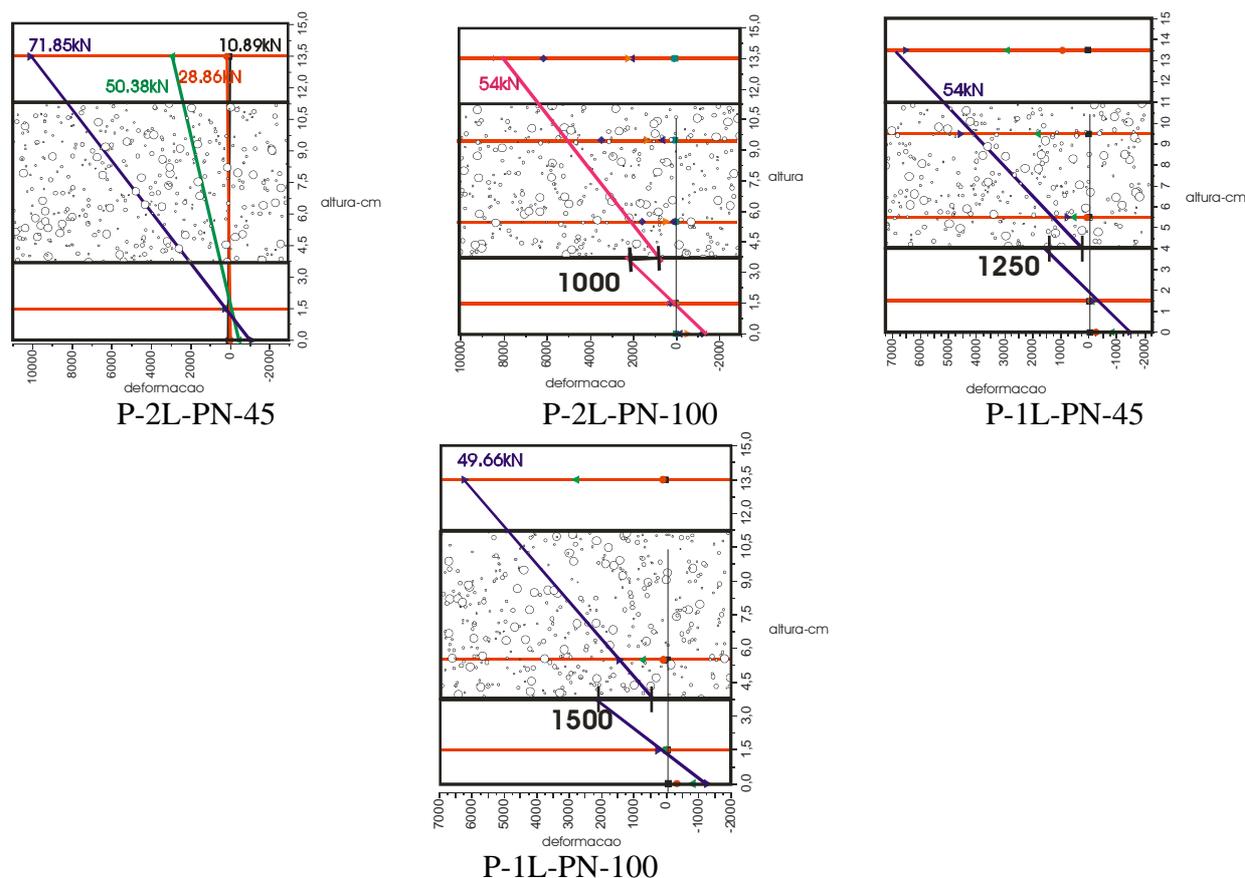


Figura 5.27 – Deformação de deslizamento no meio do vão do painel.

A Figura 5.27 mostra um esquema provável do deslizamento máximo considerando que a descontinuidade da linha neutra ocorra na interface para os modelos P-1L-PN45, P-1L-PN-100 e P-2L-PN-100. Observa-se que não há grandes diferenças entre as deformações de deslizamento dos painéis, independente da resistência do núcleo e do número de linhas de conector. Isto, provavelmente, porque os painéis apresentaram valores de grau de interação próximos, apresentando curvatura semelhante conforme apresentado pela Figura 5.27. Observa-se também, que o painel P-2L-PN-45 apresentou interação total não apresentando deslizamento na interface.

5.4 Análise teórica dos momentos de fissuração e dos modos de ruptura dos painéis

A Tabela 5.2 apresenta os valores de momento de fissuração teórico e experimental. O modelo P-SL-100 foi o que apresentou maior diferença entre o valor experimental e teórico, provavelmente por problemas no ensaio.

O modelo P-2L-PN-45, que teve interação total, e o modelo P-2L-PP-45, com interação parcial, mas cujo comportamento mais se aproximou de uma interação total, apresentaram momento de fissuração experimental superior ao teórico de maneira mais significativa. Os modelos com uma linha de conector (P-1L-PN-45 e P-1L-PN-100) praticamente apresentaram os mesmos valores de momento de fissuração experimental e teórico. O painel P-SL-100 foi o que apresentou a maior diferença entre o momento de fissuração teórico e o experimental, seguido do modelo P-2L-CPN-45 cuja ruptura se deu na região onde as treliças foram interrompidas. A fissuração precoce do modelo P-SL-100 provavelmente foi devido a problemas durante o ensaio.

Tabela 5.2 – Relação entre os momentos de fissuração teórico e experimental

Descrição	$M_{cr_teorico}$ (kNm)	$M_{cr_exp.}$ experimental (kNm)	$M_{cr_teorico} /$ experimental
P-2L-PN-45	7,25	11,18	0,65
P-2L-PN-100	7,97	6,98	1,14
P-1L-PN-45	7,80	8,14	0,96
P-1L-PN-100	8,27	8,40	0,98
P-SL-45	7,51	*	*
P-SL-100	9,08	3,49	2,60
P-2L-PP-45	7,34	9,30	0,79
P-2L-CPN-45	8,39	5,81	1,44
$M_{cr_teorico} = \frac{0,9.1,2.f_{td}.IT}{(h - \bar{y})}$ <p>Onde, IT – Momento de inércia da seção transformada e fissurada; f_{td} – resistência à tração do concreto por compressão diametral; h – espessura do painel; \bar{y} – centróide do painel</p>			

*Fissuração prematura do painel devido a erro de procedimento no esquema de ensaio.

A Tabela 5.3 mostra um resumo das resistências ao cisalhamento e à flexão obtidas pela teórica de concreto armado e da resistência na interface obtida pelo

procedimento da FIP (FIP,1982). É apresentada também a carga de ruptura obtida nos ensaios, o modo de ruptura e as resistências mecânicas dos componentes (placa+núcleo) do painel. Na relação entre carga última teórica e experimental foi considerado o menor valor de carga última obtida pelos métodos analíticos.

Para os painéis com 100% de Vermiculita observou-se uma resistência nas bielas comprimidas menor que na armadura transversal (conector).

A previsão teórica do modo de ruptura foi coerente com os resultados experimentais com mostra a Tabela 5.3. Os painéis que romperam por flexão apresentaram carga última próxima ao valor teórico com exceção do painel P-2L-PN-45, único modelo com interação total. O painel P-1L-PN-100 apresentou ruptura por cisalhamento conforme previsto teoricamente. Entretanto, observando-se a deformação das diagonais da treliça na região entre o ponto de aplicação de carga e o apoio, verifica-se que não houve escoamento do aço dessas diagonais (Figura 5.20). Provavelmente, a ruptura foi auxiliada pela formação de fissuras na interface e não apenas por fissuras devido ao cisalhamento vertical.

Não houve grandes variações em termos de resistência à flexão por se manter a mesma taxa de armadura de flexão em todos os painéis, tanto experimentalmente quanto teoricamente, com exceção do P-2L-PN-45, que apresentou interação total entre as placas.

Tabela 5.3 – Resumo das resistências mecânicas dos painéis.

Modelo	Cort.	Flexão	Resist. Interf.	f _{cm} (MPa)		f _{ctm} (MPa)		F _{exp} kN	Teorico/ Exp	Modo de Ruptura
	kN	kN		kN	placa	núcleo	placa			
P-2L-PN-45	118,9	52,3	460,5	36,0	8,6	3,1	1,63	71,9	0,73	Flexão
P-2L-PN-100	46,6	52,7	371,8	40,3	3,3	3,4	0,59	53,3	0,99	Flexão
P-1L-PN-45	98	51,0	275,9	34,6	8,6	3,3	1,35	54,2	0,94	Flexão
P-1L-PN-100	34,0	50,0	197,4	34,4	2,4	3,4	0,43	50,1	0,68	Cisalh.
P-SL-45	56,5	41,9	120,2	34,1	10,1	3,1	1,41	46,2	0,91	Flexão
P-SL-100	16,0	53,8	34,1	36,7	2,7	3,8	0,40	30,0	0,53	Cisalh.
P-2L-PP-45	104,8	47,9	415,1	32,9	9,6	2,9	1,52	53,0	0,90	Flexão
P-2L-CPN-45	98,8	41,8	382,1	35,2	7,1	3,5	1,15	38,6	1,08	Flexão

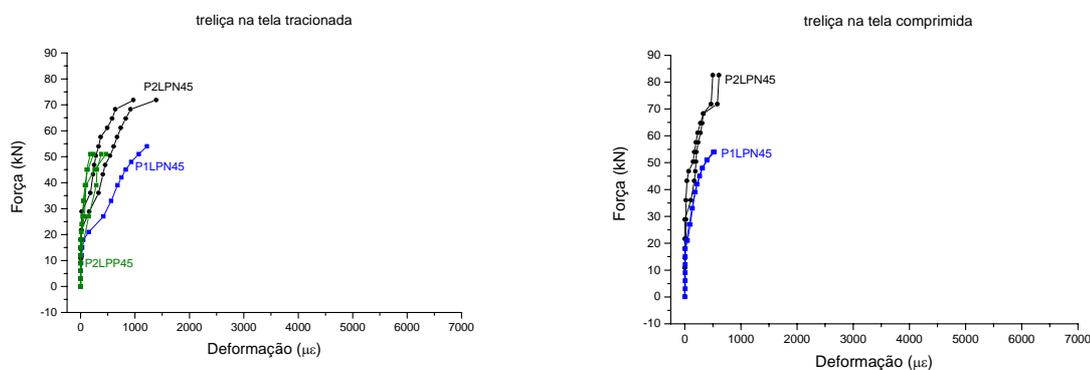
Nota: Na resistência à flexão do painel foi considerada a contribuição das diagonais da treliça.

A Tabela 5.4 mostra a contribuição das diagonais da treliça na resistência à flexão que foi computada através do valor da deformação das diagonais na carga última do painel. Como o aço não estava em escoamento, determinou-se a força em cada diagonal pela lei de Hooke. Esta força foi aplicada nos nós da diagonal e a sua componente horizontal foi adicionada no cálculo da resistência à flexão como uma parcela adicional na resultante de tração na seção transversal.

Tabela 5.4 - Contribuição da treliça na resistência à flexão do painel.

Descrição	Flexão - kN	
	Considerando a diagonal	Sem considerar a diagonal
P-2L-PN-45	52,25	50,96
P-2L-PN-100	52,65	51,17
P-1-LPN-45	51,02	49,61
P-1L-PN-100	49,98	48,68
P-SL-45	-	41,88
P-SL-100	-	53,82
P-2L-PP-45	47,87	46,42
P-2L-CPN-45	41,81	41,81

Os gráficos das Figuras 5.27 e 5.28 mostram a deformação das diagonais no meio do vão. Observa-se que para os painéis com 45% de Vermiculita, que romperam por flexão, houve uma deformação maior das diagonais localizadas na treliça fixada na tela tracionada. Para painéis com 100% de Vermiculita Expandida que romperam por deslizamento ou devido ao cisalhamento vertical não houve deformações significativas.



(a)

(b)

Figura 5.28 – Gráfico Força x Deformação – Diagonais no meio do vão para painéis com 45% de Vermiculita.

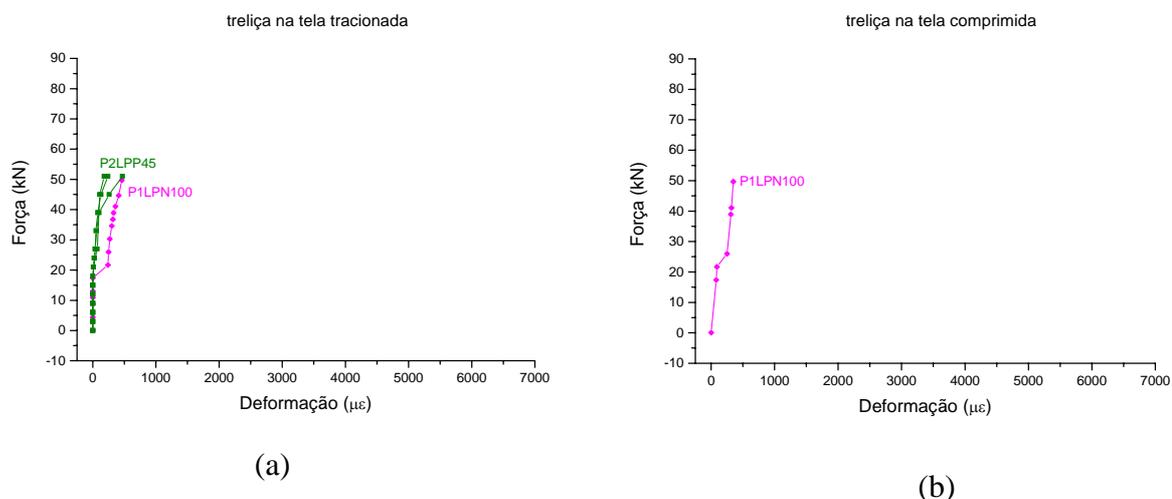


Figura 5.29 – Gráfico Força x Deformação – Diagonais no meio do vão para painéis com 100% de Vermiculita.

Nota: No modelo P-2L-PN-100 não teve as diagonais centrais instrumentadas por extensômetros elétricos.

Pode-se dizer, portanto, que para os painéis onde a ruptura foi por flexão as diagonais contribuíram na resistência aos esforços de flexão, o que explicaria as maiores deformações apresentadas pelo gráfico da Figura 5.28 a.

A Tabela 5.5 mostra a resistência da interface, determinada pelo procedimento da FIP (FIP, 1982), e a resultante de tração na seção transversal do painel. Os painéis com resistência da interface maior que a resultante de tração podem ser considerados compostos, uma vez que nestes casos a ruptura não será na interface. Entretanto, o painel P-SL-45, que teoricamente teria resistência da interface menor que a resistência à tração e, portanto, deveria romper na interface, rompeu por flexão. Para o painel P-1L-PN-100, houve incoerência também entre a Tabela 5.5 e o resultado experimental. De acordo com o ensaio a ruptura ocorreu por cisalhamento vertical e horizontal, portanto, o painel por apresentar ruptura na ligação ao atingir a carga máxima deveria ser classificado quanto ao grau de composição em não-composto. Pela relação entre resistência na interface e resistência à tração do painel este modelo deveria ser classificado quanto ao grau de composição em composto. Ambos os modelos (P-SL-45 e P-1L-PN-100) apresentaram um valor de grau de composição fornecido pela Tabela 5.4 próximo do valor unitário. Pode-se dizer, portanto, que possivelmente os modelos se encontram entre o limite de um comportamento composto e não-composto, havendo, portanto, confusão quanto a classificação do grau de composição.

Tabela 5.5 – Comparação entre a resistência da interface e a resistência à tração.

Painel	Interface	Tração	Interf./Tração	Composição	Interação
P-2-LPN-45	460,50	209,60	2,20	Composto	Total
P-2L-PN-100	371,84	208,60	1,78	Composto	Parcial
P-1-LPN-45	275,86	181,80	1,52	Composto	Parcial
P-1L-PN-100	197,43	175,40	1,13	Composto	Parcial
P-SL-45	120,20	127,30	0,94	Não-composto	Parcial
P-SL-100	34,10	162,70	0,21	Não-composto	Parcial
P-2L-PP-45	451,12	150,80	2,99	Composto	Parcial
P-2L-CPN-45	382,07	127,30	3,00	Composto	Parcial

O caso do painel P-SL-100 merece uma análise mais cuidadosa. O gráfico da Figura 5.29 apresenta uma comparação entre diversos métodos de cálculo utilizados para calcular a resistência na interface de peças compostas. Verifica-se que para baixas taxas de armadura transversal à interface, os procedimentos apresentam mudanças bruscas na resistência em virtude da introdução de armadura mínima. Nessa região a parcela mais importante na resistência da interface é representada pela aderência entre os dois diferentes elementos. Há uma grande dispersão nos resultados experimentais devido à aderência, e os métodos de cálculo tendem a subestimar a resistência da interface. Com o aumento da taxa de armadura ocorre o aumento da resistência da interface. Atingida certa taxa, a viga comporta-se como uma peça monolítica e a resistência da interface passa a ser controlada pelo concreto (Araújo & El Debs, 1998).

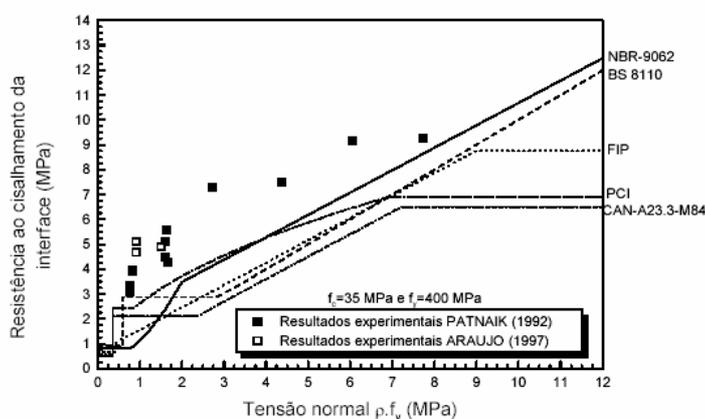


Figura 5.30 – Relação entre os procedimentos para cálculo da resistência da interface e resultados experimentais (Araújo & El Debs, 1998).

Entretanto o painel P-SL-100, sem nenhum conector, rompeu por cisalhamento na interface com uma carga próxima da fornecida pela FIP. O procedimento da FIP forneceu um valor 14 % maior que o valor experimental, portanto, este procedimento não subestimou a resistência na interface quando apenas a aderência entre o concreto e o isolante resista aos esforços de cisalhamento horizontal.

5.5 Curva força – deslocamento vertical

Através dos dados obtidos experimentalmente, foram traçados gráficos relacionando força e deslocamento. O gráfico da Figura 5.30 mostra a relação entre carga e deslocamento vertical no meio do vão para os painéis com núcleo preenchido por argamassa com 45% de Vermiculita Expandida.

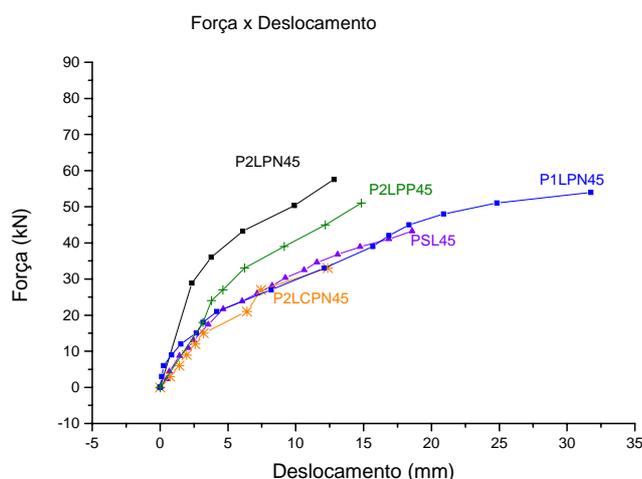


Figura 5.31 - Gráfico Força x Deslocamento – Painéis com 45% de Vermiculita.

O modelo P-2L-PN-45, com duas linhas de conector, foi o que apresentou maior rigidez seguido do modelo P-2L-PP-45 com ligação placa a placa. A queda na rigidez é significativa entre o modelo P-2L-PN-45 e o modelo P-1L-PN-45 com uma linha de conector. Entretanto, não se pode dizer que o número de conectores tenha influenciado na rigidez do painel, porque esta queda não é observada entre o modelo P-1L-PN-45 e o modelo P-SL-45 sem conector. Provavelmente, a alteração na rigidez do painel deve-se

mais ao grau de interação entre as placas do que simplesmente à presença dos conectores. Observa-se pelo gráfico da Figura 5.30 que o modelo que apresentou interação total entre as placas (P-2L-PN-45) foi o mais rígido. Possivelmente nos modelos P-1L-PN-45, P-SL-45 e P-2L-CPN-45, que apresentaram grau de interação parcial entre as placas, a rigidez não foi influenciada pelo número de conectores.

Outra observação a ser feita é que o grau de interação do P-2L-PP-45 deve estar mais próximo de uma interação total que os demais painéis com interação parcial e, conseqüentemente, apresentou maior rigidez quando comparado a estes painéis.

O gráfico da Figura 5.31 mostra a relação entre força e deslocamento vertical no meio do vão para os painéis com núcleo preenchido por argamassa com 100% de Vermiculita Expandida.

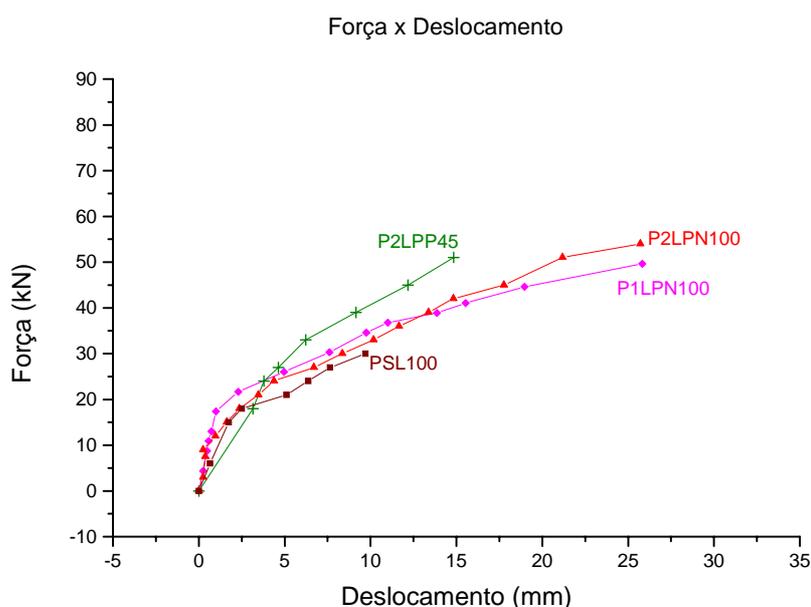


Figura 5.32 - Gráfico Força x Deslocamento – Painéis com 100% de Vermiculita.

Observa-se que o modelo P-2L-PN-100, com duas linhas de conector, foi o mais rígido entre os modelos com 100% de Vermiculita Expandida, os quais apresentaram rigidezes próximas quando comparados entre si, embora o P-SL-100 tenha apresentado ruptura brusca. Observa-se novamente que entre os modelos que apresentaram interação parcial não há alteração significativa na rigidez.

Quanto à influência do núcleo na rigidez do painel observa-se pelo gráfico das Figuras 5.32 a 5.34 que o grau de interação entre as placas é quem influencia na rigidez. Quando há alteração na resistência do núcleo, mas ela não é acompanhada pela alteração do grau de interação do painel, a resistência do núcleo pouco influencia na rigidez do mesmo.

A interrupção do conector no modelo P-2L-CPN-45 também não forneceu mudanças significativas na rigidez do painel. A queda na carga última, conforme dito anteriormente, foi devido à concentração de tensões no concreto.

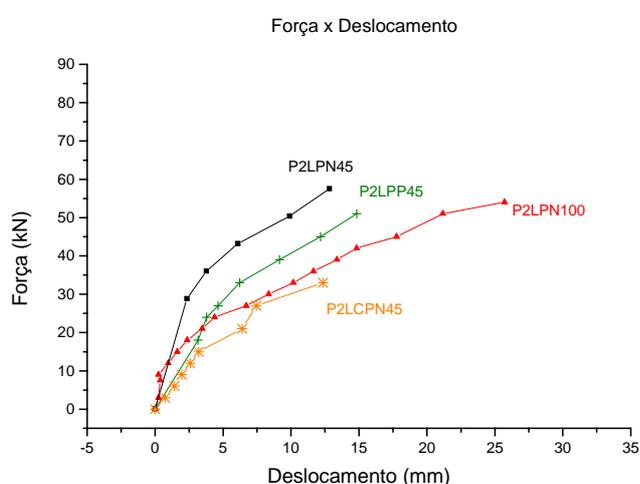


Figura 5.33 - Gráfico Força x Deslocamento – Painéis com duas linhas de conectores.

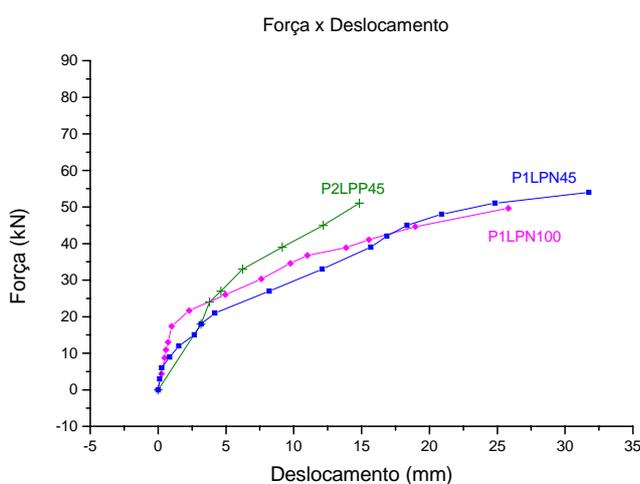


Figura 5.34 - Gráfico Força x Deslocamento – Painéis com uma linha de conector.

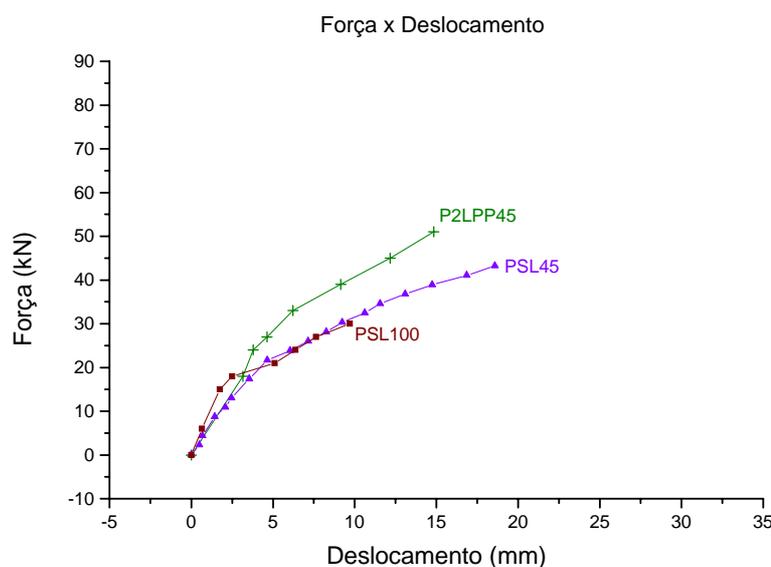


Figura 5.35 - Gráfico Força x Deslocamento – Painéis sem conector.

5.6. Deformação da seção transversal a meio vão.

O grau de interação entre as placas pode ser determinado pela deformação da seção transversal. Quando há apenas uma linha neutra, diz-se que a interação é total. Por outro lado, a interação parcial é caracterizada pela existência de duas linhas neutras na seção transversal. Observa-se que apenas o painel P-2L-PN-45 apresentou grau de interação total, apresentado apenas uma linha neutra. Os demais painéis apresentaram interação parcial, sendo a descontinuidade da linha neutra maior para cargas próximas à ruína do painel.

O modelo P-2L-CPN-45, apesar de não apresentar uma rigidez maior que os demais painéis, teve a linha neutra caracterizada por pequena descontinuidade comparada aos painéis com interação parcial. O modelo com conexão placa a placa, que em termos de rigidez e deformação foi o que teve comportamento próximo ao painel com interação total, apresentou grande descontinuidade na linha neutra provavelmente por problemas de leitura.

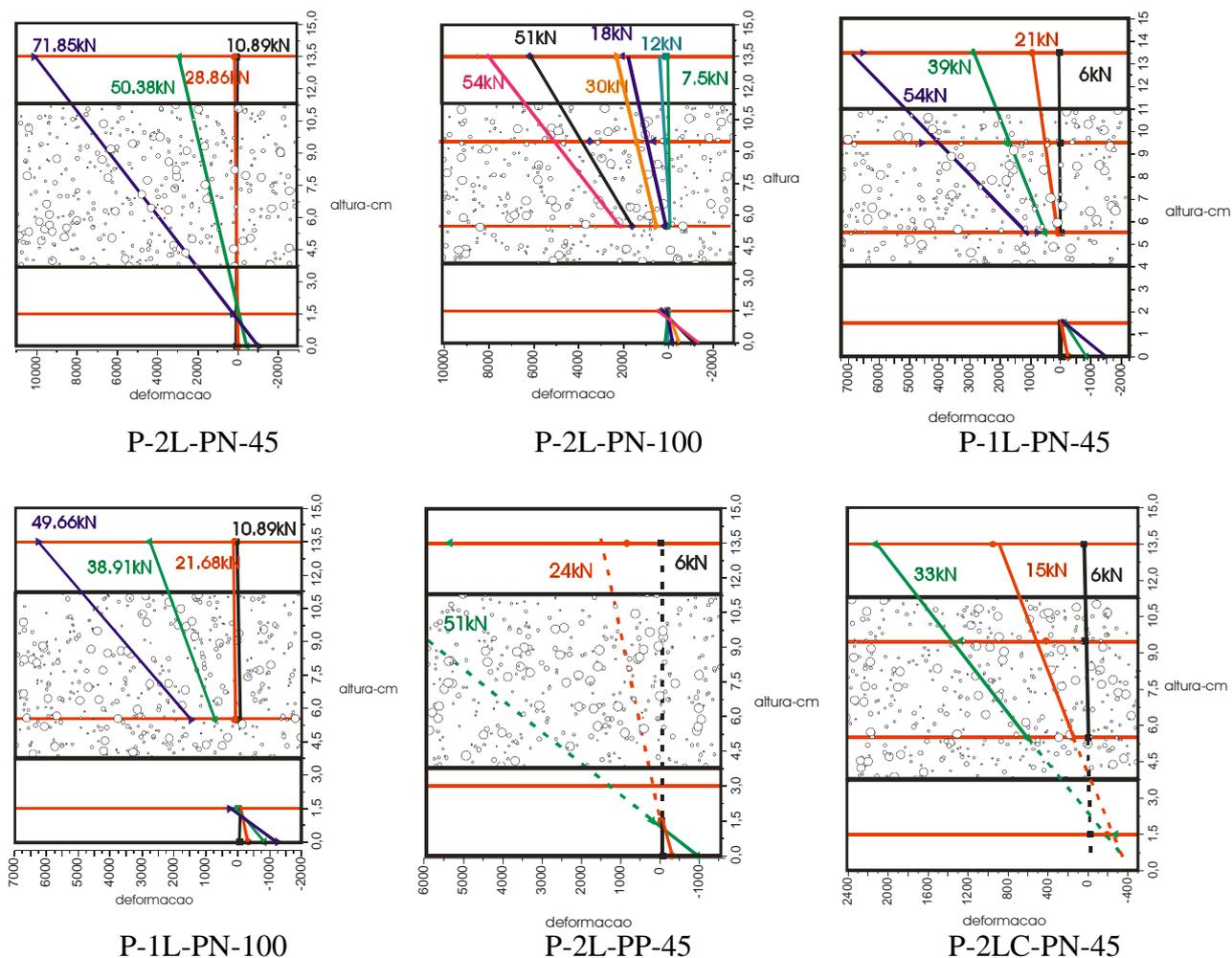


Figura 5.36 – Deformação da seção transversal.

Nota: As linhas tracejadas representam um prolongamento da linha neutra, representa uma estimativa.

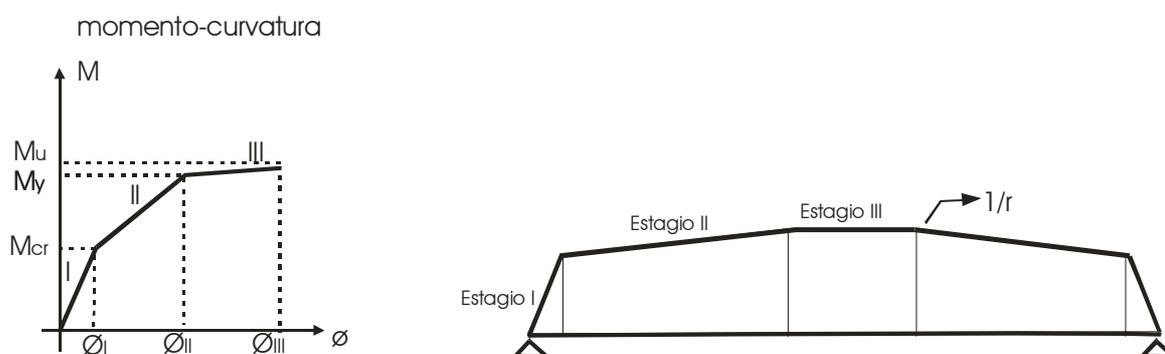
Observa-se que não há grandes diferenças entre as deformações de deslizamento dos painéis com mesma configuração de conectores (uma linha) e diferentes resistências do núcleo (com 45 % e 100 % de Vermiculita). Isto, provavelmente, porque os painéis apresentaram valores de grau de interação próximos, apresentando curvatura semelhante conforme apresentado pela Figura 5.27.

5.7. Análise teórica da rigidez dos painéis.

Foram realizadas algumas análises teóricas com objetivo de obter a curva força-deslocamento para os painéis, que foi comparada com os valores obtidos experimentalmente. Foram utilizados a analogia de Mohr, o momento-curvatura da teoria

do concreto armado e o coeficiente de magnitude baseado na idéia de Seracino (2000). Segundo este autor é possível obter a curvatura de um painel que apresente interação parcial através do produto da curvatura de um painel com interação total por um coeficiente de magnitude maior que um.

A analogia de Mohr foi usada para se obter a curva força-deslocamento a partir do conhecimento do diagrama momento-curvatura da seção transversal. Este método consiste em aplicar a curvatura como carregamento sob o painel, representando os estágios no regime elástico-linear, concreto fissurado e escoamento do aço através das inclinações obtidas da curva momento-curvatura. Obtém-se através desta representação o momento no meio do vão que representa a flecha do painel para a respectiva carga (Figura 5.37).



- M_{cr} – Momento de fissuração;
- M_y – Momento de escoamento;
- M_u – Momento último.

Figura 5.37 – Representação da aplicação da curvatura como carregamento.

Para o painel com interação total (P-2L-PN-45) obteve-se a curvatura através das deformações da tela tracionada e do concreto (Figura 5.37). Para os demais painéis foi feita a relação entre a flecha do painel em estudo com o painel P-2L-PN-45, encontrando-se um coeficiente de magnitude. Realizando-se o produto deste coeficiente com a curvatura do painel com interação total obteve-se a curvatura do painel em estudo (interação parcial) apenas para o estágio II. Aplicou-se então a analogia de Mohr que forneceu a curva força-deslocamento. Este procedimento está representado nos gráficos das Figuras 5.39 a 5.45 pela expressão $\phi \times Mf$.

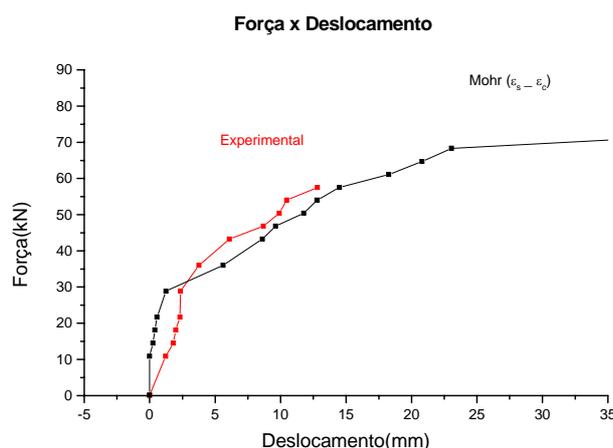


Figura 5.38 – Gráfico força x deslocamento do painel P-2L-PN-45 utilizando analogia de Mohr.

Foi empregada também outra metodologia que consistia em encontrar a curvatura dos painéis com interação parcial apenas através das deformações na tela tracionada e no concreto, cuja nomenclatura adotada foi *Mohr* ($\varepsilon_c - \varepsilon_s$). Este procedimento forneceu uma curva bem próxima da curva obtida pela leitura do relógio comparador, o que era esperado porque ambas as curvas são obtidas experimentalmente, o que se aplica também para o procedimento do coeficiente de magnitude. O fato das curvas convergirem mostra que a metodologia empregada para se determinar a curvatura dos painéis é adequada. Além disso, as curvaturas obtidas apresentaram valores próximos ao procedimento em que se considera apenas a deformação do aço e do concreto. Isto implica em um alto grau de interação entre as placas, aproximando-se de uma interação total, já que considerar apenas a deformação do aço e do concreto implica em considerar a seção totalmente composta (Figura 5.38).

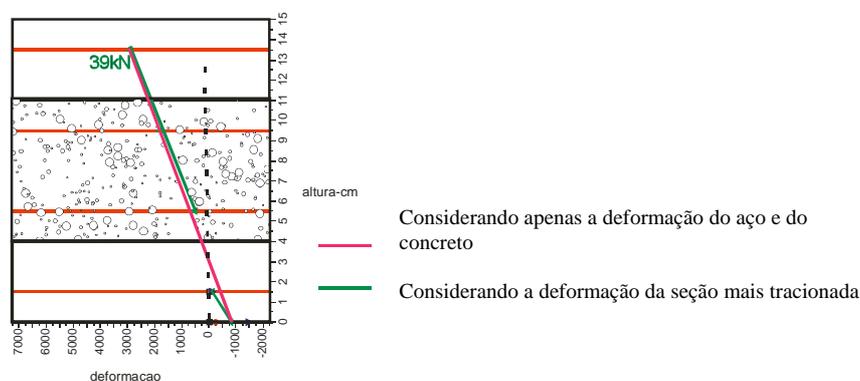


Figura 5.39 – Metodologia utilizada para determinar a curvatura dos painéis.

Nos painéis que apresentaram descontinuidade da linha neutra, com exceção dos modelos sem conectores, aplicou-se ainda outro método que consistia em determinar a curvatura a partir apenas da deformação da seção tracionada, considerando as deformações dos banzos superiores da treliça e da tela tracionada. A nomenclatura adotada para esta metodologia foi *2LN*. Em outras palavras, tomou-se uma seção com apenas uma linha neutra, sendo a curvatura definida pela maior reta. Conhecida a curvatura obteve-se a relação entre a carga e o deslocamento aplicando-se a analogia de Mohr. As figuras 5.39 a 5.41 mostram a aplicação desses procedimentos para os modelos P-2L-PN-100, P-1L-PN-45 e P-1L-PN-100. Observa-se boa aproximação entre os procedimentos e a curva experimental.

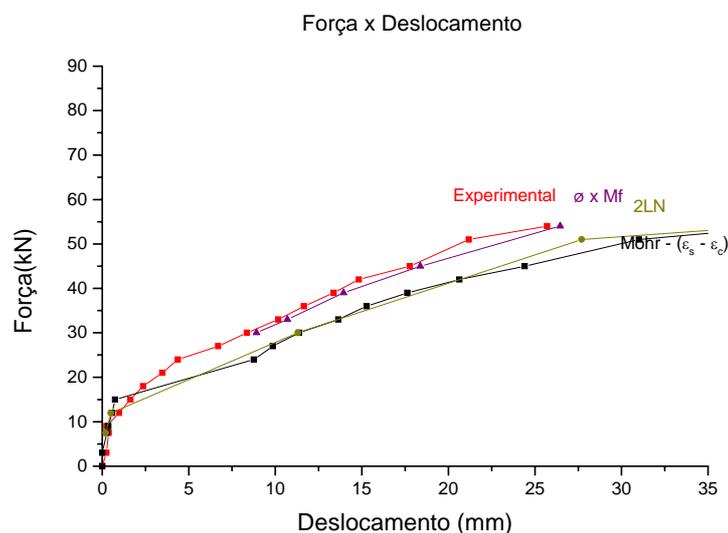


Figura 5.40 – Curva força x deslocamento utilizando analogia de Mohr – P-2L-PN-100.

No gráfico da Figura 5.42 a curvatura obtida através do coeficiente de magnitude não convergiu com as demais devido à fissuração precoce do painel, resultado de erro no procedimento de ensaio, o que comprometeu a relação entre a carga e flecha do modelo P-SL-45.

No gráfico da Figura 5.44 não foi determinada a curvatura considerando apenas a deformação da região tracionada (curva 2LN) porque o banzo da treliça atingia as placas, não havendo como medir a sua deformação. Para os gráficos das Figuras 5.42 e 5.43 a ausência dessa curva explica-se pelo fato dos painéis não apresentarem conectores não sendo possível obter deformações ao longo da profundidade do núcleo.

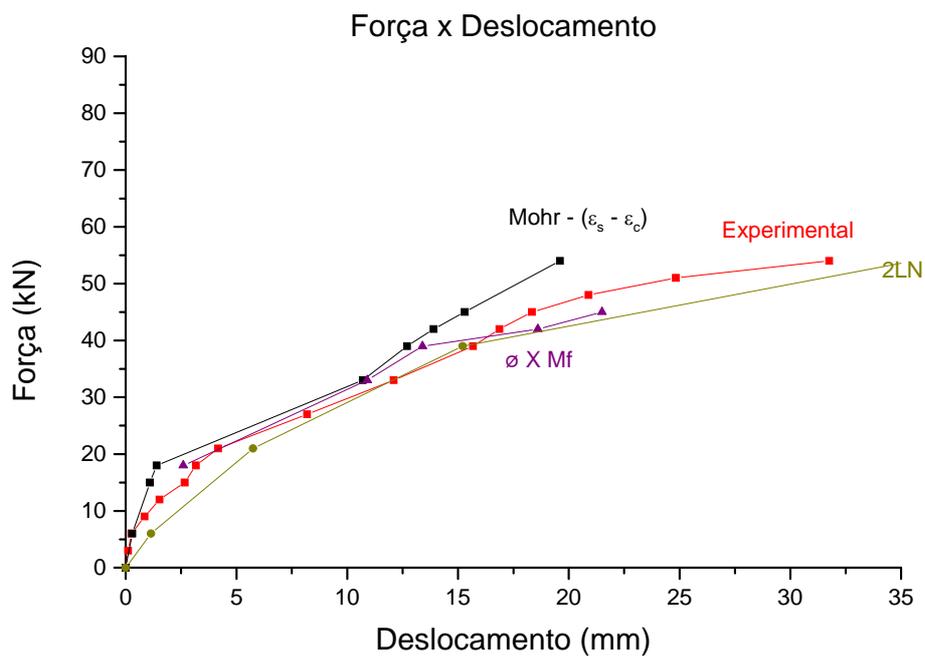


Figura 5.41 – Curva força x deslocamento utilizando analogia de Mohr – P-1L-PN-45.

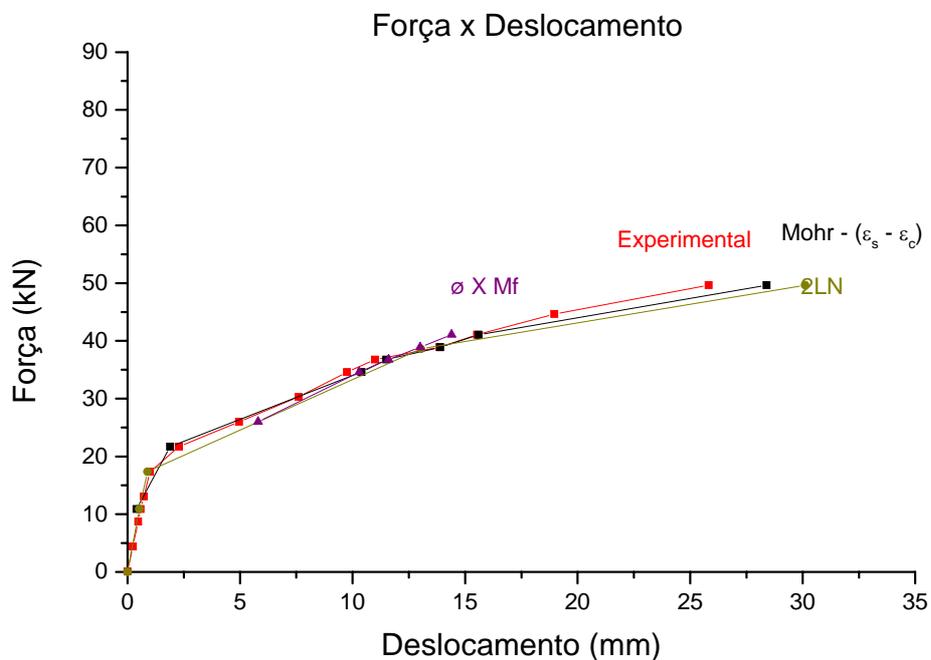


Figura 5.42 – Curva força x deslocamento utilizando analogia de Mohr – P-1L-PN-100.

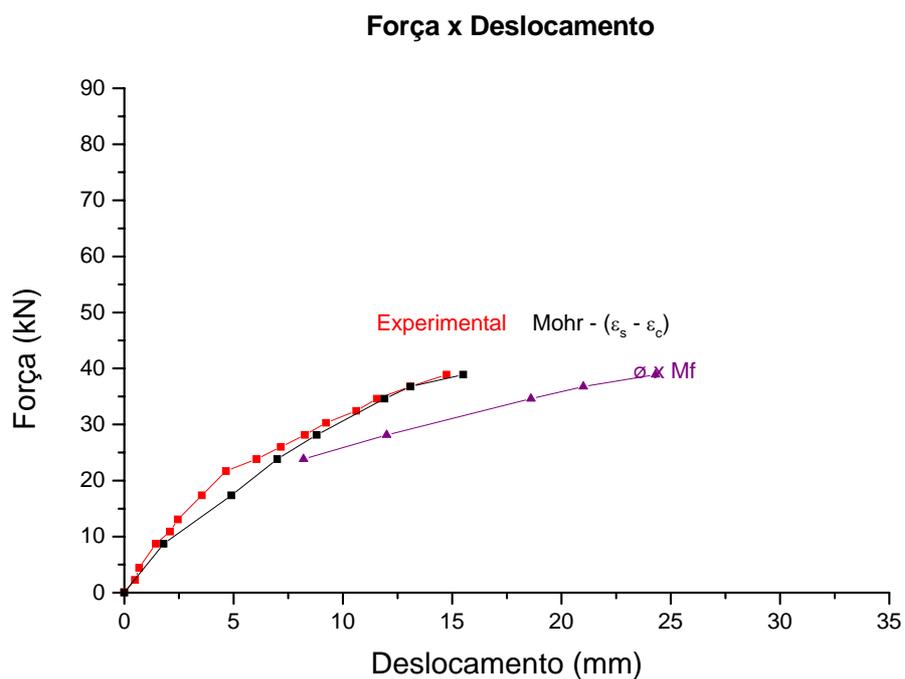


Figura 5.43 – Curva força x deslocamento utilizando analogia de Mohr – P-SL-45.

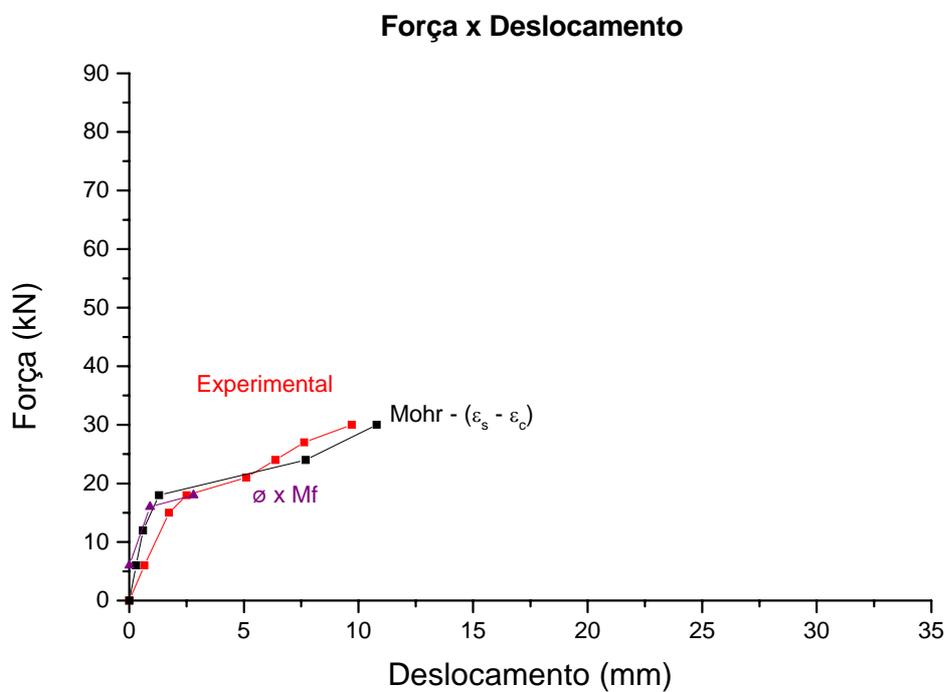


Figura 5.44 – Curva força x deslocamento utilizando analogia de Mohr – P-SL-100.

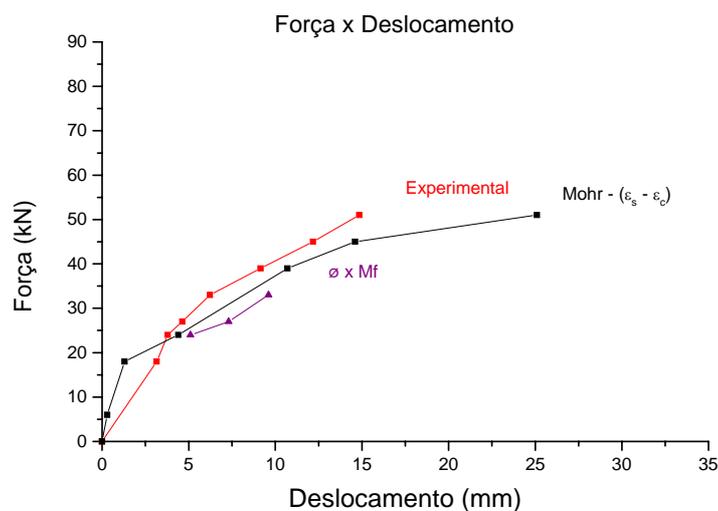


Figura 5.45 – Curva força x deslocamento utilizando analogia de Mohr – P-2L-PP-45.

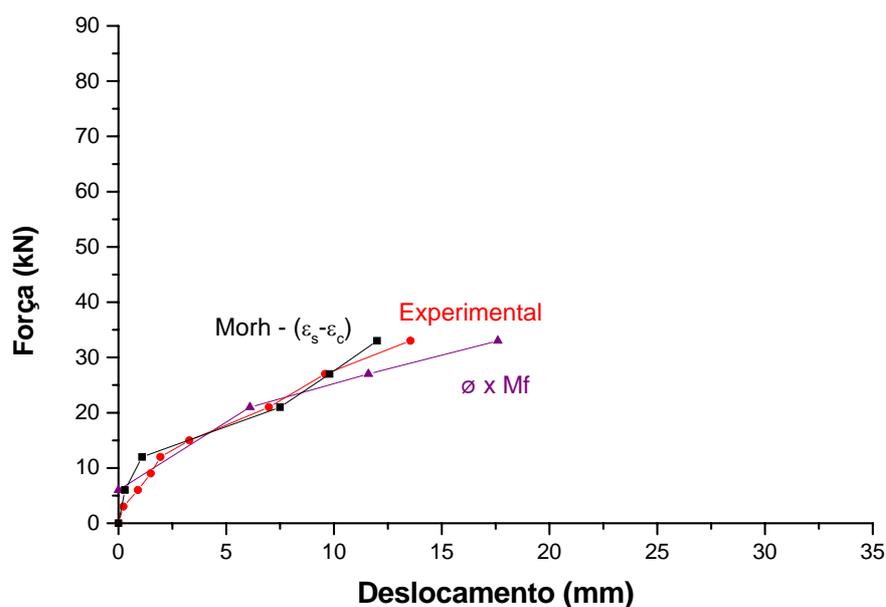


Figura 5.46 – Curva força x deslocamento utilizando analogia de Mohr – P-2L-CPN-45.

A Figura 5.46 mostra uma comparação entre o diagrama momento-curvatura teórico e o obtido experimentalmente do painel P-2L-PP-45 com duas linhas de conector. Observa-se pelo gráfico que a rigidez apresentada pelo painel durante o ensaio foi maior que a fornecida pela teoria do concreto armado. Apenas no regime elástico-linear é que as curvas coincidiram. Essa diferença entre as duas curvas deve-se provavelmente à

desconsideração da rigidez da treliça espacial no cálculo teórico. Um outro possível motivo dessa divergência é o fato da relação entre a distância do ponto de aplicação da carga ao apoio e a espessura do painel estar entre 2,5 e 6. Nesta situação, pode haver contribuição da rigidez ao cisalhamento na rigidez total do painel, sendo a teoria de placas espessas indicada para o caso. Outra hipótese da divergência entre os valores experimentais e teóricos está na não consideração do coeficiente de Poisson na rigidez do painel. Para o modelo estudado observa-se uma relação entre a largura e o comprimento na ordem de 0,22 havendo a possibilidade de rigidez na direção transversal do painel.

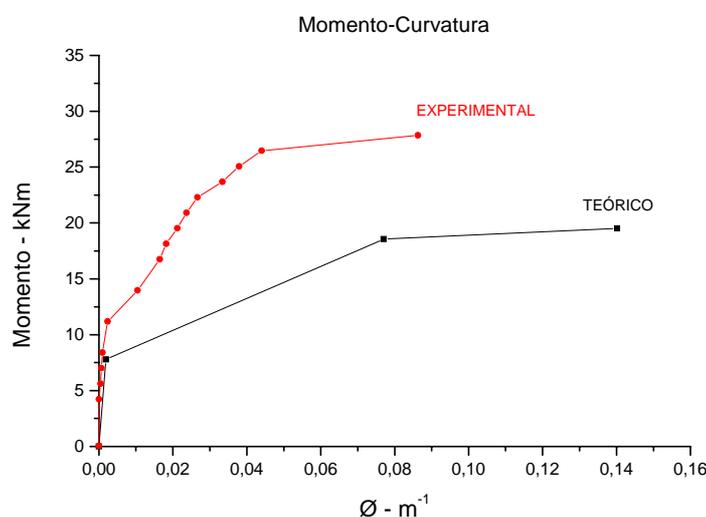


Figura 5.47 – Momento-Curvatura Teórico e Experimental para o Painel P-2L-PN-45.

Outro modelo analítico utilizado foi o de Allen (1969) que não se mostrou eficiente para este tipo de painel. A teoria de Allen é aplicada com eficácia em painéis com material isolante de baixa resistência e baixo módulo de elasticidade, que não é o caso dos painéis com Vermiculita Expandida. Observou-se que tanto os painéis com 100% de Vermiculita Expandida como os com 45% não atendem a condição apresentada pela expressão (2.36) do capítulo 2. O valor obtido para painéis com 100% de Vermiculita foi 52,2 e para os painéis com 45% foi 18,4, ambos inferiores a 100. Mesmo assim, a teoria de Allen foi utilizada pra se determinar a flecha do painel, mas como era de se esperar os cálculos não mostraram coerência com os valores experimentais. A relação entre a força e a flecha obtida por Allen foi menos rígida que a obtida experimentalmente (Figura 5.47).

Mesmo a consideração do aumento do módulo de elasticidade transversal devido à rigidez da treliça proposto por Bush & Wu (1998) não se apresentou compatível para o sistema de painéis em estudo. Isto porque a rigidez do núcleo nos painéis com Vermiculita ainda prevalece, sendo a contribuição da treliça desprezível.

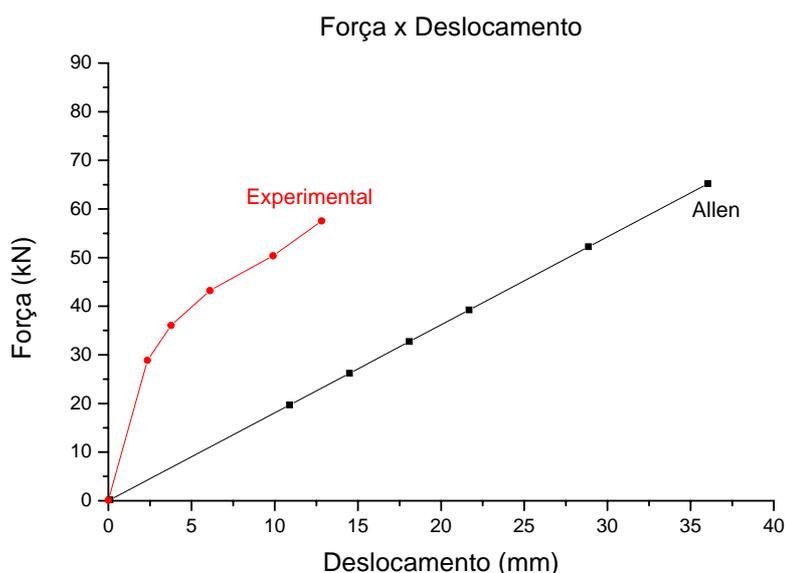


Figura 5.47 – Relação entre força e flecha obtida por Allen e experimentalmente para o modelo P-2L-PN-45.

A Tabela 5.6 apresenta os valores de grau de interação (GI) entre as placas para os painéis estudados. Para se obter esses valores foi utilizada a equação (2.13) fornecida por Pessiki & Mlynarczyk (2003) cuja metodologia encontra-se descrita no capítulo 2. Observa-se que no capítulo 2 esta equação representa o grau de composição do painel. Para painéis com núcleo de baixa rigidez e resistência os conceitos de grau de interação e grau de composição se confundem. Pessiki e Mlynarczyk (2003) admitiram que um painel composto apresentasse interação total, portanto no cálculo do momento de inércia teórico considerando seção composta foi admitido deformação da seção transversal plana. Entretanto, neste trabalho sobre painéis sanduíches com Vermiculita Expandida foi admitida a possibilidade de painéis com grau de composição total e interação parcial, logo o termo grau de composição foi substituído por grau de interação na equação (2.13).

As Figuras 5.48 e 5.49 apresentam a rigidez secante de cada painel analisado, determinada graficamente através da relação entre carga e deslocamento experimental para

o carregamento de 40 kN. Determinou-se também a rigidez secante teórica considerando-se no cálculo, seção totalmente composta e seção não composta.

Os valores apresentados na Tabela 5.6 apresentam-se coerentes com os gráficos das Figuras 5.48 e 5.49. Observa-se que todos os painéis apresentaram rigidez secante maior que a rigidez secante teórica. O painel P-2L-PN-45 forneceu a maior rigidez, por apresentar interação total entre as placas, seguido do painel P-2L-PP-45 que apresentou o maior grau de interação entre os modelos com interação parcial. Novamente observa-se que a rigidez obtida experimentalmente é maior que a obtida pela teoria do concreto armado porque no cálculo teórico não foi considerada a rigidez da treliça espacial.

Os gráficos das Figuras 5.50 e 5.51 mostram a curva carga-flecha dos painéis que romperam por flexão e as curvas teóricas considerando o painel não-composto e composto. Observa-se que os painéis que apresentaram interação parcial apresentaram curva força-deslocamento próxima da curva teórica considerando seção totalmente composta. Observa-se o mesmo comportamento quando se compara os valores de rigidez secante dos painéis com a rigidez secante teórica considerando seção totalmente composta.

Tabela 5.6 – Grau de Interação entre as placas para os painéis estudados.

Descrição	F (MN)	w (m)	I_{exp} (m ⁴)	GRAU INT.
P-2L-PN-45	0,04321	0,061	0,00006480	3,34
P-2L-PN-100	0,039	0,013375	0,00002668	1,25
P-1L-PN-45	0,039	0,01568	0,00002275	1,03
P-SL-45	0,04106	0,01686	0,00002228	1,01
P-2L-PP-45	0,039	0,00915	0,00003899	1,92
P-2L-CPN-45	0,033	0,01235	0,00002444	1,13

$I_c=0,00002212 \text{ m}^4$, $I_{nc}=0,00000388 \text{ m}^4$ obtidos pela equação

$$I_{co} = \left(\frac{M_{cr}}{M_d} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_d} \right)^3 \right] I_{II}$$

$$I_{exp} = \frac{(w/2)a(3L^2 - 4a^2)}{24\Delta E_c}, \text{ para duas cargas concentradas;}$$

F - carga concentrada, valor próximo de 40kN;
w - deslocamento para uma carga próxima de 40 kN obtido nos ensaios;
 M_d - Momento correspondendo a uma carga de 40 kN.

Os painéis P-1L-PN-100 e P-SL-100 não tiveram o grau de interação determinados porque não romperam por flexão.

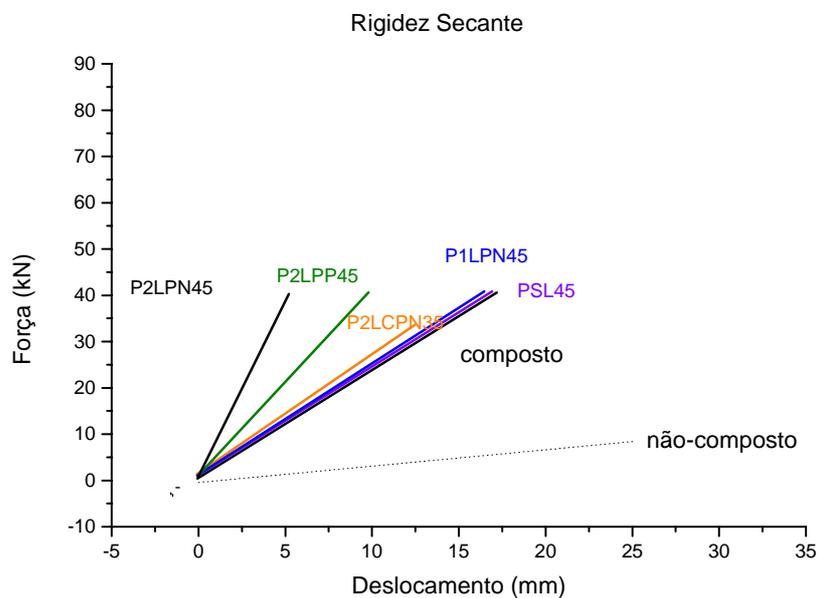


Figura 5.48 – Rigidez secante para painéis com 45 % de Vermiculita Expandida.

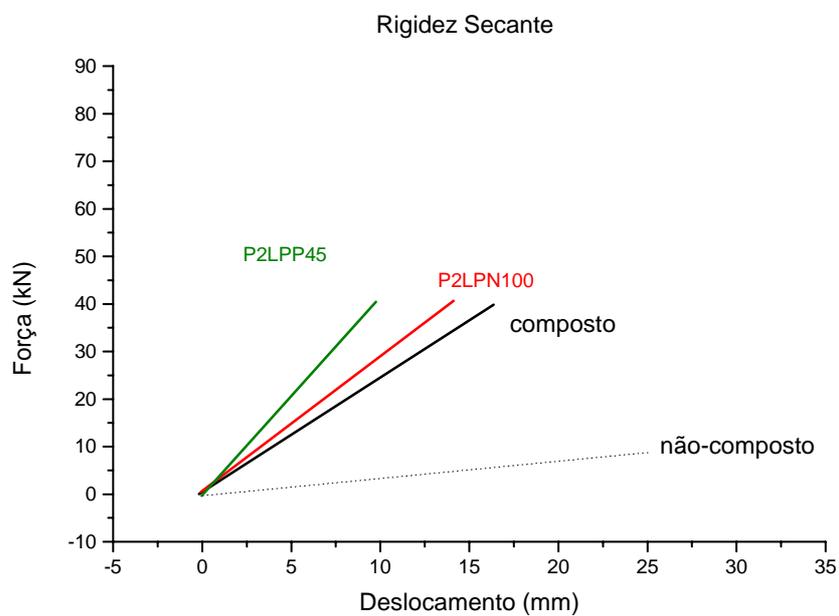


Figura 5.49 – Rigidez secante para painéis com 100 % de Vermiculita Expandida.

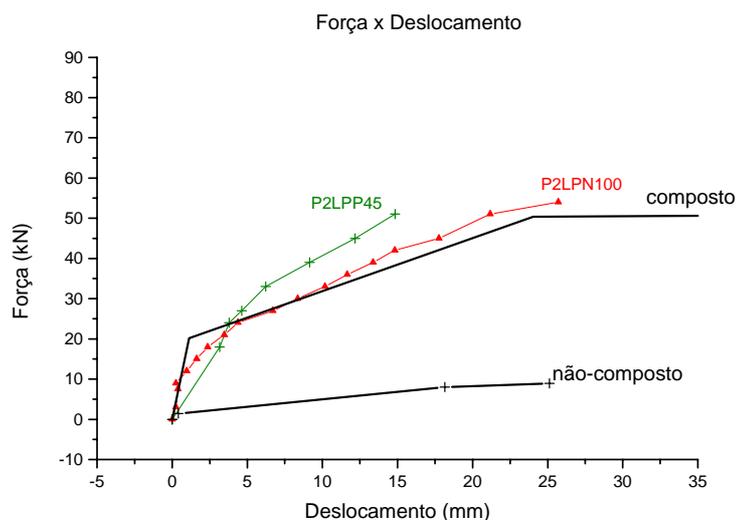


Figura 5.50 – Curva força x flecha para painéis com 100 % de Vermiculita Expandida.

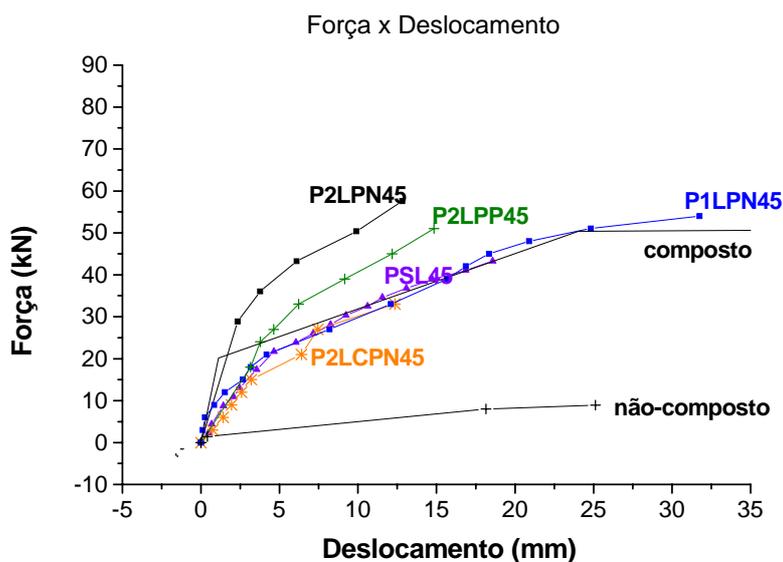


Figura 5.51 – Curva força x flecha para painéis com 45 % de Vermiculita Expandida.

5.8. Considerações finais

Apenas o modelo P-2L-PN-45, com duas linhas de conector, apresentou interação total entre as placas. Os demais painéis apresentaram interação parcial, sendo o modelo P-2L-PP-45, com ligação placa a placa, o que se aproximou mais de uma interação

total, apresentando a maior rigidez entre os painéis com placas interagindo parcialmente. O comportamento do painel aos esforços cortante, independente do grau de interação, seguiu o modelo de treliça plana idealizado por Ritter e Morsch, apresentando diagonais tracionadas e comprimidas.

Os painéis que apresentaram interação parcial forneceram linha neutra com descontinuidade. Apesar disso, pelos cálculos teóricos todos os painéis foram considerados com composição total. Considerando que os valores de resistência experimental e teórico para os painéis que romperam por flexão foram praticamente iguais, pode-se dizer que estes painéis tiveram composição total e interação parcial. Portanto, é possível que um painel mesmo com composição total apresente grau de interação entre as placas parcial, o que é evidenciado pela descontinuidade da deformada da seção transversal a meio vão. Um outro motivo para classificar os painéis como composto foi o fato destes apresentarem resistência na interface maior que a resultante de tração do painel. Apenas os painéis sem conectores apresentaram resistência na interface menor que a resultante de tração.

Nos ensaios experimentais foi observado que as fissuras devido à flexão iniciavam-se na placa tracionada e com o incremento de carga atingiam a placa comprimida. Isto mostra que houve composição total mesmo em painéis com interação parcial. Se as placas tivessem resistido ao carregamento separadamente surgiriam fissuras independentes em ambas as placas, entretanto nenhum painel apresentou essa configuração durante os ensaios realizados.

Para o caso em estudo, com baixa taxa de armadura à flexão, a resistência à flexão do painel é menor que a resistência na interface, o que leva a uma ruptura por flexão do mesmo. Neste caso, um maior grau de interação entre as placas não aumenta significativamente a capacidade de carga do painel. Entretanto, a partir do momento em que passe a ser necessária uma maior resistência à flexão, o que vai depender da função do painel, a resistência na interface passa a controlar a capacidade última do painel, sendo importante um alto grau de interação entre as placas.

Os resultados obtidos por Einea et al (1994) mostram a influência do núcleo ao confeccionar um painel onde há aderência entre o núcleo e as placas e um painel sem aderência. Os autores observaram que a aderência aumentou a capacidade e a rigidez do painel. Neste trabalho também se observou a contribuição do núcleo quando se confeccionou dois modelos sem conector com diferentes resistências do núcleo. Observou-

se que para o painel P-SL-45 a resistência na interface foi maior que a resistência fornecida pelo P-SL-100.

Constatou-se a eficiência do conector na resistência aos esforços de cisalhamento vertical e horizontal nos painéis com núcleo com 100% de Vermiculita Expandida. Em painéis com núcleo mais resistente, as deformações nas diagonais da extremidade das treliças não foram significativas porque o núcleo absorveu mais esforços, restando uma menor parcela a ser resistida pelo conector. Entretanto, para painéis com 45% de Vermiculita Expandida as diagonais localizadas no meio do vão apresentaram deformações na ordem de 1000 $\mu\epsilon$ mostrando que o conector fornece uma parcela de contribuição na resistência à flexão.

Observou-se que os painéis que romperam por flexão mostraram uma boa aproximação entre a carga última experimental e teórica, quando a interação foi parcial. Para o painel com interação total a carga de ruptura foi 55% maior que a teórica. Portanto, o resultado fornecido pela teoria do concreto armado é eficiente para painéis com interação parcial, subestimando a capacidade última do painel quando este apresenta interação total.

Em geral quando há alteração na resistência do núcleo ou no número de conectores, mas esta não é acompanhada por uma alteração significativa no grau de composição, há pouca influência destes elementos na rigidez e na resistência do painel.

Na análise teórica foi possível construir a curva força-deslocamento aplicando-se a analogia de Mohr usando tanto a curvatura obtida pelas deformações do aço e do concreto quanto a curvatura obtida pelo coeficiente de magnitude e pela deformação da seção tracionada. Os resultados mostraram que é possível obter a relação entre o carregamento e a flecha através da definição da curvatura considerando-se os três procedimentos.

Quanto ao modelo de conexão placa a núcleo proposto neste trabalho observa-se que este apresentou boa eficiência mecânica chegando a fornecer interação total ao painel (P-2L-PN-45). Comparado ao modelo de conexão placa a placa (P-2L-PP-45), que apresentou interação parcial, observou-se uma resistência 36 % superior. Além disso, provavelmente, o uso de uma conexão placa a núcleo deve eliminar o surgimento de pontes térmicas que prejudicam a capacidade de isolamento térmico do painel, sendo esta isolação controlada apenas pelo material isolante.

Em termos de execução o painel com conexão placa a núcleo apresenta maior facilidade na produção em série se a confecção for realizada em fábrica. Agora se a

confeção do painel for no local da obra, utilizando, por exemplo, o sistema “Tilt-Up”, o modelo com conexão placa a placa é mais adequado. Quanto à concretagem, o painel com conexão placa a núcleo é mais rápida sendo realizada em duas etapas enquanto o outro é realizado em três etapas.

Capítulo 6 - Conclusão

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas deste trabalho.

Observa-se que não existe metodologia específica para o cálculo de traços de argamassa e de concreto com Vermiculita Expandida. Portanto, a definição de uma massa específica efetiva para a Vermiculita Expandida é um avanço que permite o cálculo, em peso, de traços de argamassa e concreto leves com este material.

Do estudo dos traços de argamassa com Vermiculita Expandida pode-se concluir que é possível obter argamassas com Vermiculita Expandida de granulometria super fina com resistência à compressão variando de 2 MPa a 7 MPa. A adição de Vermiculita reduziu em mais de 50% a condutividade térmica das argamassas e diminuiu sua massa específica para um terço da massa de uma argamassa sem Vermiculita (610 kg/m^3). Isto mostra que elas apresentam as propriedades básicas para materiais de enchimento que são baixa densidade e boa isolamento térmica. Apesar disto, a condutividade térmica obtida ($0,878 \text{ W/m}^\circ \text{C}$) ainda é cerca de três vezes maior que a recomendada para concretos isolantes de mesma densidade.

No caso de concreto, observou-se que a adição da Vermiculita Expandida não apresentou melhoras significativas, visto que o agregado graúdo compactou a Vermiculita reduzindo seus vazios internos. Obteve-se pequena redução da massa específica acompanhada de mais de 50% de redução na resistência à compressão. Nos traços com massa específica em torno de 2000 kg/m^3 foram obtidas resistências à compressão próximas de 13 MPa, mesmo com consumo de cimento em torno de 450 kg/m^3 . Este valor é inferior ao mínimo recomendado para concretos estruturais pela NBR 6118:2003 (20 MPa). O ACI 523.3R-93 (ACI, 1994) indica que concretos com densidade da ordem de 1920 kg/m^3 e relação água/cimento de 0,6 apresentam resistência próximo de 23 MPa, valor mais de 70% superior ao obtido neste trabalho. Dessa forma, optou-se pelo emprego do concreto convencional na confecção das placas dos painéis sanduíche.

Foram obtidos bons resultados mecânicos empregando-se a Vermiculita Expandida como agregado leve na argamassa de preenchimento do núcleo nos ensaios dos painéis sanduíche. A argamassa apresentou resistência à compressão em torno de

3,0 MPa quando foi empregado 100 % de Vermiculita Expandida e 8,5 MPa quando foi empregado apenas 45% de Vermiculita Expandida. A redução do peso do painel, comparado a um painel de concreto armado maciço de mesma dimensão, foi de 24 % para painéis com 45 % de Vermiculita Expandida e de 35% para painéis com 100% de Vermiculita Expandida. Esta baixa redução está associada à elevada massa específica da argamassa do núcleo quando comparada a outros materiais de enchimento como, por exemplo, o poliestireno expandido (EPS). Apesar disso, a argamassa com Vermiculita Expandida possui massa específica sensivelmente inferior à do concreto (2400 kg/m^3). A argamassa com 100% de Vermiculita Expandida possui massa específica 75% inferior à do concreto (610 kg/m^3) enquanto a argamassa com 45% de Vermiculita Expandida possui massa específica 48 % inferior (1240 kg/m^3). A massa específica mais elevada neste caso se deve à maior quantidade de areia presente no traço e ao maior consumo de cimento (670 kg/m^3). Estes valores foram obtidos do estudo dos traços e são representativos da argamassa e do concreto usados na confecção dos painéis. Conclui-se, portanto, que para uma maior redução do peso do painel sanduíche uma solução possível seria a redução da espessura das placas de concreto.

Comparada à solução em alvenaria estrutural sem revestimento em blocos de concreto de dimensões 39cm x 19cm x 14cm e peso unitário de 12 kg ($161,94 \text{ kg/m}^2$), o painel sanduíche com 45 % de Vermiculita Expandida é 77% mais pesado ($286,8 \text{ kg/m}^2$). Para o painel com 100 % de Vermiculita esse aumento foi de 50% ($242,7 \text{ kg/m}^2$). Entretanto, o painel sanduíche apresenta a vantagem de não necessitar de acabamento e sua capacidade de isolamento termo-acústico é maior que a alvenaria de blocos de concreto. Quanto ao acabamento, este pode ser feito durante a moldagem da placa, ou pode-se simplesmente optar por deixá-lo exposto. O painel em pré-moldado também apresenta a vantagem de propiciar uma maior rapidez de execução da obra que a alvenaria em tijolo maciço.

Quanto ao isolamento térmico e acústico não foram realizados ensaios específicos no painel, sendo medido apenas o valor da condutividade térmica da argamassa. Entretanto, é esperada uma redução sensível da condutividade térmica do painel uma vez que a argamassa com 100% de Vermiculita Expandida apresentou uma condutividade 65 % inferior à do concreto convencional ($0,878 \text{ W/m}^\circ \text{ C}$ para a argamassa e $2,529 \text{ W/m}^\circ \text{ C}$ para o concreto). A argamassa com 45% de Vermiculita Expandida apresentou uma condutividade maior ($1,137 \text{ W/m}^\circ \text{ C}$), entretanto ainda foi

55 % inferior à do concreto. Estes valores foram obtidos do estudo dos traços e são representativos da argamassa e do concreto usados na confecção dos painéis.

O emprego da Vermiculita Expandida como elemento de enchimento em painéis sanduíche mostrou-se viável por reduzir o peso do painel e não reduzir a sua resistência mecânica. No caso do painel ensaiado com interação total entre as placas (P-2L-PN-45) houve um ganho de 54 % de resistência considerando-se o valor teórico obtido da teoria de flexão do concreto armado. Nos demais painéis que romperam por flexão, os valores obtidos dos ensaios estão próximos dos obtidos da teoria de flexão do concreto armado considerando a atuação conjunta das duas placas. Isto mostra que o sistema com conector em treliça e ligação placa-núcleo proporcionou uma composição total ao painel sanduíche. Esta afirmação é corroborada quando se comparam os painéis P-2L-PN-45 e P-2L-PP-45, sendo este último com ligação placa-placa. Observa-se que a mudança da forma de ligação do conector influenciou na resistência à flexão do painel. O modelo P-2L-PN-45 apresentou carga última 36% maior que o modelo P-2L-PP-45.

Verificou-se que apenas o painel P-2L-PN-45, com duas linhas de conector e 45% de Vermiculita Expandida, apresentou interação total. Os demais painéis, apesar de serem considerados compostos, apresentaram interação parcial caracterizada pela descontinuidade na deformada da seção transversal a meio vão. O painel P-2L-PP-45, com ligação placa-placa e 45 % de Vermiculita Expandida, foi o segundo painel que mais se aproximou de uma interação total, sendo que a rigidez do mesmo foi a maior entre os painéis com interação parcial.

Para o caso em estudo, com baixa taxa de armadura à flexão, a resistência à flexão é menor que a resistência na interface, o que leva a uma ruptura por flexão. Neste caso um grau de interação entre as placas maior não aumenta significativamente a capacidade de carga do painel. Entretanto, a partir do momento em que passa a ser interessante uma maior resistência à flexão, o que vai depender da função do painel, a resistência na interface passa a controlar a capacidade última do painel sendo importante um alto grau de interação entre as placas. Observou-se neste trabalho que painéis sem conectores apresentaram composição total (P-SL-45). Entretanto, este modelo de painel não é adequado para projetos porque o aumento da taxa de armadura de flexão levaria a uma ruptura na interface e haveria a necessidade de conectores. O fato do painel sem conector ter apresentado composição total para núcleo com 45 % de Vermiculita

Expandida implica em considerar a aderência entre o núcleo e as placas na resistência na interface.

O modelo de cálculo de flexão do concreto armado utilizado pela NBR6118:2003 mostrou-se eficiente para avaliar a resistência dos painéis com interação parcial que romperam por flexão, exceto para o painel P-2L-PP-45 que apresentou o maior grau de interação entre os painéis ensaiados. Mesmo assim, o valor teórico foi inferior ao experimental, o que indica que este modelo pode ser aplicado para avaliar a resistência à flexão de painéis sanduíche com núcleo de Vermiculita Expandida.

Um outro motivo para classificar os painéis em composto foi o fato de estes apresentarem resistência na interface maior que a resistência à tração do painel, com exceção dos painéis sem conectores que apresentaram resistência na interface menor que à tração. Nos ensaios experimentais foram observados que as fissuras devido à flexão iniciavam-se na placa tracionada e com o incremento de carga atingiam a placa comprimida. Isto mostra que houve composição total mesmo em painéis com interação parcial. Se as placas tivessem resistido ao carregamento separadamente surgiriam fissuras independentes em ambas as placas, nenhum painel apresentou essa configuração durante os ensaios realizados.

Quanto ao procedimento da FIP, este se mostrou viável para determinar a resistência na interface do painel. Para o modelo P-SL-100 que rompeu por cisalhamento horizontal, a carga estimada pelo procedimento da FIP foi 14 % maior que o valor experimental. Já o painel P-1L-PN-100 apresentou ruptura por cisalhamento vertical com deslizamento entre a placa e o núcleo. Pelo resultado experimental não é possível definir o modo de ruptura. Aparentemente a ruptura ocorreu quando a fissura de cisalhamento vertical atingiu a interface, resultando numa separação entre a placa e o núcleo. Isto pode ser confirmado observando-se que o aço da diagonal entre o apoio e o ponto de aplicação de carga não apresentou escoamento, confirmando uma ruptura conjunta e não apenas por cisalhamento vertical.

Através do relógio comparador não foi possível quantificar para os painéis o deslizamento relativo na interface durante o ensaio. Entretanto, através da deformação da seção transversal a meio vão foi possível representar graficamente esse deslizamento. Nos painéis P-SL-100 e P-1L-PN-100 a separação da placa com núcleo ocorreu no instante da ruptura. Isto mostra a importância da aderência entre a placa e o núcleo na resistência da interface. Por outro lado, como a ruptura da aderência na interface resultou na ruptura do painel sem um aumento progressivo do deslizamento na

interface, isto sugere que a ancoragem do conector no núcleo era deficiente, uma vez que a resistência à tração da argamassa com Vermiculita Expandida era muito baixa.

Todos os painéis se comportaram de acordo com o modelo idealizado por Ritter e Mörsch, apresentando diagonais tracionadas e comprimidas.

Na análise teórica foi possível através tanto da curvatura obtida pelas deformações do aço e do concreto, quanto da curvatura obtida pelo coeficiente de magnitude e obtida pela deformação da seção tracionada, construir a curva força-deslocamento aplicando-se a analogia de Mohr. Os resultados mostraram que é possível obter a relação entre a carga e a flecha através da definição da curvatura considerando-se os três procedimentos.

Constatou-se que a alteração na resistência do núcleo e na configuração do conector quando não acompanhada de alteração no grau de interação entre as placas não forneceu grandes mudanças na resistência à flexão e na rigidez do painel. Em painéis com material isolante de baixa rigidez a influência do conector é maior. No caso estudado, entretanto, esta influência foi minimizada devido à grande rigidez do núcleo que absorve uma parcela maior de esforços. O modelo de Allen desenvolvido para painéis com núcleo de baixa resistência como o EPS não foi, portanto, adequado.

Os painéis ensaiados exibiram maior rigidez à flexão que a rigidez obtida teoricamente considerando seção composta, que resultou em grau de interação entre as placas maior que o valor unitário. Os modelos com apenas uma linha de conector foram os que forneceram melhor aproximação com os valores teóricos. Uma possível explicação para o grau de interação ter sido maior que o valor unitário, foi a não consideração da contribuição da rigidez da treliça espacial no cálculo da rigidez teórica do painel.

O fato do modelo P-SL-45 ter rompido por flexão e o modelo P-SL-100 ter rompido por cisalhamento indica que o núcleo tenha participação na resistência à flexão do painel, o que faz com que a aderência entre o núcleo e as placas seja levada em conta nos cálculos. Um outro motivo para se considerar a rigidez do núcleo é o fato da argamassa com Vermiculita não se deteriorar com o tempo como acontece com o EPS cuja contribuição é considerada apenas no içamento e manuseio.

Quanto ao modelo P-2L-PP-45a que apresentou ruptura devido à deficiência na ancoragem do conector. Observou-se que na interface entre a placa comprimida e o núcleo não houve ancoragem suficiente, o que mostra a necessidade do conector mesmo que este não contribua significativamente na resistência à flexão.

Quanto ao painel P-2L-CPN-45, que teve o conector interrompido na região de momento constante, observou-se ruptura devido à concentração de tensões no concreto na região onde o conector foi interrompido. Este modelo apresentou a segunda menor carga última perdendo apenas para o modelo P-SL-100. Portanto, o sistema de conexão no painel deve ser disposto de forma contínua ao longo de todo seu comprimento.

Em termos de execução o painel com conexão placa a núcleo apresenta maior facilidade na produção em série se a confecção for realizada em fábrica. Se for utilizado, por exemplo, o sistema “*tilt-up*”, em que os painéis são moldados horizontalmente no local onde serão fixados e içados para sua posição final após o endurecimento do concreto, o modelo com conexão placa a placa é mais adequado. Quanto à concretagem, o painel com conexão placa a núcleo é mais rápida sendo realizada em dois dias enquanto o outro é realizado em três dias.

Quanto à aplicação do modelo de painel sanduíche estudado, observa-se que por não terem sido realizados os ensaios de flexo-compressão e cisalhamento direto não se pode dizer muito sobre o uso deste modelo como painel auto-portante. Entretanto de acordo como o ensaio de flexão simples o painel mostrou-se viável se utilizado como laje.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se para trabalhos futuros a avaliação da performance do conector através do ensaio de cisalhamento direto. A avaliação da capacidade de isolamento térmico e acústico do painel e estudos de esquema de ligação entre os painéis também são variáveis valiosas para a viabilização deste sistema na construção civil.

É de grande importância também determinar o grau de interação entre as placas para que este grau seja considerado nos cálculos como um coeficiente que irá majorar as flechas para levar em conta a interação parcial. Determinar a curvatura através de modelos teóricos sem a necessidade de ensaios experimentais também é interessante para que se possa estimar a flecha do painel.

A utilização de placas com espessura menor para que a redução do peso do painel seja mais significativa também deve ser estudada, sendo necessário ensaio de flexo-compressão sem esquecer de levar em conta problemas com ancoragem do conector e instabilidade das placas.

Referências Bibliográficas

- ALLEN, Howard G. *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels*. 1 ed. Australia: Pergamon Press, 1969. 401p.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI 523.3R-93: *Guide for cellular concretes above 50 pcf, and for aggregate concretes above 50 pcf with compressive strengths less than 2500 psi*. ACI Manual of Concrete Practice, Part 5. Detroit, Michigan, 1994.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI SP-61: *Ferrocement, Material and Applications*. ACI, p. 9-24. Detroit, Michigan, 1979.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI 533.3R-93: *Guide for Precast Concrete Wall Panels*. Farmington Hills, MI, 1993.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI 213R-87: *Guide for structural lightweight aggregate concrete*. ACI Manual of Concrete Practice, Part I: Materials and General Properties of Concrete. Detroit, Michigan, 1994.
- ARAÚJO, D. L. *Cisalhamento na Interface entre Concreto Pré-Moldado e Concreto Moldado no Local em Elementos Submetidos à Flexão*. 1997. 209f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos-SP, 1997.
- ARAÚJO, Daniel de Lima; EL DEBS, Mounir Khalil. Cisalhamento entre concreto pré-moldado e concreto moldado no local em vigas submetidas à flexão: Comparação entre resultados experimentais e valores de normas. In: 40º IBRACON, 1998, Recife 1998. *Anais...* 16p. p. 14.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-5739/94: *Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-7222/94: *Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 1994.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-8522/03: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. NBR-NM248/03. Agregados – Determinação da composição granulométrica.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-5739/94: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-NM 0023/2001. Cimento Portland – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-12820/93: Concreto Endurecido – Determinação da condutividade térmica. Rio de Janeiro, 1993.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-6207 – Arame de aço - Ensaio de Tração. Rio de Janeiro, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-8522/03: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-9778/87 – Argamassa de Concreto Endurecidos – Determinação de absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica – Método de Ensaio.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-NM47/2002. Determinação do teor de ar incorporado em concreto fresco – Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-NM52/03. Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-NM67/1998 – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-13438: Blocos de Concreto Celular Autoclavado. Rio de Janeiro, 1995.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-11572: Materiais Celulares de Poliestireno para Isolamento Térmico na Construção Civil e Câmaras Frigoríficas. Rio de Janeiro, 1993.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-9062: Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-6118: Projeto de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro, 2003.
- BALIK, J. S.; & BARNEY, G. B. Thermal design of precast concrete buildings. *PCI Journal*, Vol. 29, nº6, p. 48-98, 1984.
- BASUNBUL, I. A.; SALEEM, Mohammed.; SULAIMANI G. J. Flexural Behavior of Ferrocement Sandwich Panels. *Cement & Concrete Composites*, p.21-28, Januray 1991.
- BERTINI, A. A. *Estruturas Tipo Sanduíche com Placas de Argamassa Projetada*. 2002. 206f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos-SP, 2002.
- BUSH, Thomas. D.; WU, Zhiqi. Flexural Analysis of Prestressed Concrete Sandwich Panels with Truss Connectors. *PCI Journal*, p.76-83, September-October 1998.
- BUSH, Thomas. D.; STINE, Gregory. L. Flexural Behavior of Composite Precast Concrete Sandwich Panels With Continuous Truss Connectors. *PCI Journal*, p.112-121, March-April 1994.
- CAMPOS, Helen. Sinara. *Traço para Painéis Pré-Moldado de Concreto com Vermiculita Expandida*. Iniciação Científica (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil - UFG, Goiânia, 2004.
- CASTILHO, V. C. *Análise Estrutural de Painéis de Concreto Pré-Moldado Considerando a Interação com a Estrutura Principal*. 1998. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos-SP, 1998.
- COSTA, M. R. M. M. *Método Construtivo de Alvenaria de Vedação de Blocos de Concreto Celular Autoclavado*. 1995. 234p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Escola Politécnica da USP, São Paulo-SP, 1995.

- DAVID, D. L. *Vigas Mistas com Laje Treliçada e Perfis Moldados a Frio: Análise do Comportamento Estrutural*. 2003. 218f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, UFG-GO, 2003.
- EINEA, Amin. et al State-of-the-Art of Precast Concrete Sandwich Panels. *PCI Journal*, 78-98, November-December 1991.
- EINEA, Amin; SALMOM, David. C. A Partially Composite Sandwich. *Journal of Structural Engineering*, 778-783, April 1995.
- EINEA, Amin; et al A New Structurally and Thermally Efficient Precast Sandwich Panel System. *PCI Journal*, 78-98, July-August 1994.
- EL DEBS, Mounir Khalil. *Concreto Pré-Moldado: Fundamentos e Aplicações*. 1 ed. São Paulo: EESC-USP, 2000. 456p.
- EUROCODE 4 – (2001- Draft No.3 of prEN 1994 1-1). Design of composite steel and concrete structures. Part 1.1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization Bruxelles.
- FEDERATION INTERNATIONALE DE LA PRECONTRAINTÉ – FIP (1982). *Shear at the interface of precast and in situ concrete: guide to good practice*.
- FONSECA, F. J. C. *Projeto de Painéis Sanduíche de Concreto Pré-Moldado*. 1994. 172f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.
- KRÜGER, P. G. V. *Análise de Painéis de Vedação nas Edificações em Estrutura Metálica*. 2000. 167f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2000.
- NEVILLE, Adam. Matthews. *Propriedades do Concreto*. 2. ed. São Paulo: Editora PINI, 1997. 787 p
- PESSIKI, Stephen; MLYNARCZYK, Alexandar. Experimental Evaluation of the Composite Behavior of Precast Concrete Sandwich Wall Panels. *PCI Journal*, 54-71, March-April 2003.
- PRECAST/ PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. *PCI Manual for Structural Design of Architectural Precast Concrete*. Chicago, 1997.

- SEEBER, Kim. E. et.al. State-of-the-Art of Precast/Prestressed Sandwich Wall Panels. *PCI Journal*, p. 94-132, March-April 1997.
- SERACINO, R.; OEHLERS, D. J.; YEO, M. F. Partial-interaction flexural stresses in composite steel and concrete bridge beams. *Engineering Structures*, 1186-1193, July 2000.
- SHEPPARD, David A.; PHILLIPS, William R. *Plant-Cast Precast and Prestressed Concrete*. 1 ed. São Paulo: MacGraw-Hill Publishing Company, 1989. 401p.
- VIGILATO, Éden Albert Baião; PFRIMER, Emanuela Curado. Sistema Construtivo com Painéis Pré-Modaldos de Concreto Leve com Poliestireno Expandido Reciclado. In: 43º IBRACON, Recife, 2002. *Anais...* 16p.

ANEXO A: Gráficos

Neste anexo serão apresentados os gráficos que não foram utilizados na análise de resultados.

A.1 Relação entre carga e deformação

a. Tela Eletrosoldada

As deformações da tela eletrosoldada da placa comprimida também foram lidas no meio do vão para todos os painéis. As Figuras A1 a A.12 mostram todas as deformações medidas na tela eletrosoldada

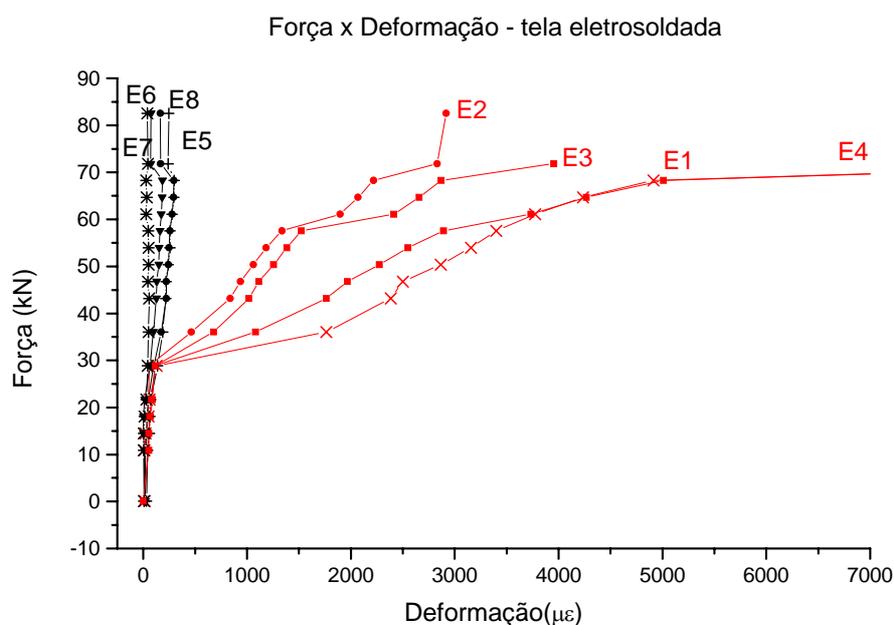


Figura.A.1 – Deformação na tela eletrosoldada para o painel P-2L-PN-45.

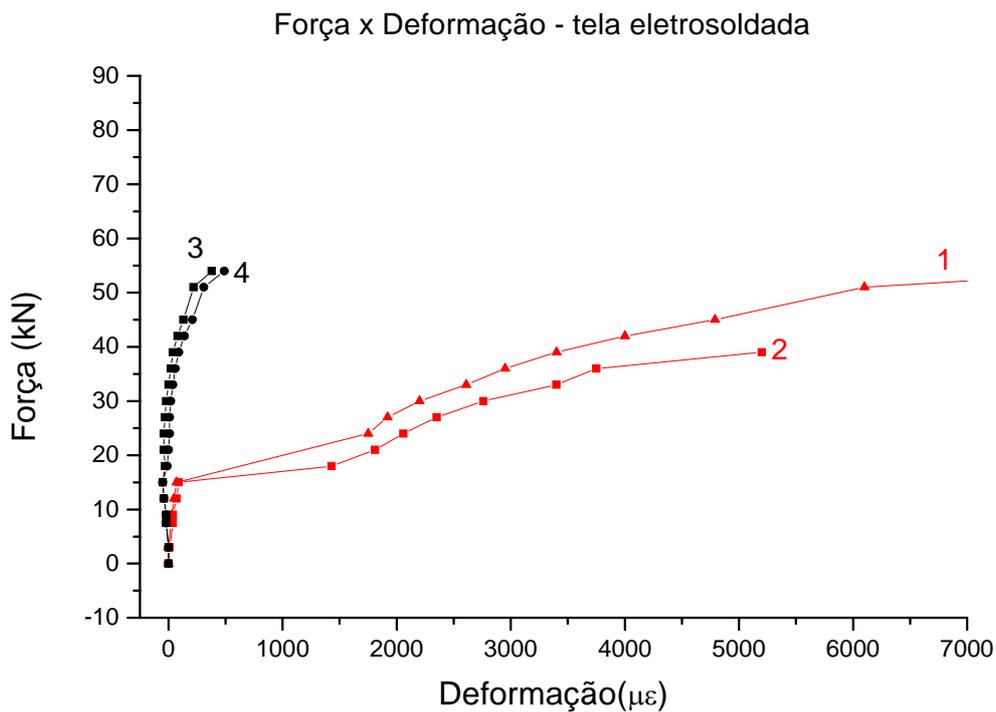


Figura A.2 – Deformação na tela eletrosoldada para o painel P-2L-PN-100.

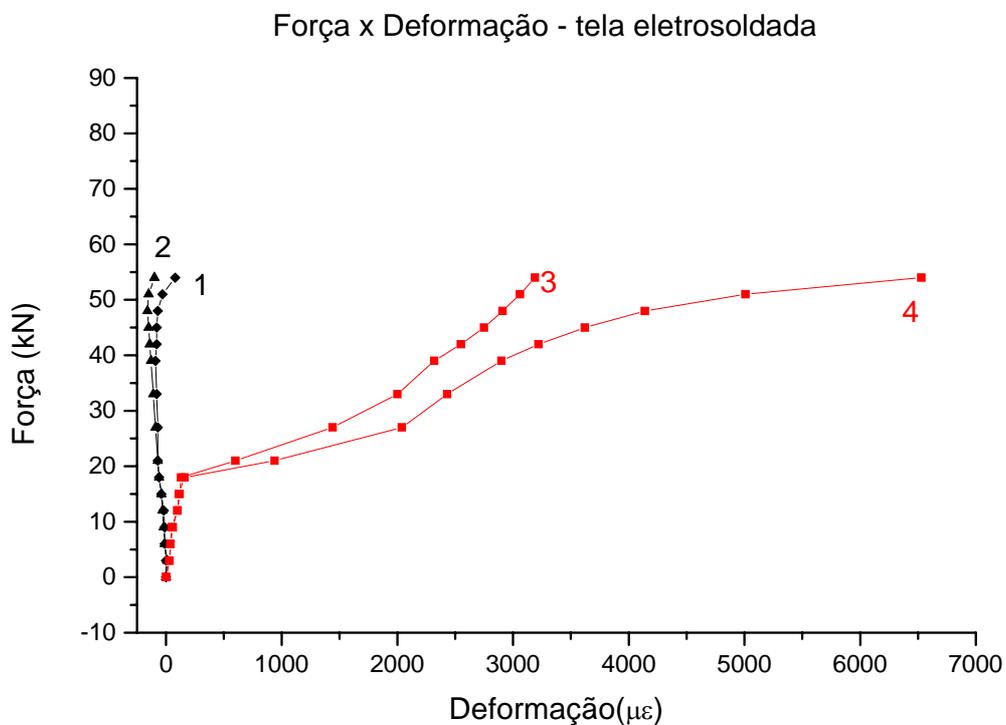


Figura A.3 – Deformação na tela eletrosoldada para o painel P-1L-PN-45.

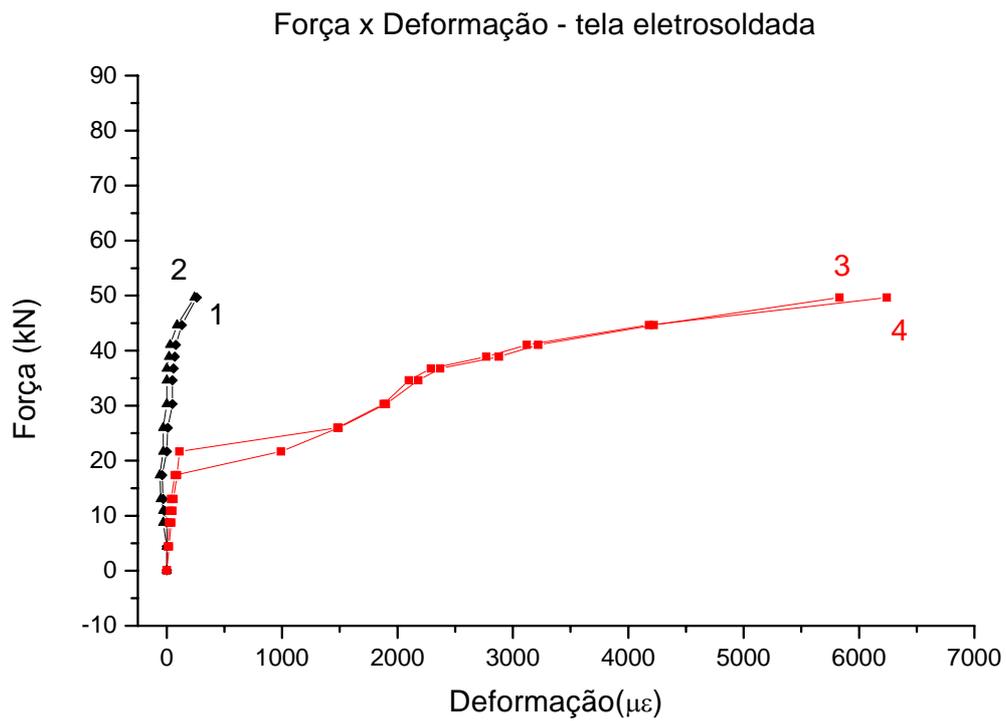


Figura A.4 – Deformação na tela eletrosoldada para o painel P-1L-PN-100.

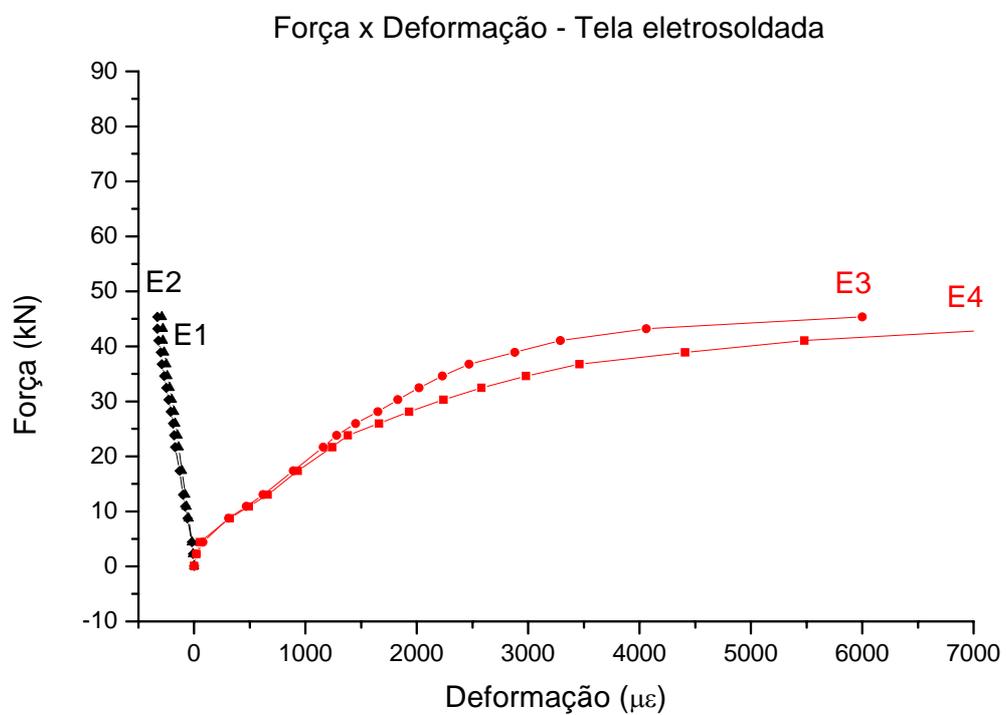


Figura A.5 – Deformação na tela eletrosoldada para o painel P-SL-45.

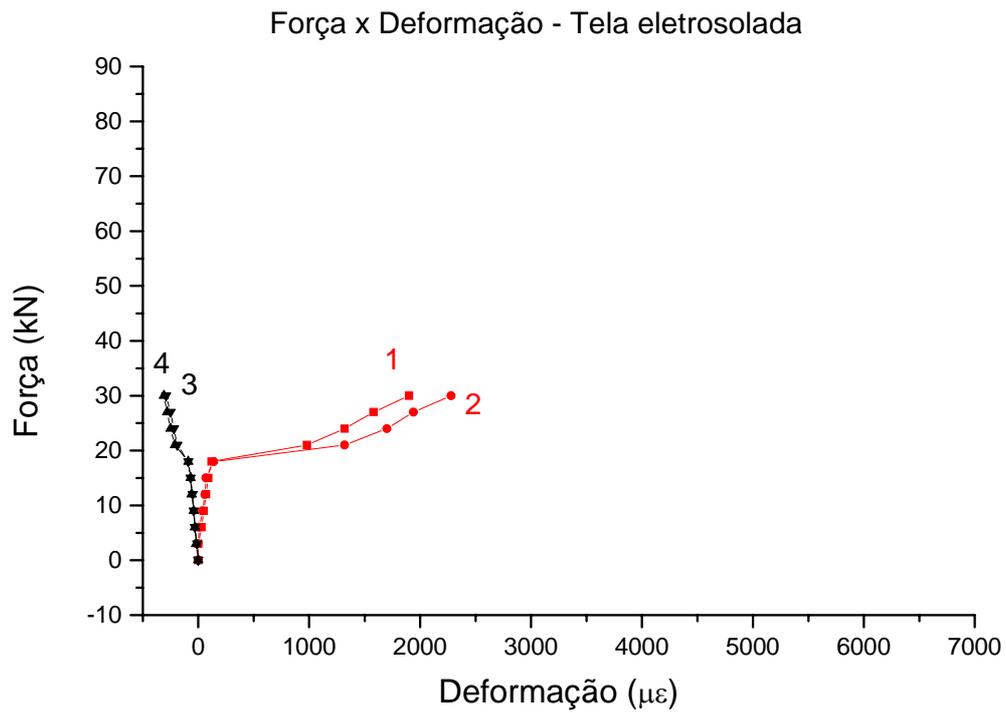


Figura A.6 – Deformação na tela eletrosoldada para o painel P-SL-100.

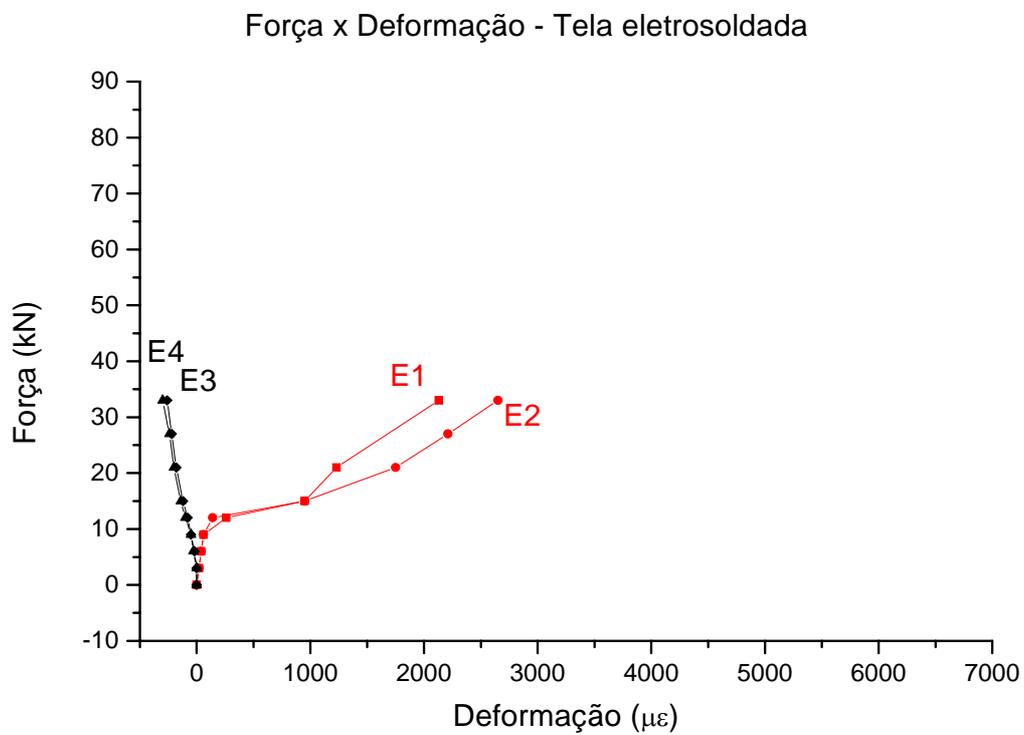


Figura A.7 – Deformação na tela eletrosoldada para o painel P-2LC-PN-45.

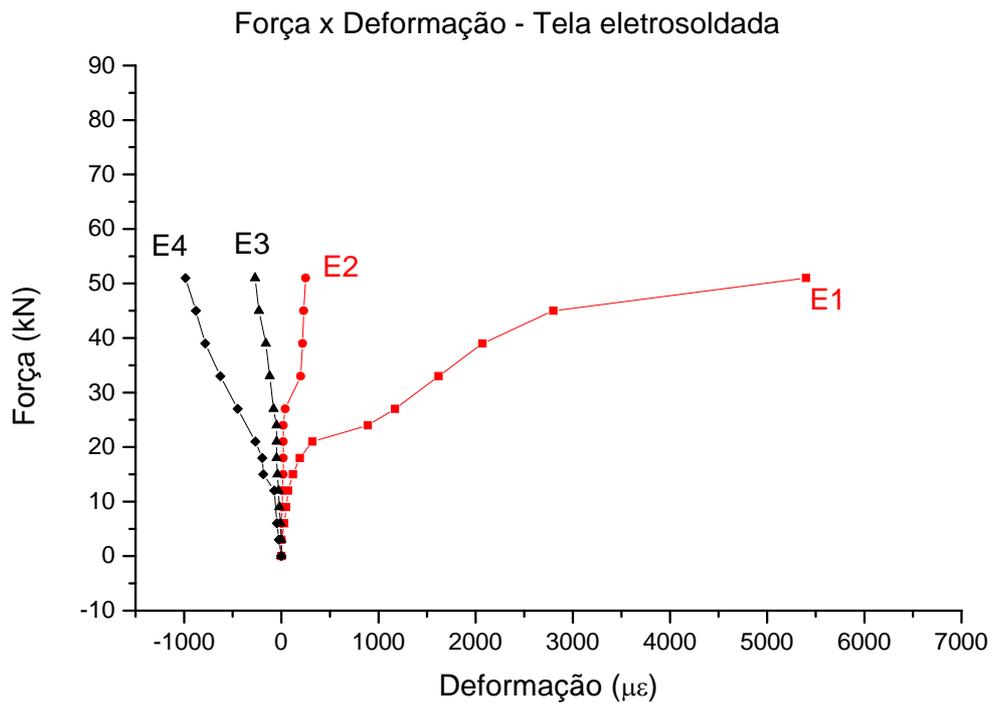


Figura A.8 – Deformação na tela eletrosoldada para o painel P-2L-PP-45.

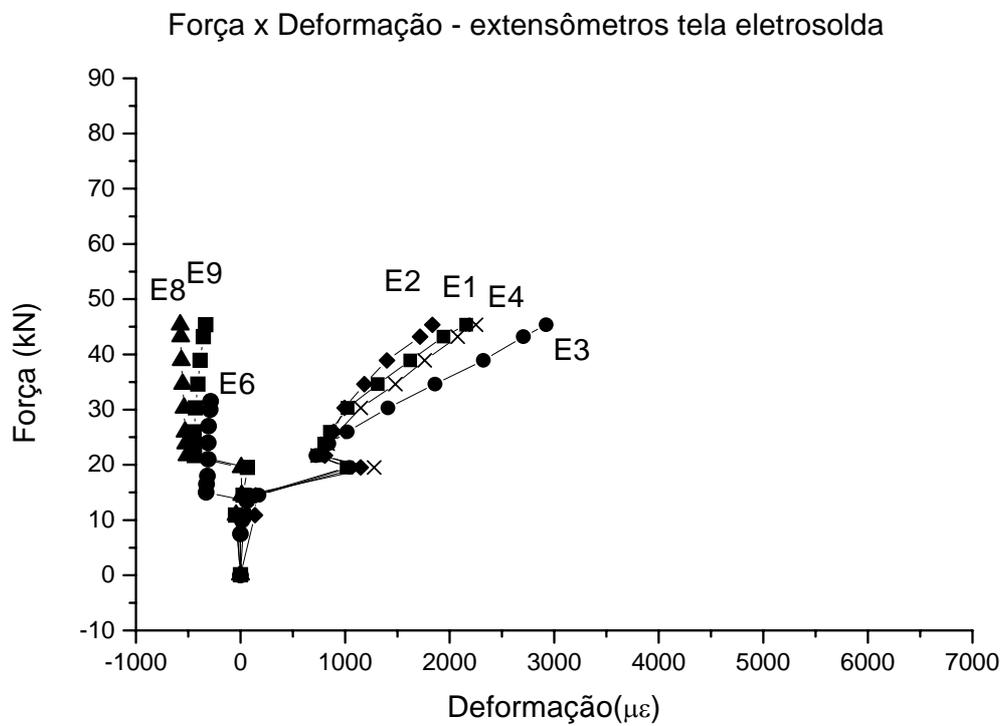


Figura A.9 – Deformação tela eletrosoldada para o painel P-2L-PP-45b.

Força x Deformação - Tela eletrosoldada

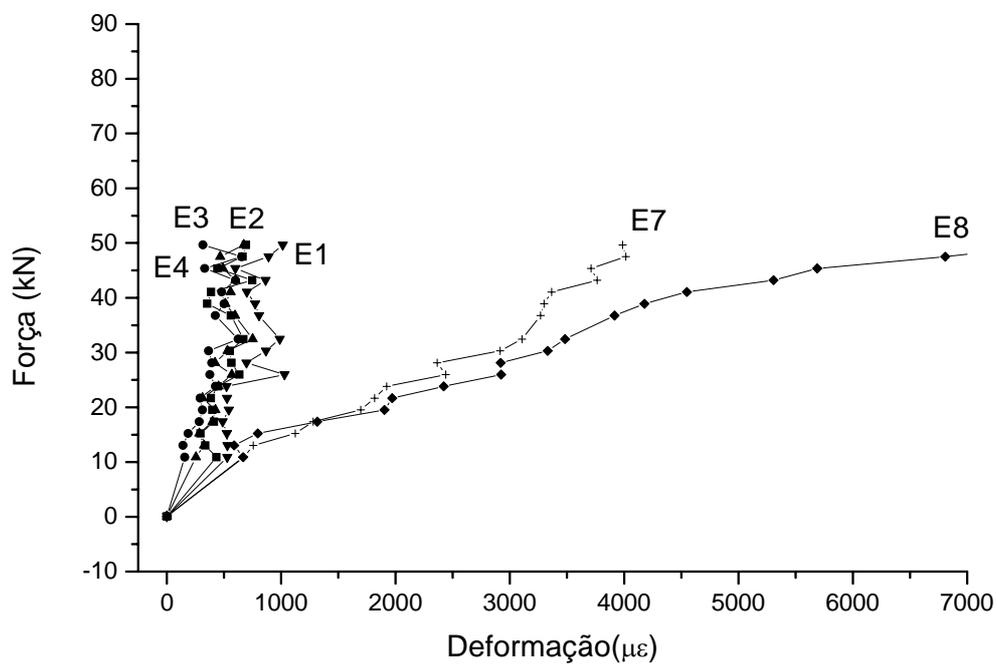


Figura A.10 – Deformação tela eletrosoldada para o painel P-2L-PP-100b.

Força x Deformação - tela eletrosoldada

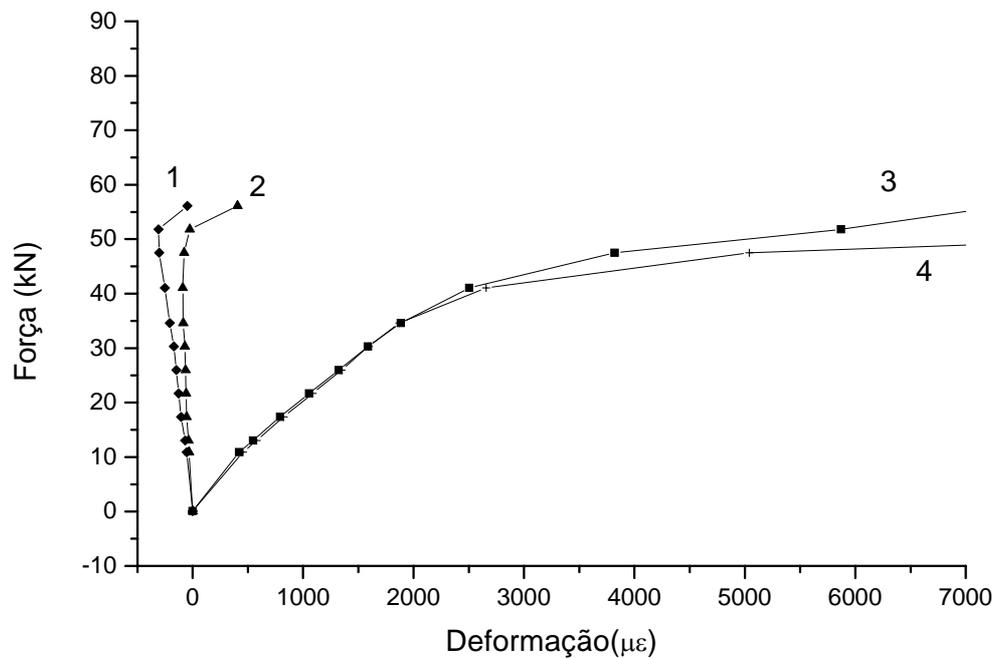


Figura A.11 – Deformação tela eletrosoldada para o painel P-1L-PP-45b.

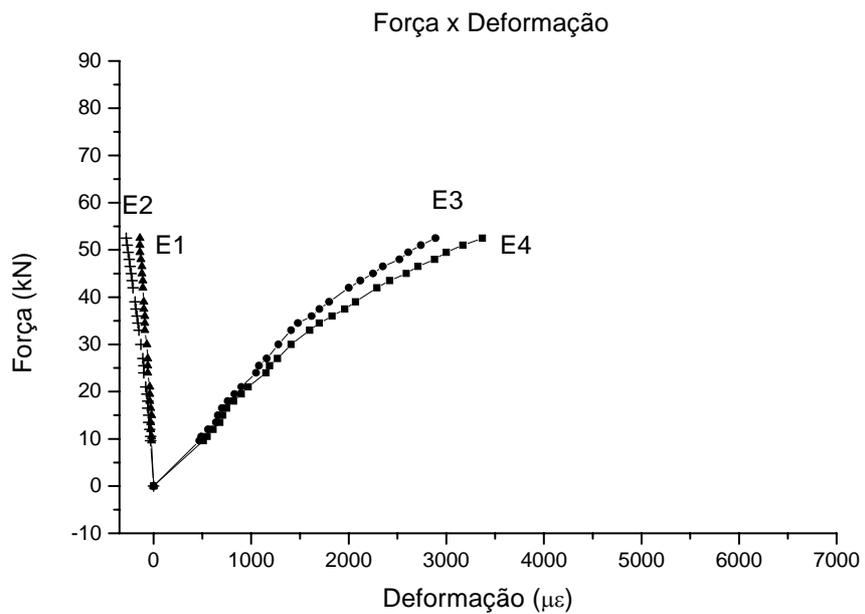


Figura A.12 – Deformação tela eletrosoldada para o painel P-SL-100b.

b. Banzos das treliças

Também foram lidas as deformações dos banzos inferior e superior das treliças no meio do vão.

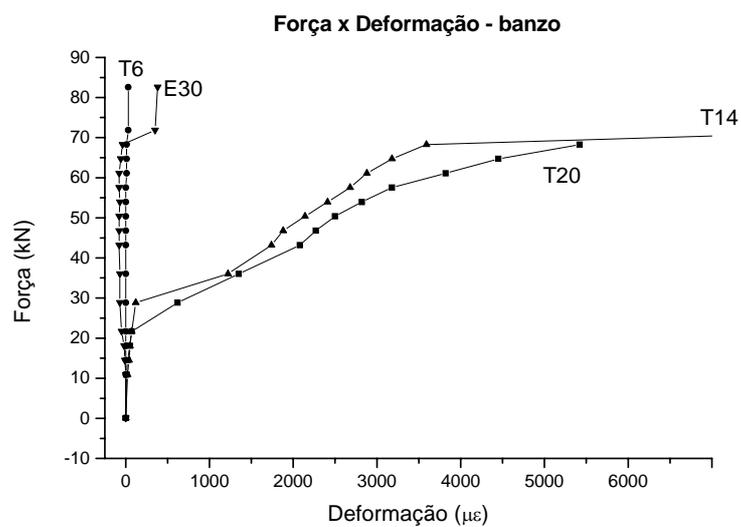


Figura A.13 – Deformação nos banzos das treliças para o painel P-2L-PN-45.

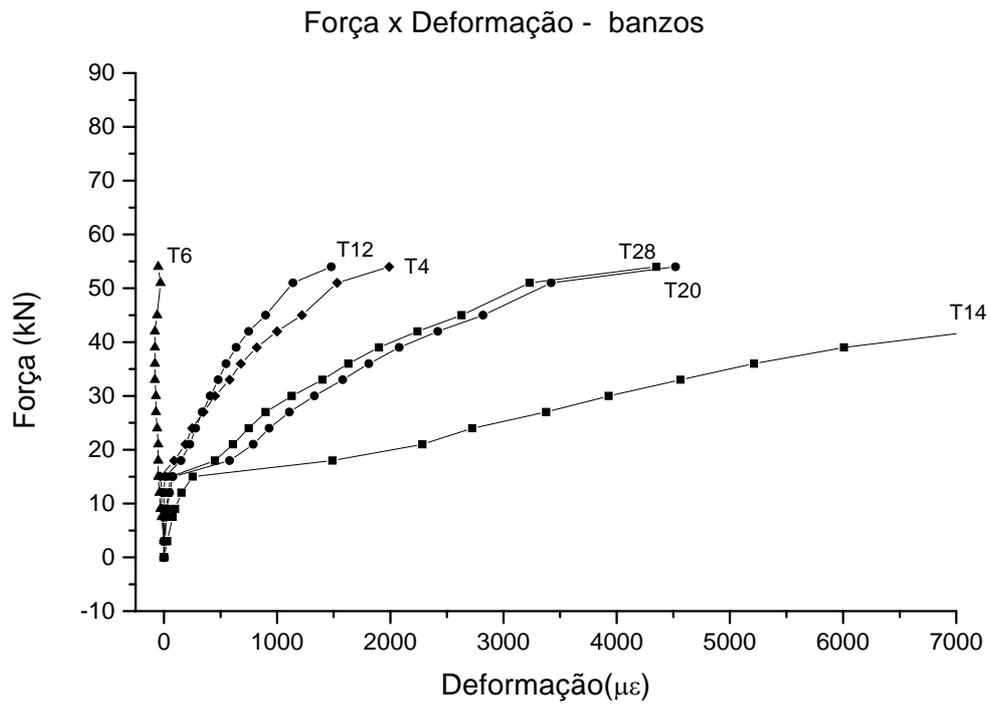


Figura A.14 – Deformação nos banzos das treliças para o painel P-2L-PN-100.

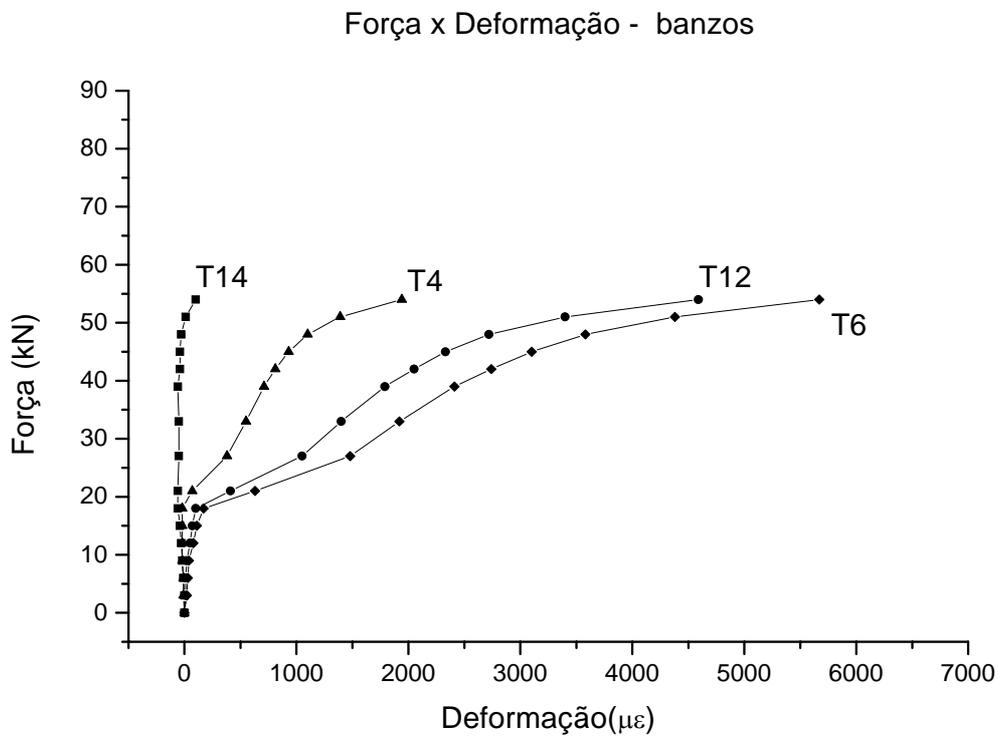


Figura A.15 – Deformação nos banzos das treliças para o painel P-1L-PN-45.

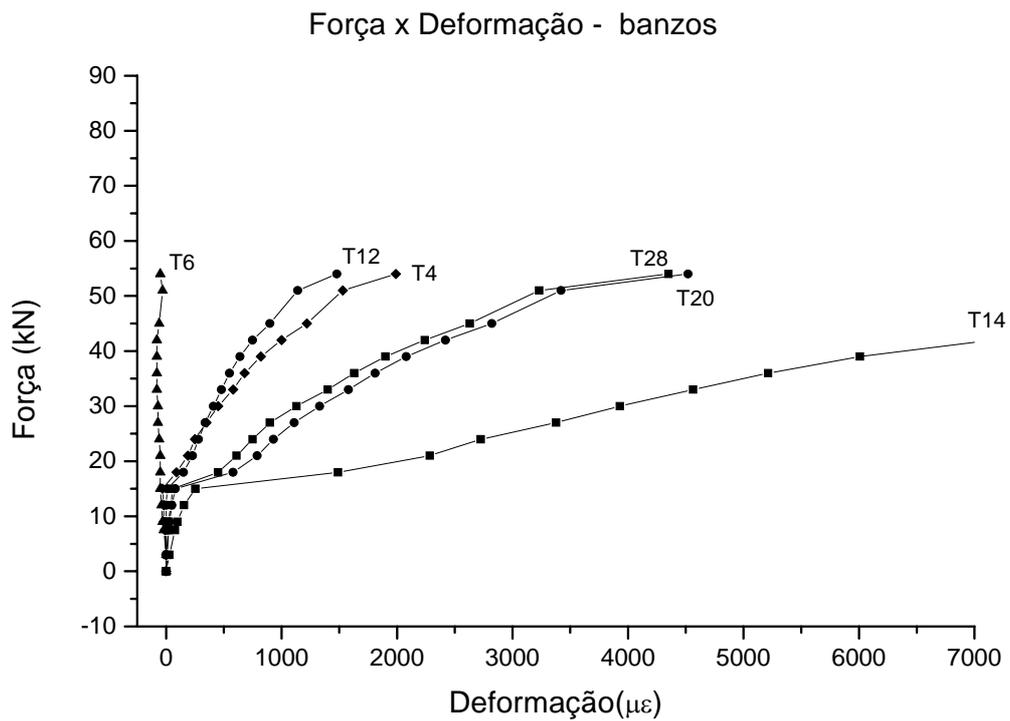


Figura A.16 – Deformação nos banzos das treliças para o painel P-1L-PN-100.

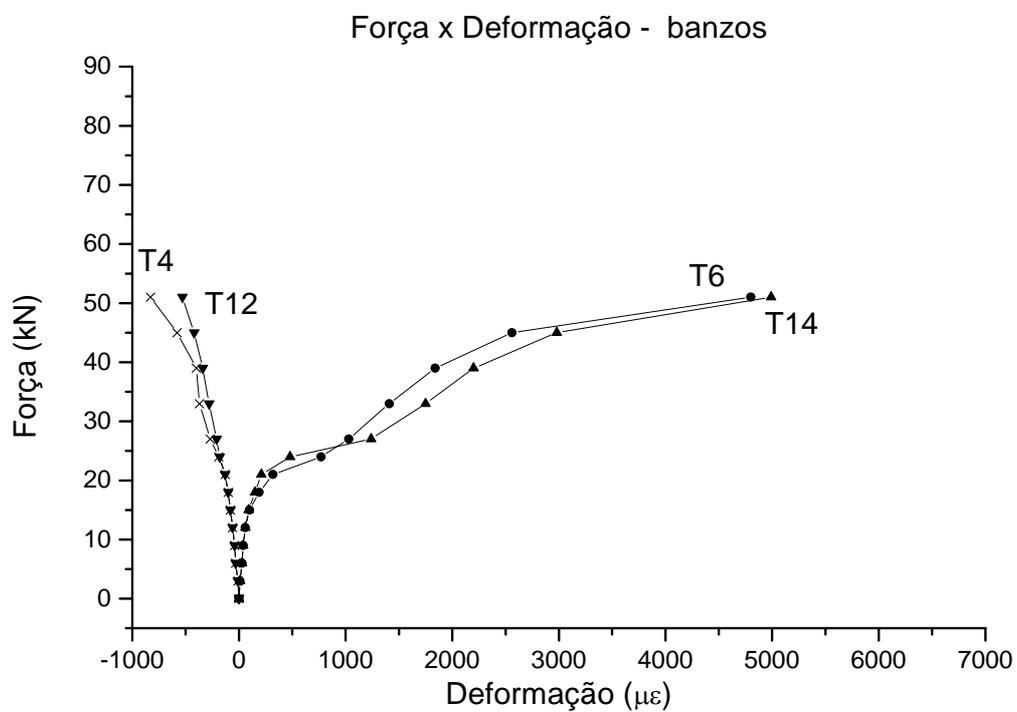


Figura A.17 – Deformação nos banzos das treliças para o painel P-2L-PP-45.

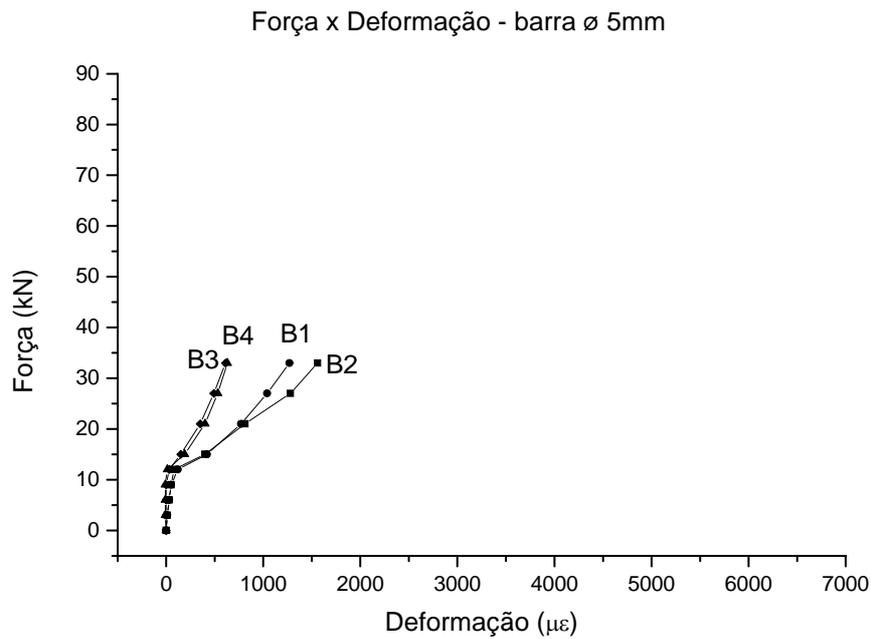


Figura A.18 – Deformação nos banzos das treliças para o painel P-2L-CPN-45.

No gráfico da Figura A.18 as leituras de deformação referem-se às barras de 5 mm que foram fixadas nas treliças. Essas barras foram utilizadas para que se fosse obtido a deformação na seção transversal.

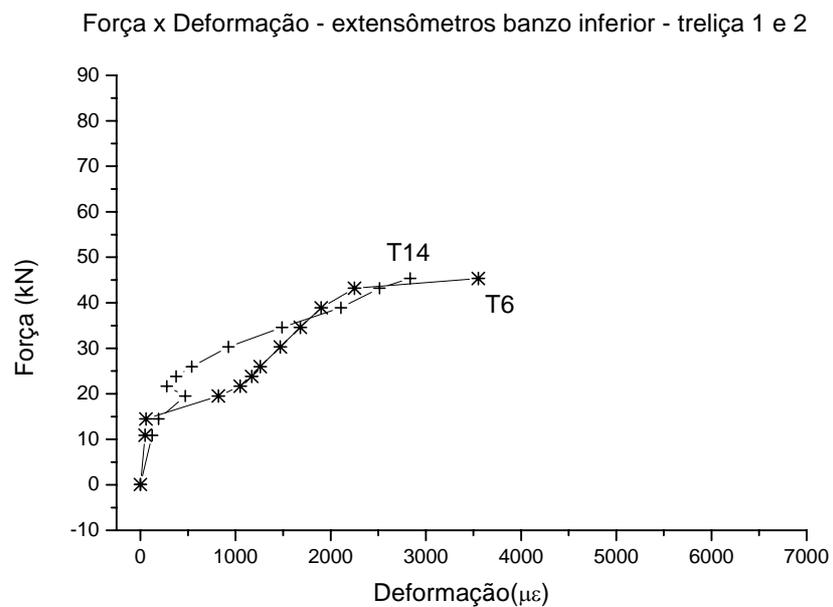


Figura A.19 – Deformação banzo inferior das treliças para o painel P-2L-PP-45b

Força x Deformação - banzo inferior e superior - treliças 1, 2, 3 e 4.

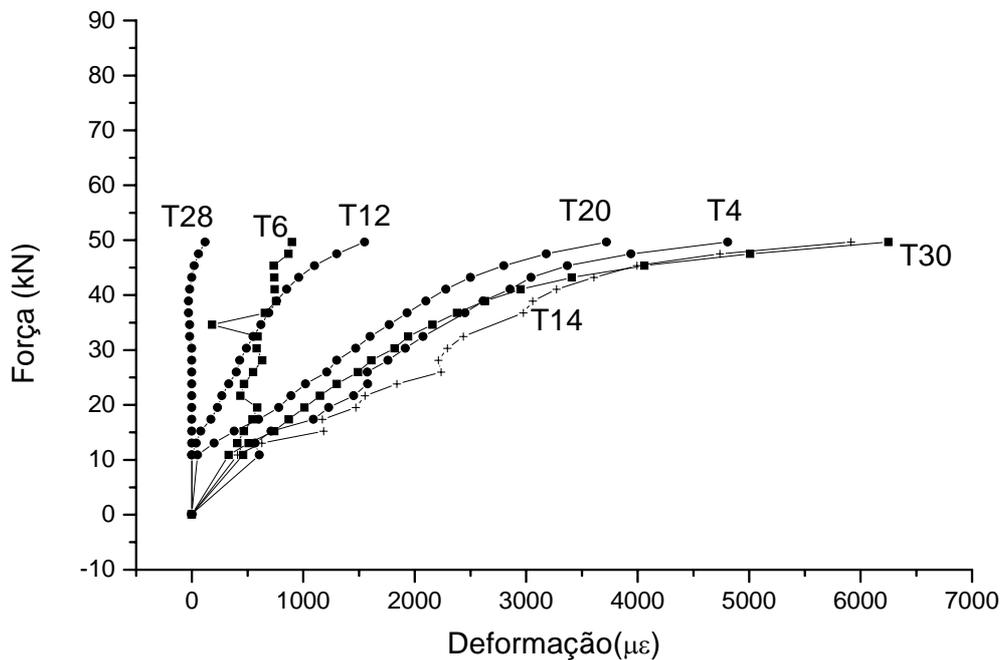


Figura A.20 – Deformação banzo inferior das treliças para o painel P-2L-PN-100b

Força x Deformação - tela eletrosoldada com banzos

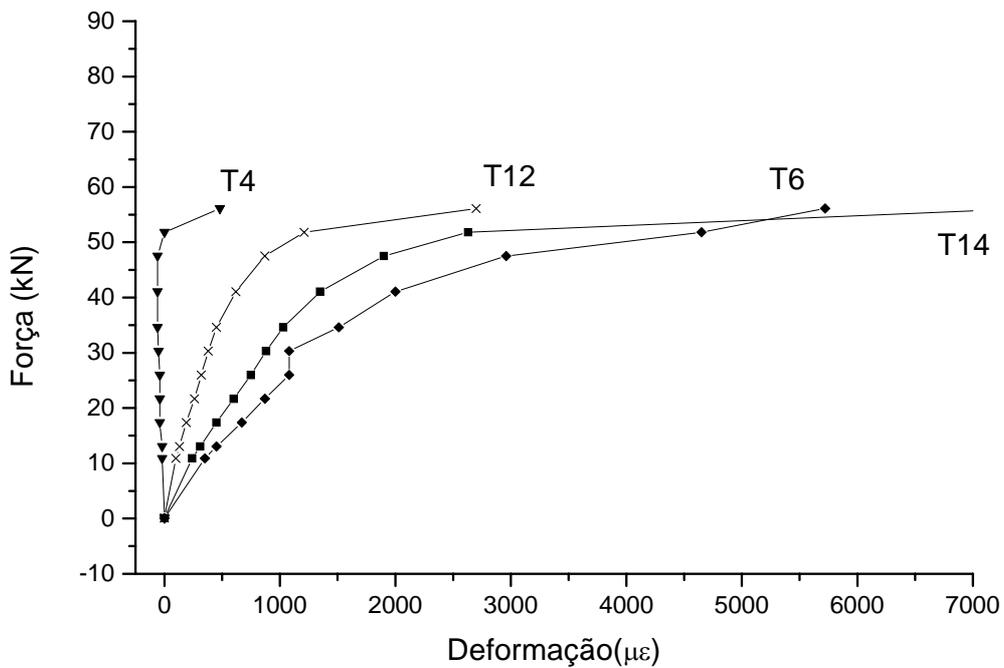


Figura A.21 – Deformação banzo inferior das treliças para o painel P-1L-PN-45b

c. Diagonais nas extremidades das treliças

Para verificar se a distribuição da carga foi uniforme ao longo do comprimento e largura do painel foram coletadas as deformações das extremidades de uma mesma treliça, conforme Figura A.22 fazendo-se os gráficos das Figuras A.23 a A.36.

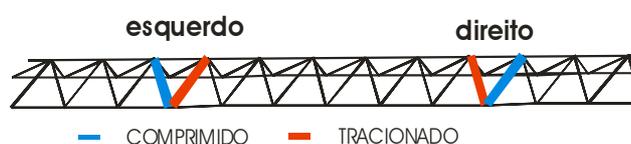


Figura A.22 – Fixação dos extensômetros nas extremidades da treliça.

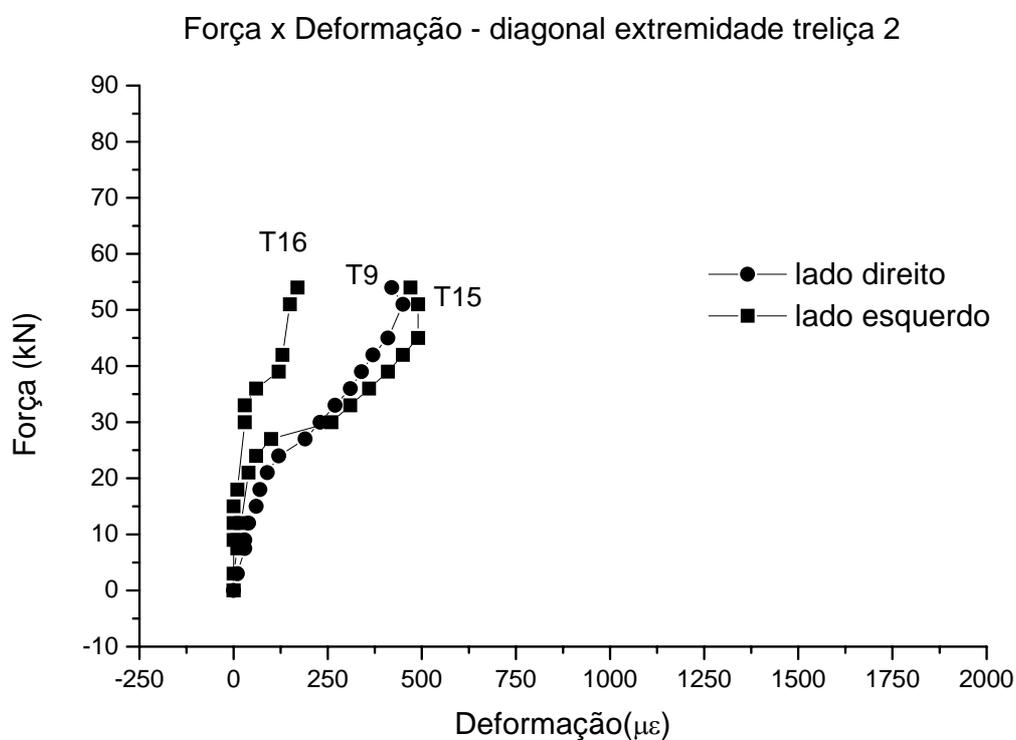


Figura A.23 – Gráfico: Força x Deformação Diagonal Treliça 2 – P-2L-PN-100.

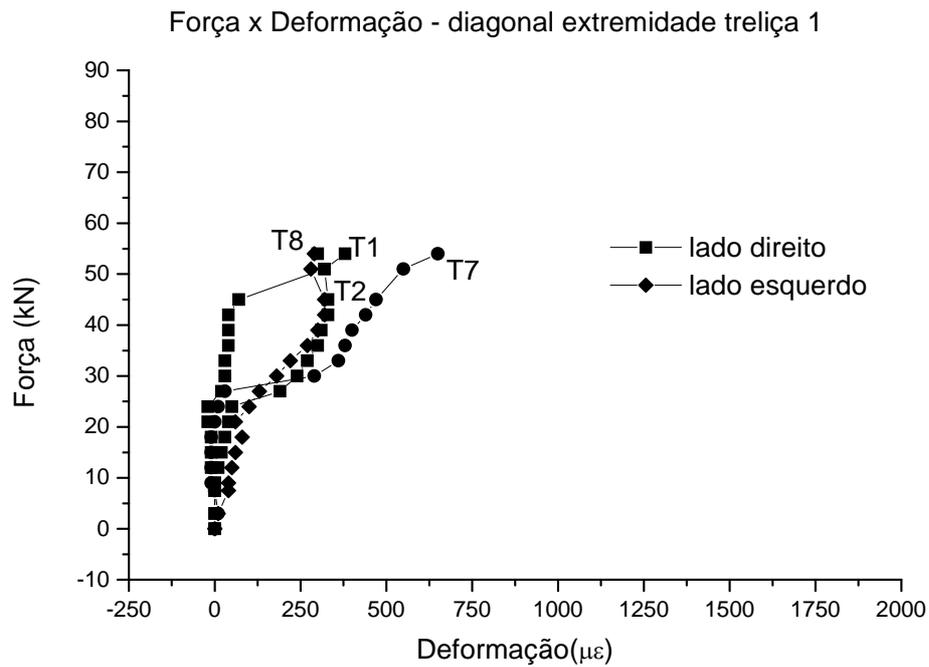


Figura A.24 – Gráfico: Força x Deformação Diagonal Treliça 1 – P-2L-PN-100.

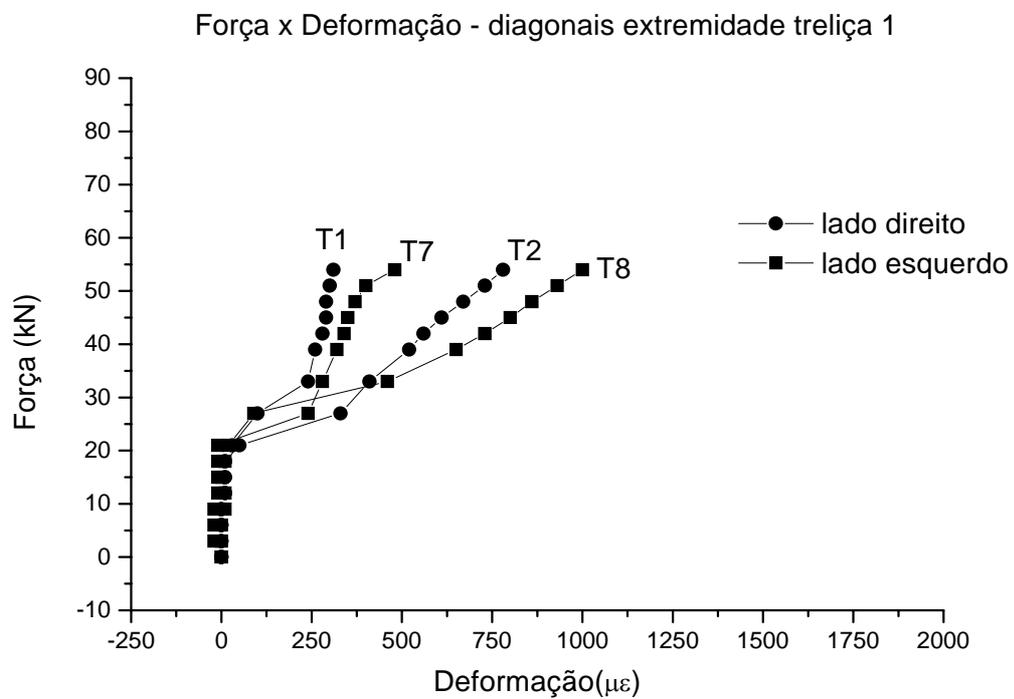


Figura A.25 – Gráfico: Força x Deformação Diagonal Treliça 1 – P-1L-PN-45.

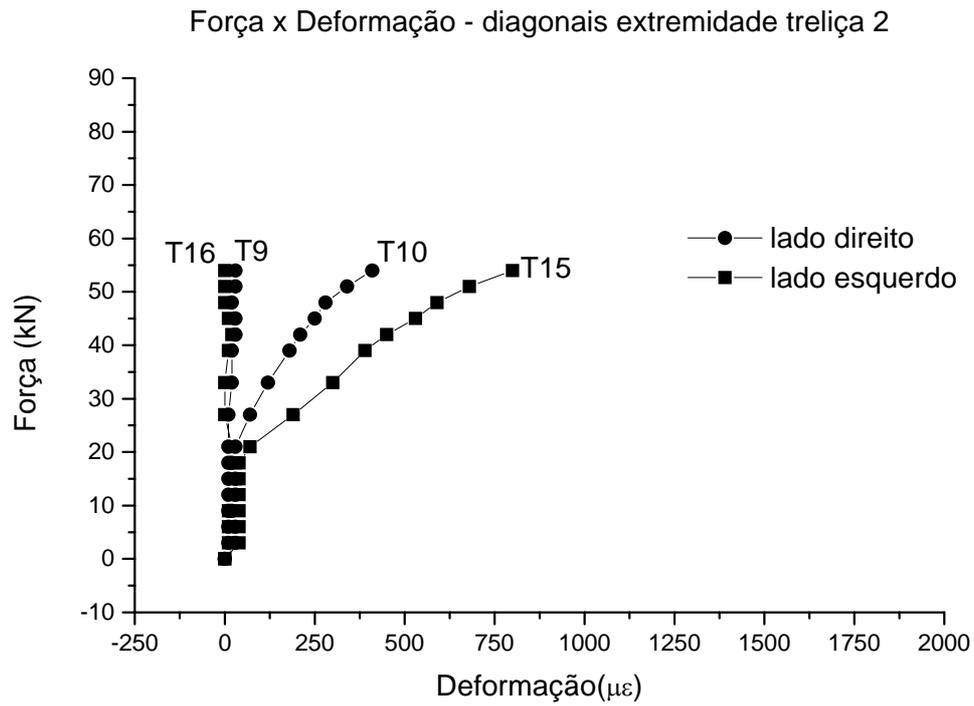


Figura A.26 – Gráfico: Força x Deformação Diagonal Treliça 2 – P-1L-PN-45.

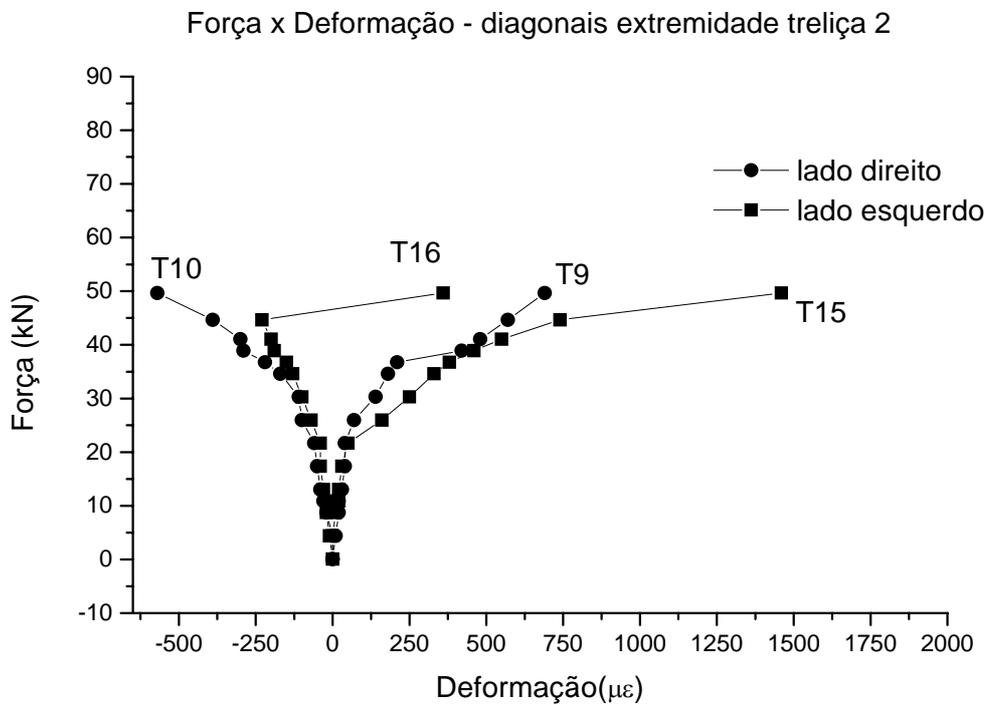


Figura A.27 – Gráfico: Força x Deformação Diagonal Treliça 2 – P-1L-PN-100.

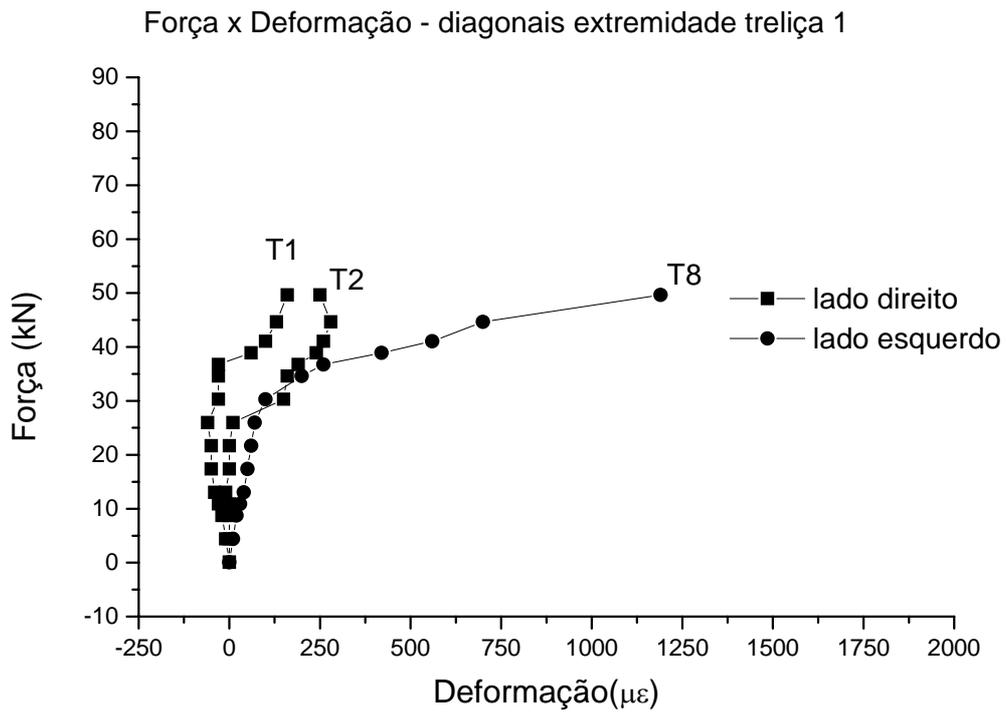


Figura A.28 – Gráfico: Força x Deformação Diagonal Treliça 1 – P-1L-PN-100.

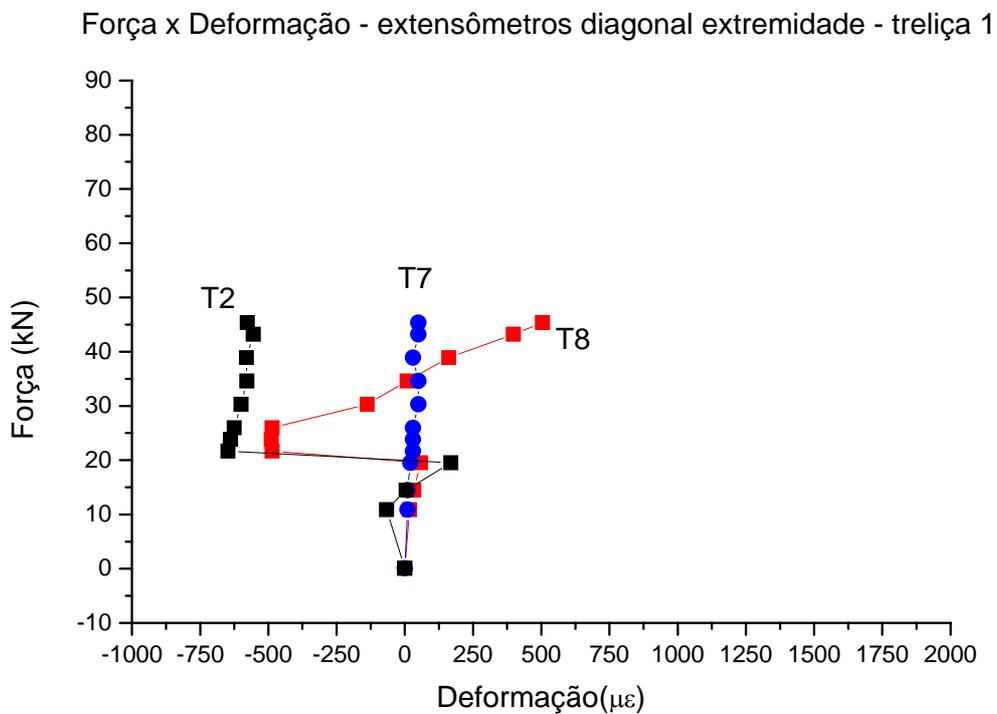


Figura A.29 – Deformação diagonal treliça 1 para o painel P-2L-PP-45b

Força x Deformação - extensômetros diagonal extremidade - treliça 2

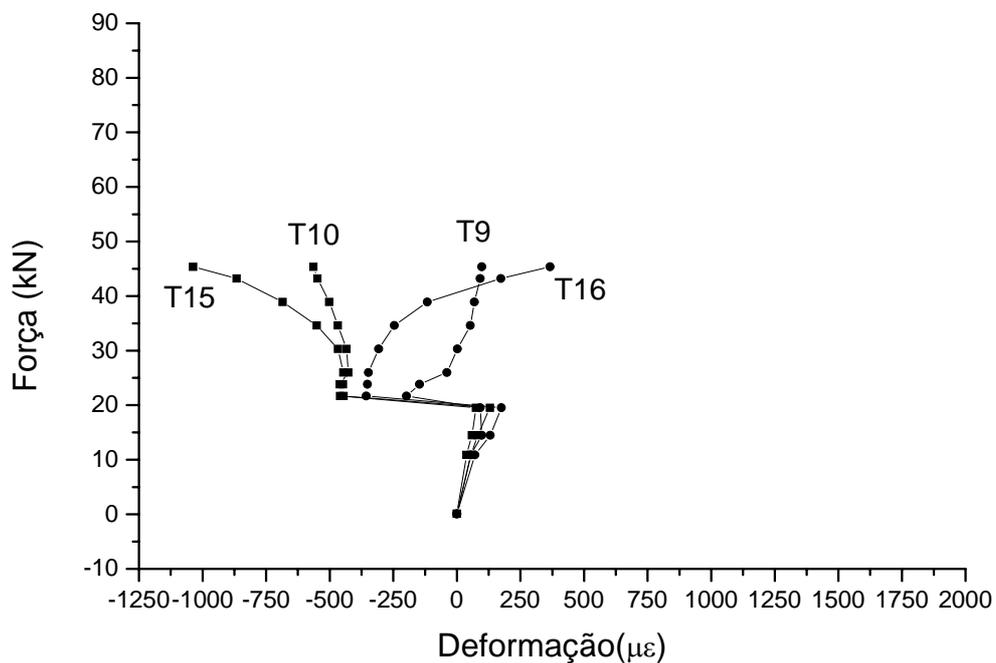


Figura A.30 – Deformação diagonal treliça 2 para o painel P-2L-PP-45b

Força x Deformação - diagonal extremidade treliça 1

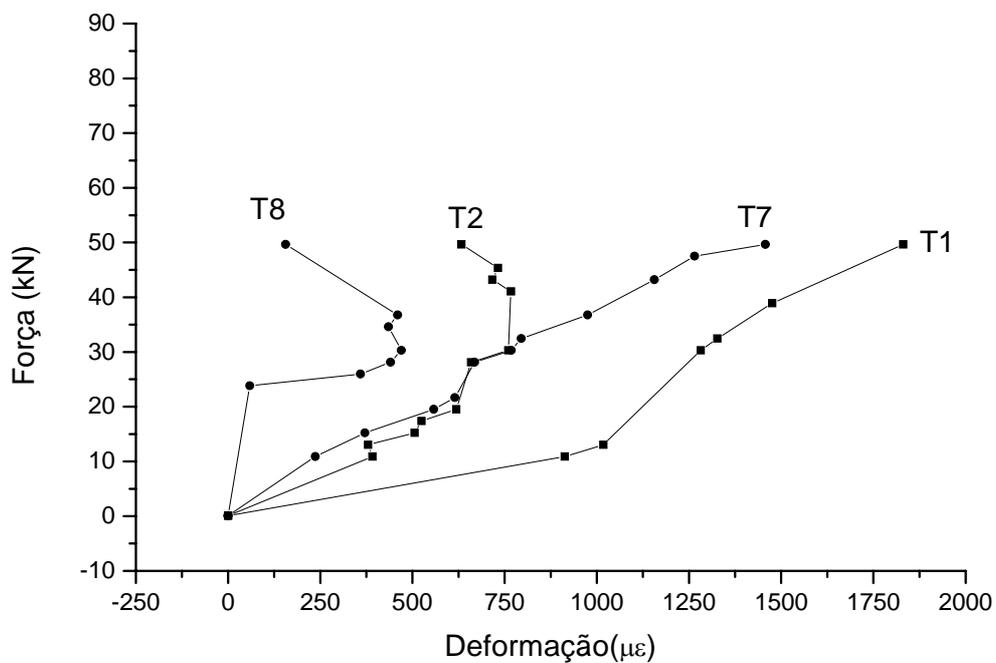


Figura A.31 – Deformação diagonal treliça 1 para o painel P-2L-PN-100b

Força x Deformação - diagonal extremidade treliça 2

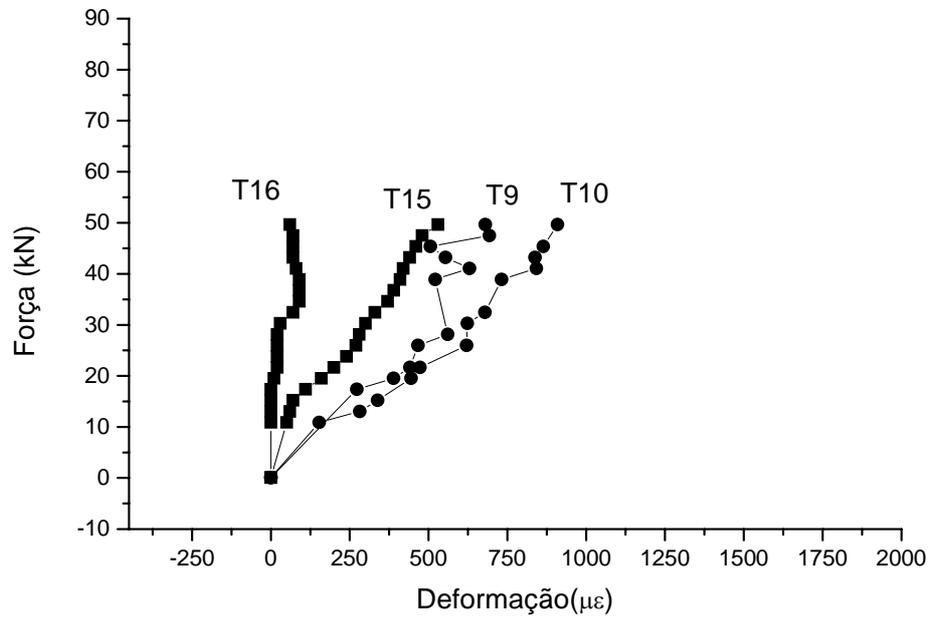


Figura A.32 – Deformação diagonal treliça 2 para o painel P-2L-PN-100b

Força x Deformação - diagonal extremidade treliça 3

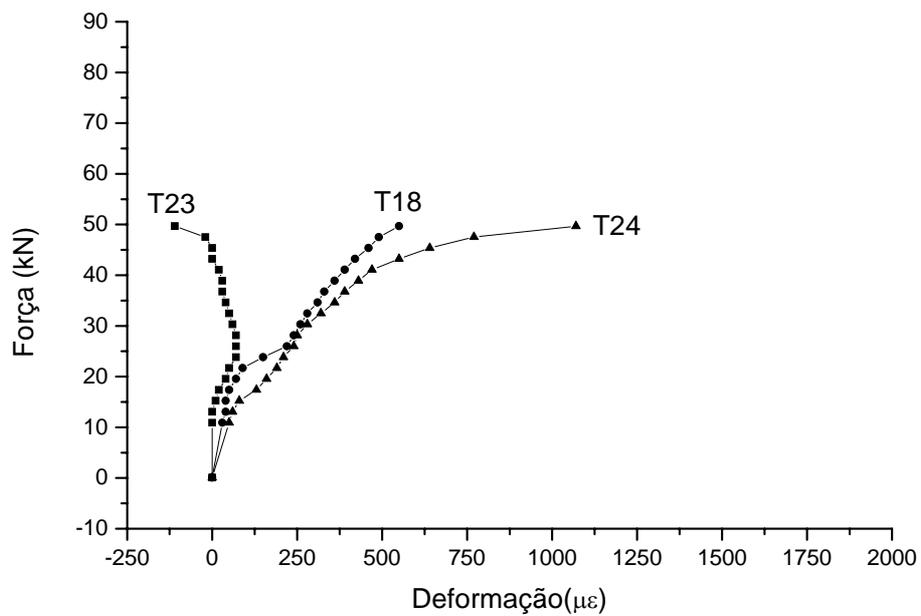


Figura A.33 – Deformação diagonal treliça 3 para o painel P-2L-PN-100b

Força x Deformação - diagonais extremidade treliça 4

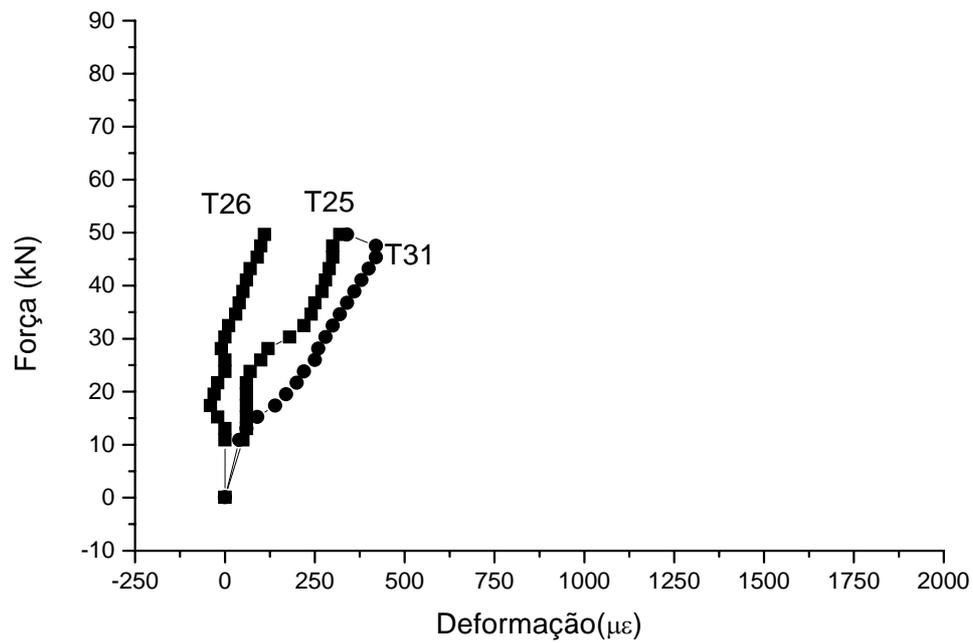


Figura A.34 – Deformação diagonal treliça 4 para o painel P-2L-PN-100b

Força x Deformação - diagonais extremidade treliça 1

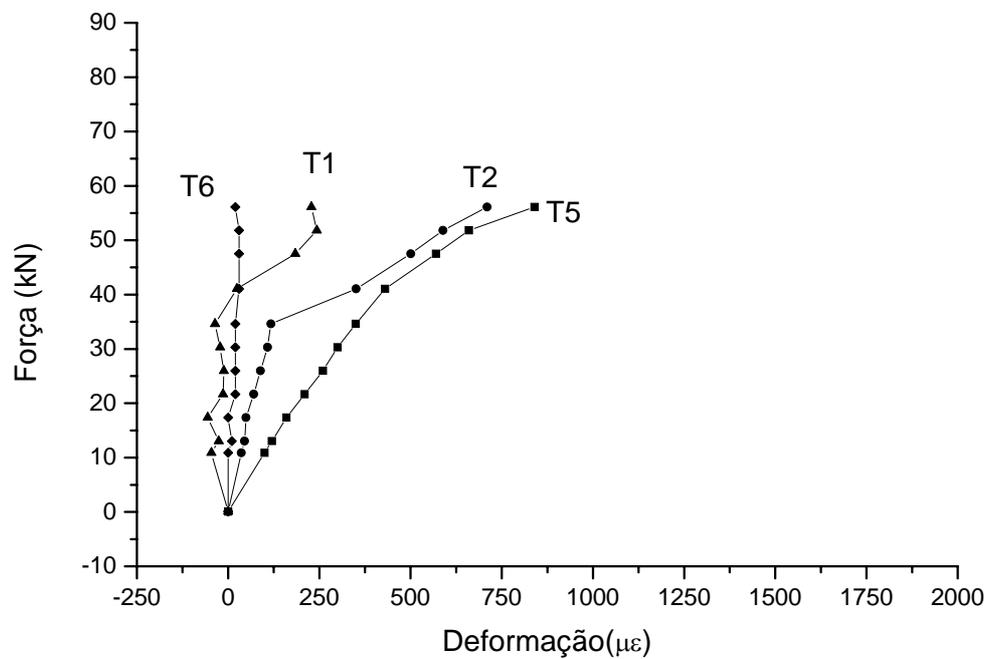


Figura A.35 – Deformação diagonal treliça 1 para o painel P-1L-PN-45b

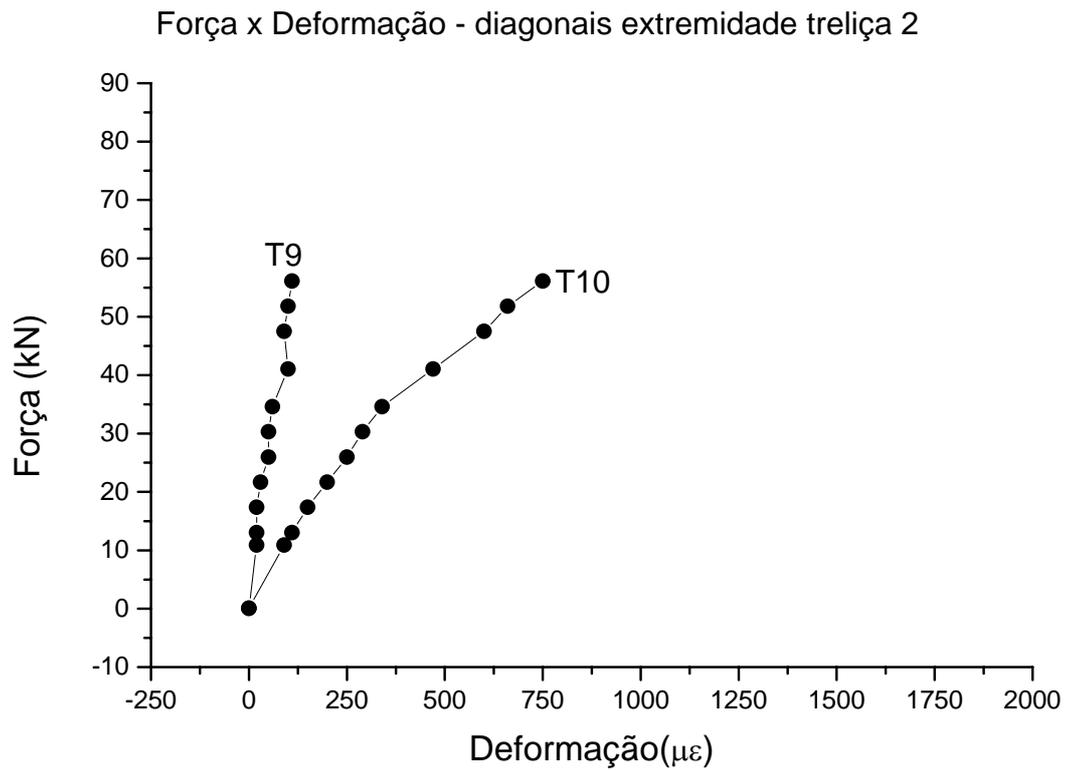


Figura A.36 – Deformação diagonal treliça 2 para o painel P-1L-PN-45b

Foram coletadas as deformações das diagonais de diferentes treliças que se encontravam no mesmo lado da largura do painel, conforme Figura A.37.

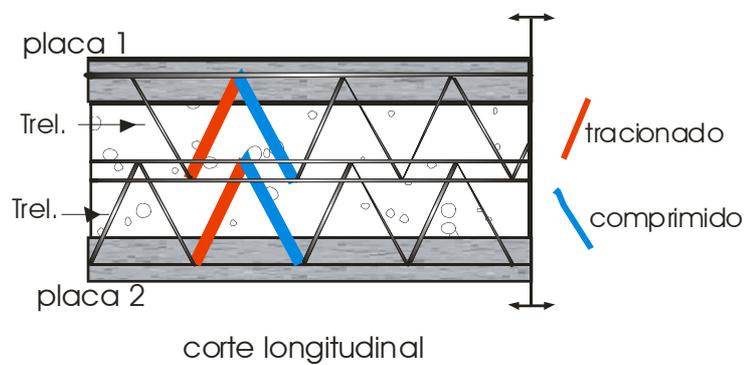


Figura A.37 – Diagonais de diferentes treliças no mesmo lado da largura do painel.

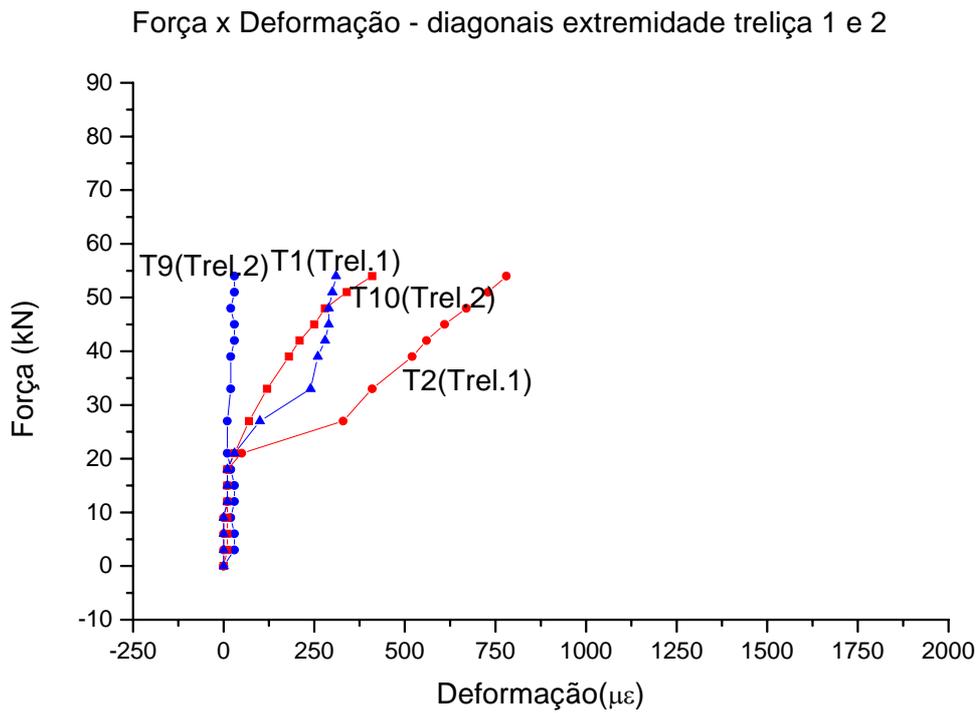


Figura A.38 – Gráfico: Força x Deformação Diagonal Treliça 1 e 2 – P-1L-PN-45.

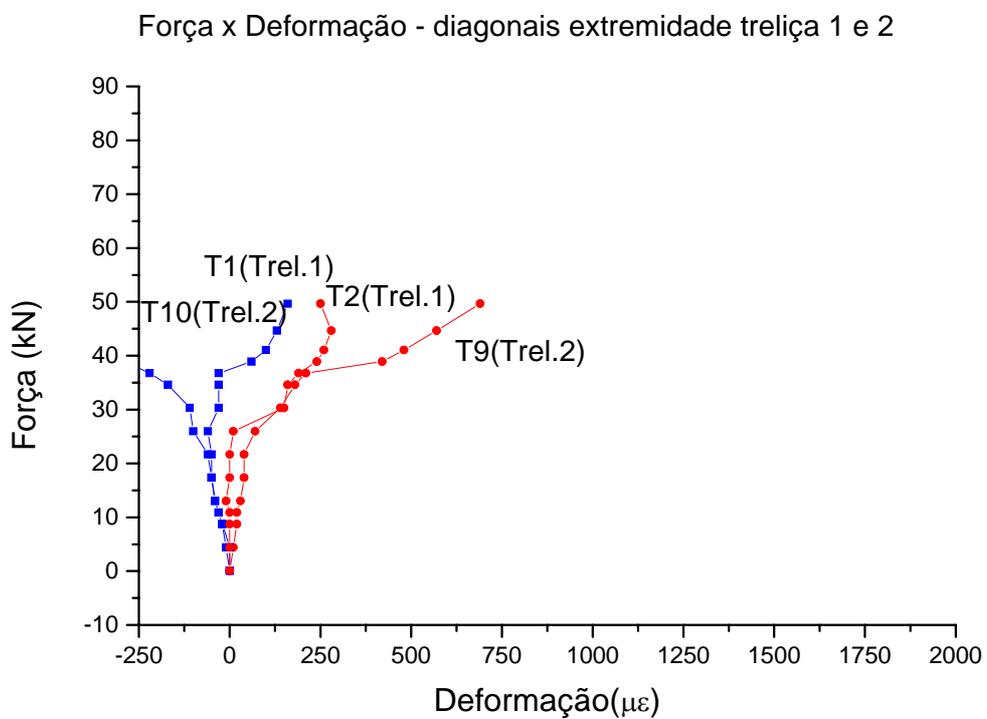


Figura A.39 – Gráfico: Força x Deformação Diagonal Treliça 1 e 2 – P-1L-PN-100.

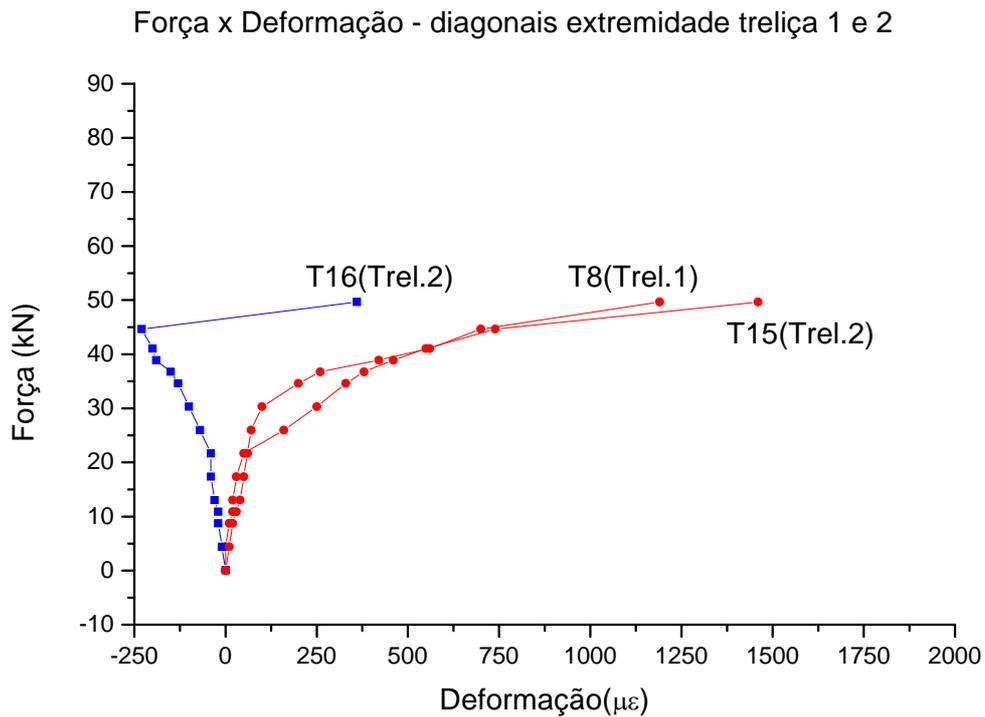


Figura A.40 – Gráfico: Força x Deformação Diagonal Treliça 1 e 2 – P-1L-PN-100.

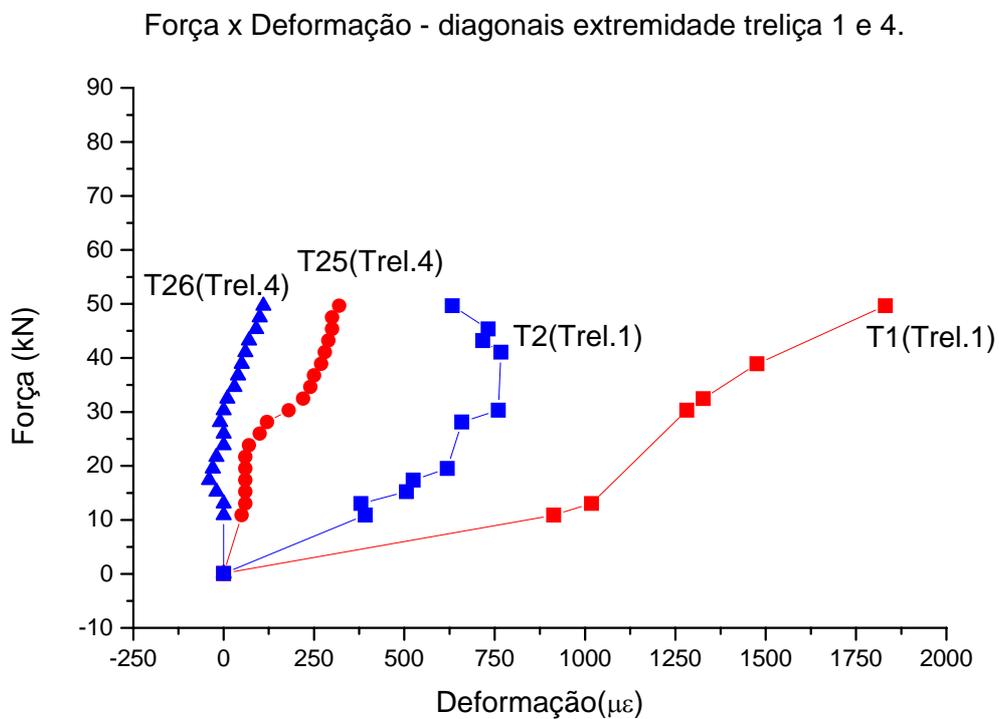


Figura A.41 – Gráfico: Força x Deformação Diagonal Treliça 1 e 4 lado direito – P-2L-PN-100b.

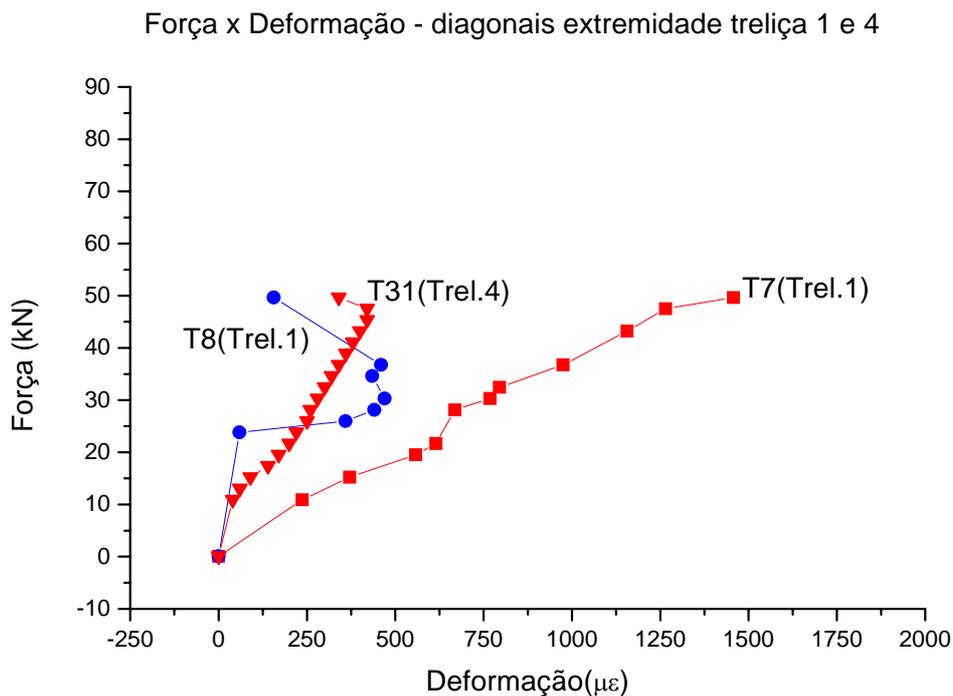


Figura A.42 – Gráfico: Força x Deformação Diagonal Treliça 1 e 4 - lado esquerdo – P-2L-PN-100b.

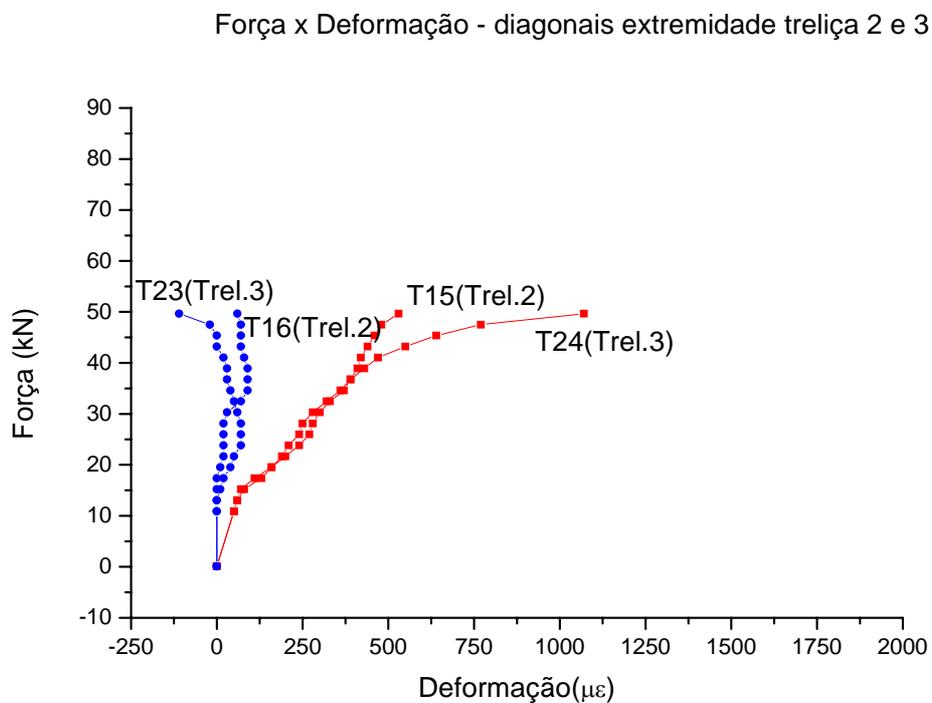


Figura A.43 – Gráfico: Força x Deformação Diagonal Treliça 2 e 3 lado esquerdo – P-2L-PN-100b.

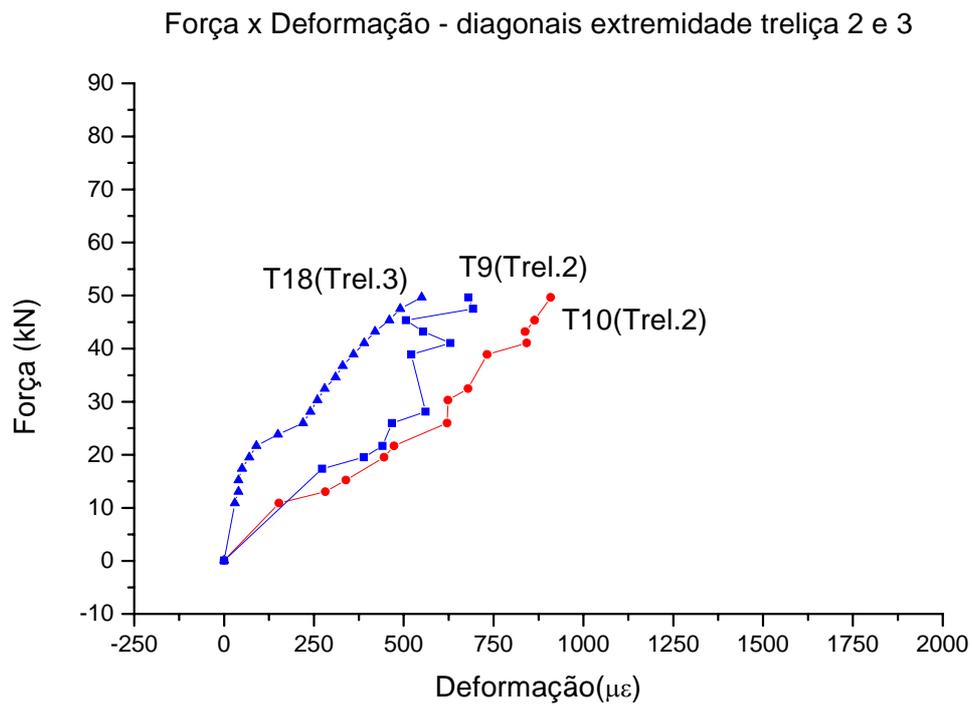


Figura A.44 – Gráfico: Carga x Deformação Diagonal Treliça 2 e 3 - lado direito – P-2L-PN-100b.

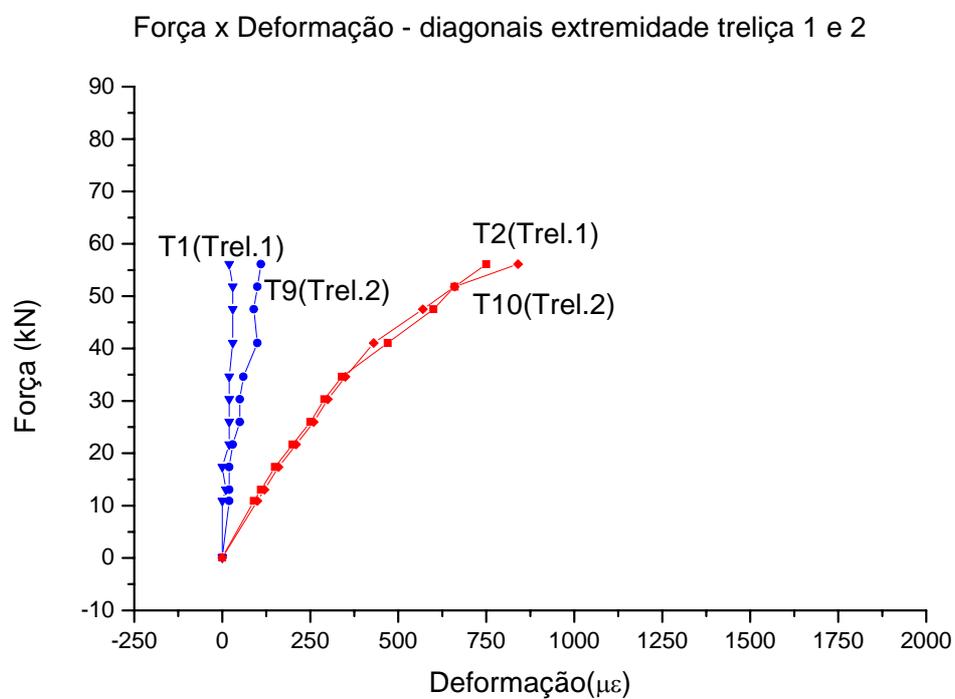


Figura A.45 – Gráfico: Carga x Deformação Diagonal Treliça 1 e 2 - lado direito – P-1L-PN-45b.

d. Diagonais no centro das treliças

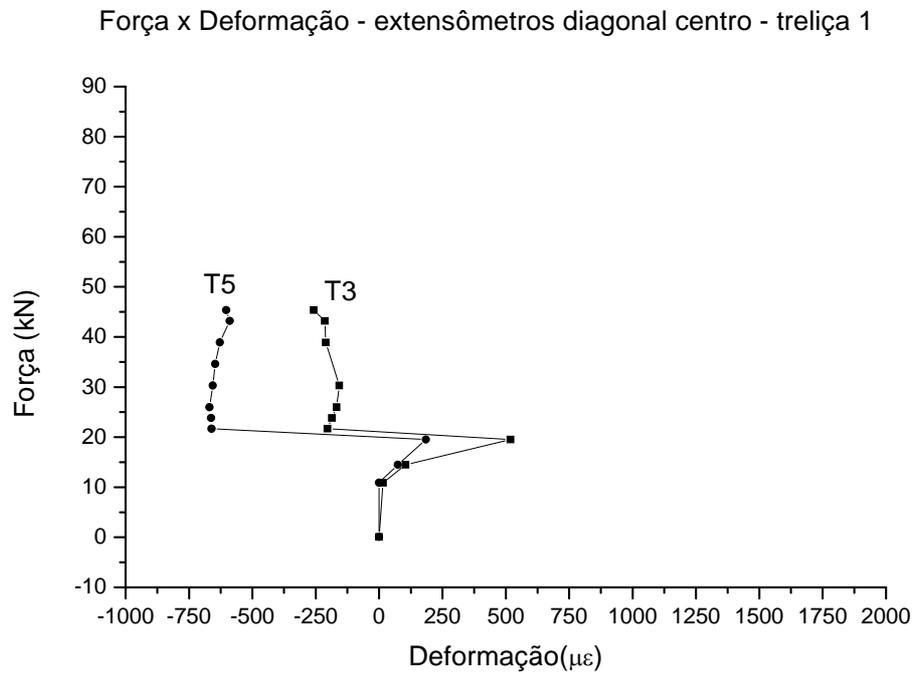


Figura A.46 – Deformação diagonal central treliça 1 para o painel P-2L-PP-45b

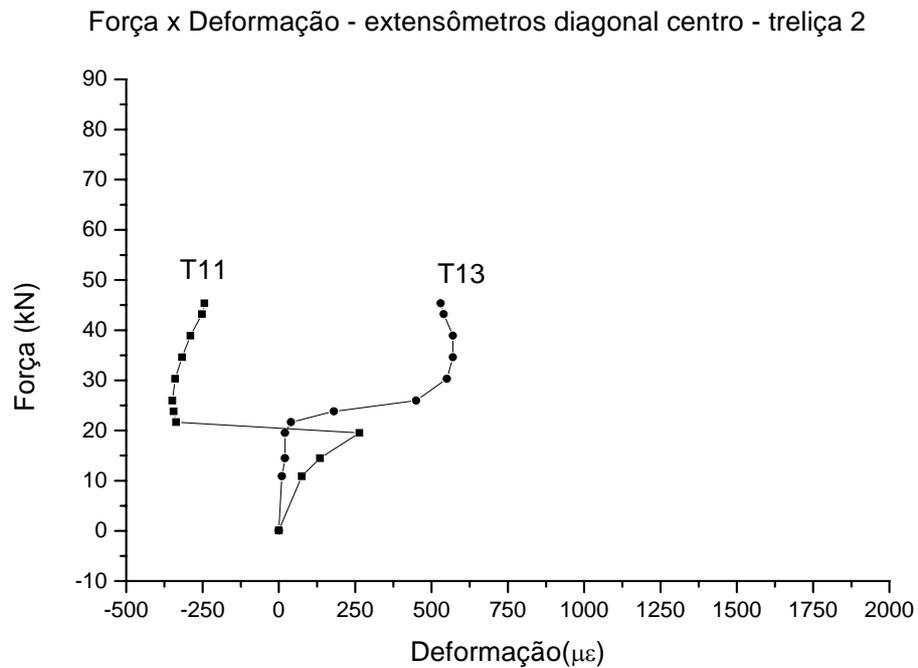


Figura A.47 – Deformação diagonal central treliça 2 para o painel P-2L-PP-45b

Força x Deformação - diagonal centro treliça 1

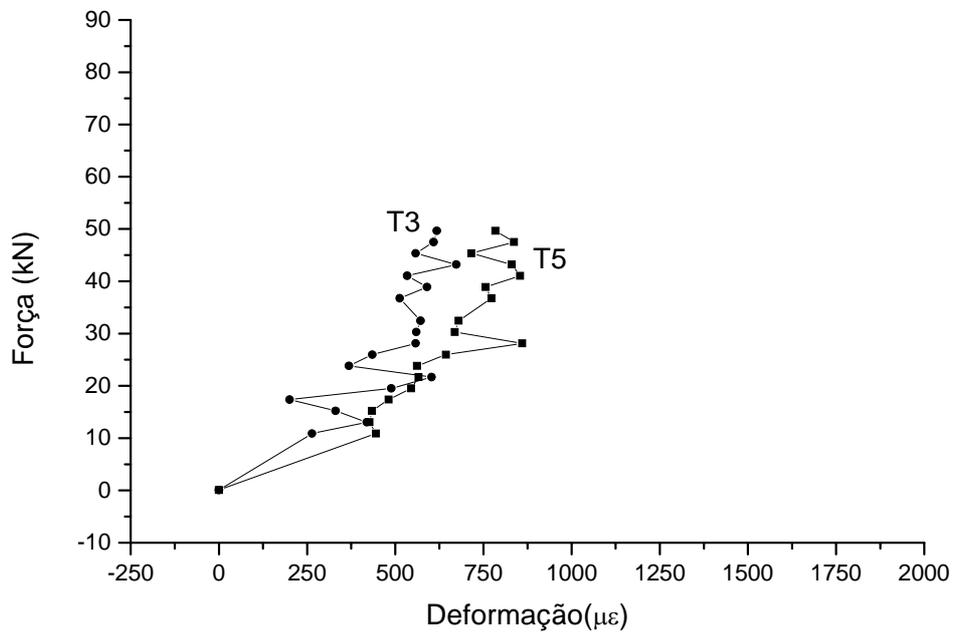


Figura A.48 – Deformação diagonal central treliça 1 para o painel P-2L-PN-100b

Força x Deformação - diagonal centro treliça 2

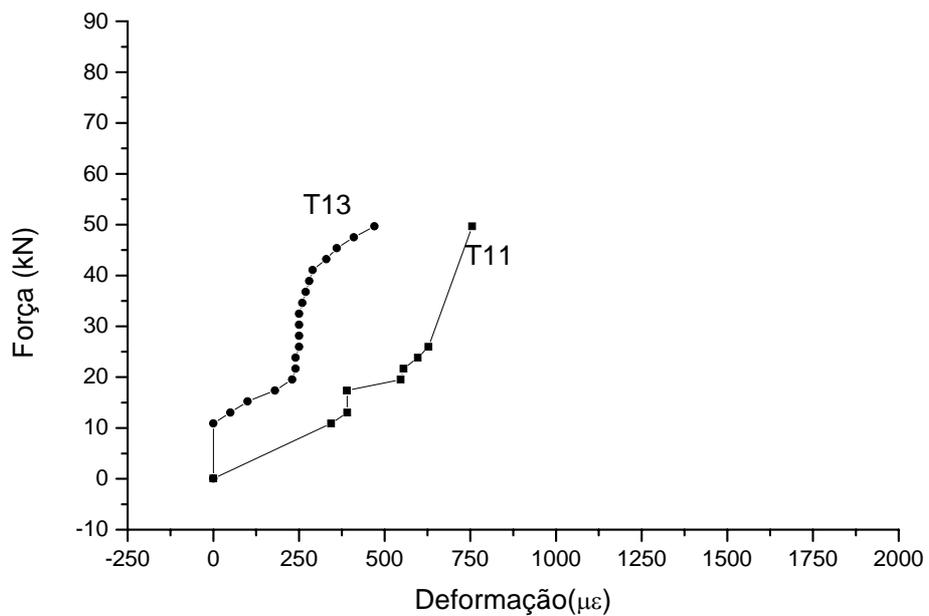


Figura A.49 – Deformação diagonal central treliça 2 para o painel P-2L-PN-100b

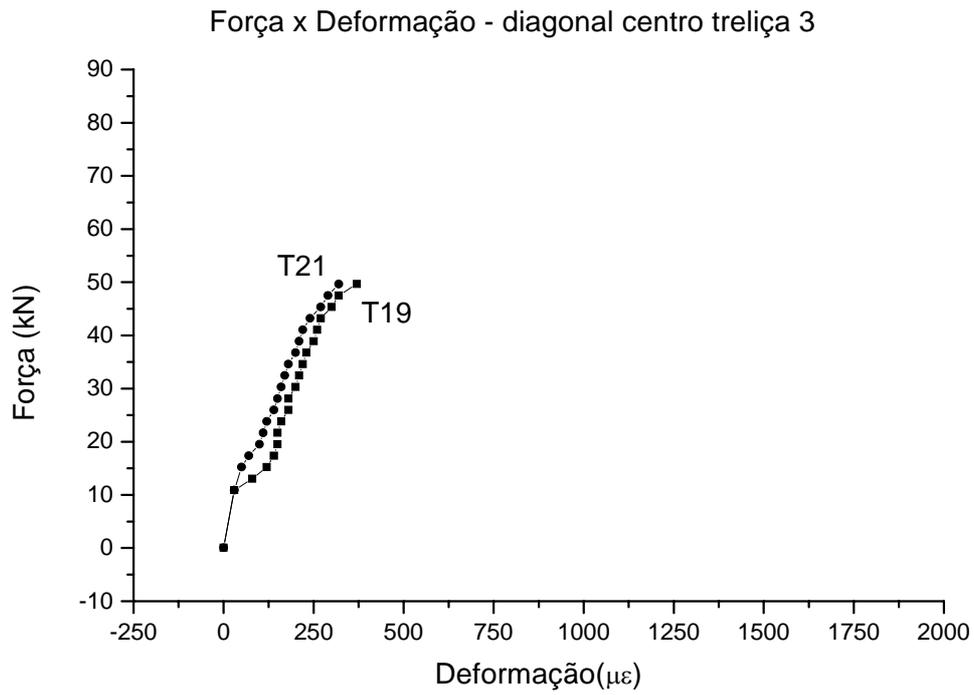


Figura A.50 – Deformação diagonal central treliça 3 para o painel P-2L-PN-100b

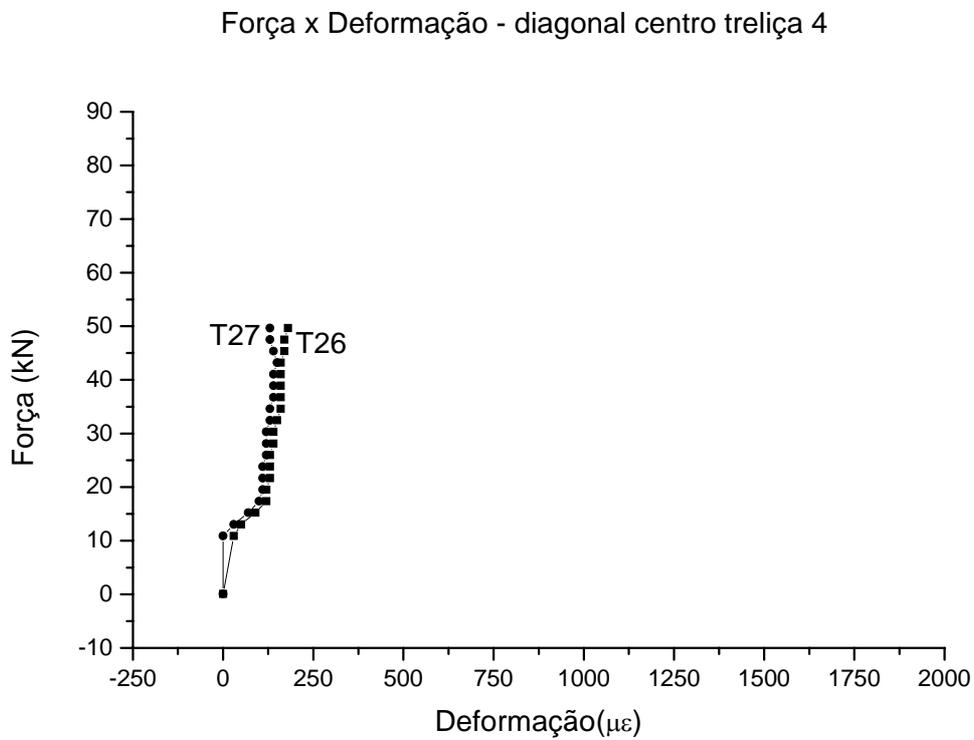


Figura A.51 – Deformação diagonal central treliça 4 para o painel P-2L-PN-100b

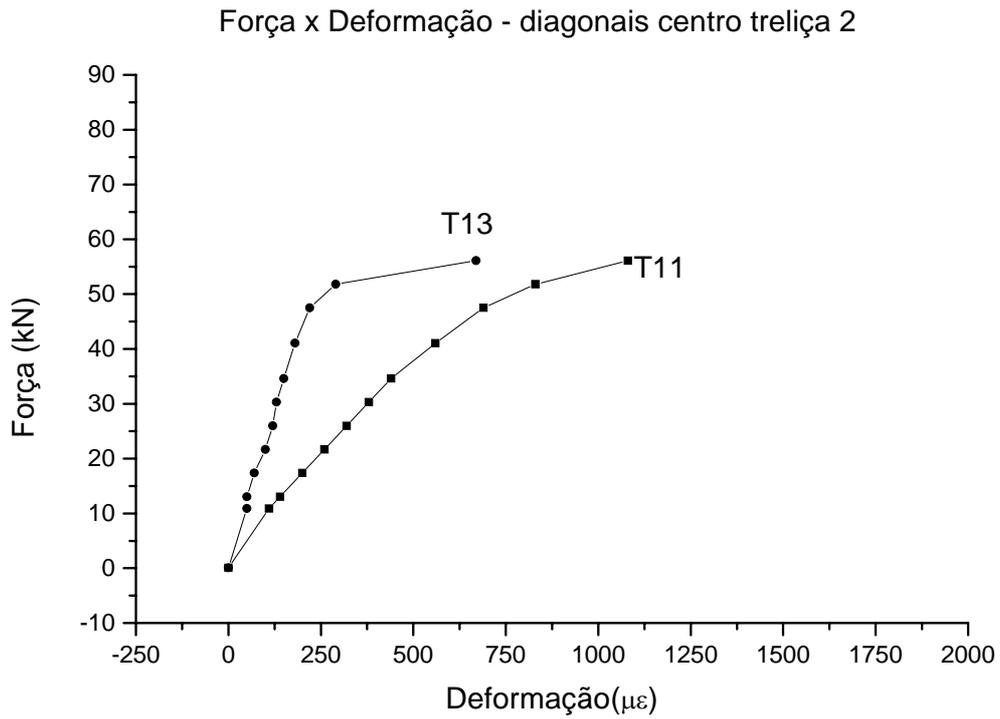


Figura A.52 – Deformação diagonal central treliça 2 para o painel P-1L-PN-45b

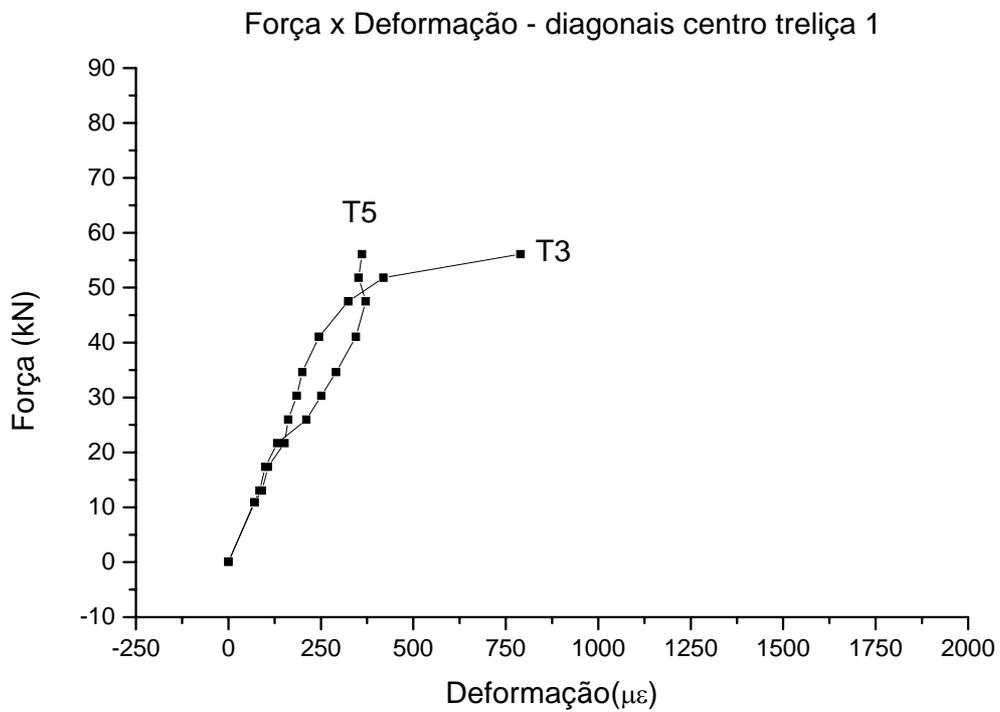


Figura A.53 – Deformação diagonal central treliça 1 para o painel P-1L-PN-45b

e. Concreto

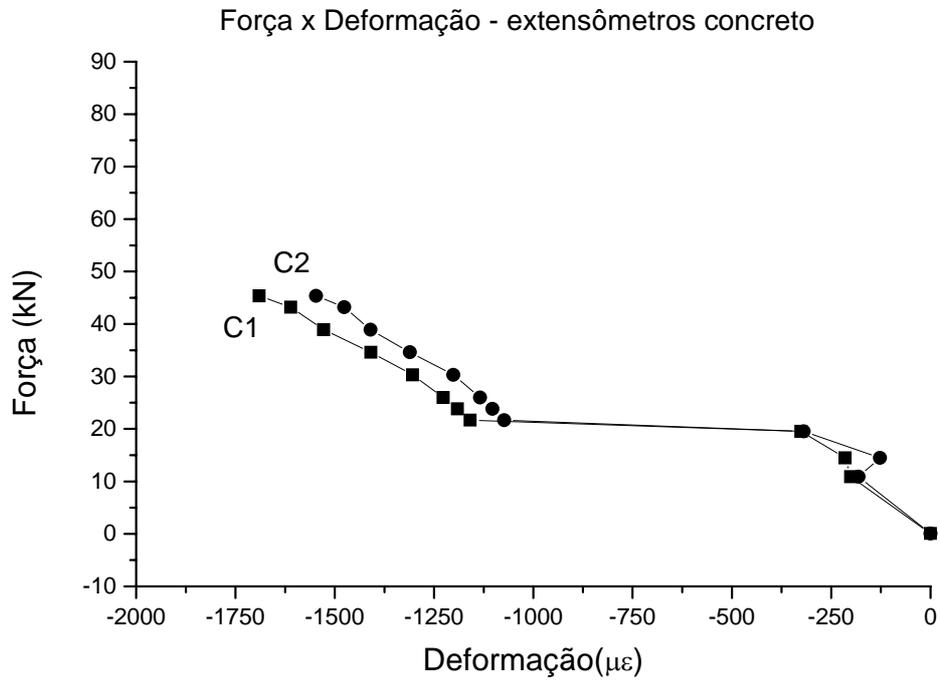


Figura A.54 – Deformação no concreto para o painel P-2L-PP-45b

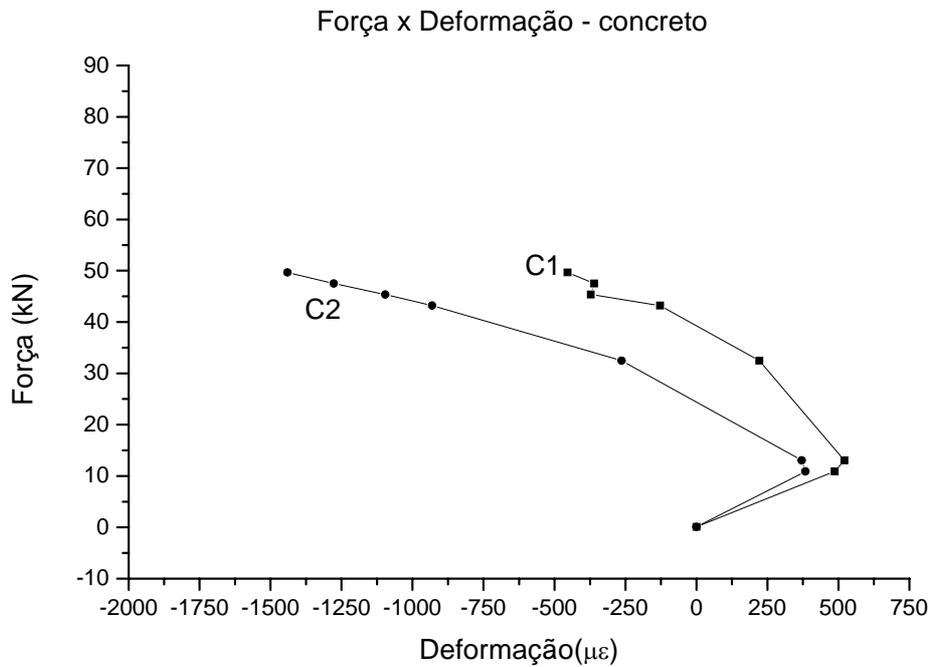


Figura A.55 – Deformação no concreto para o painel P-2L-PN-100b

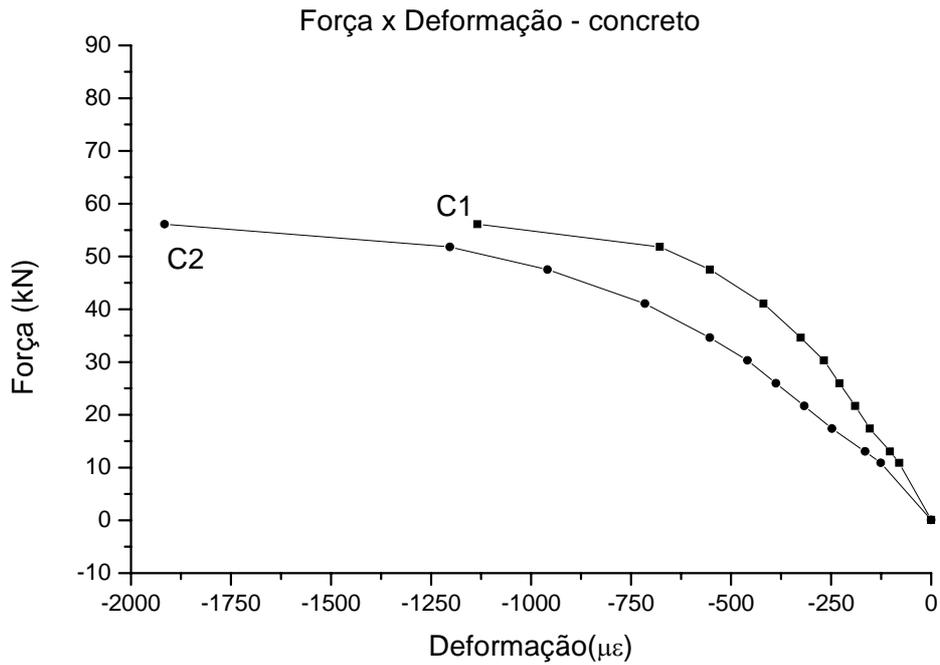


Figura A.56 – Deformação no concreto para o painel P-1L-PN-45b

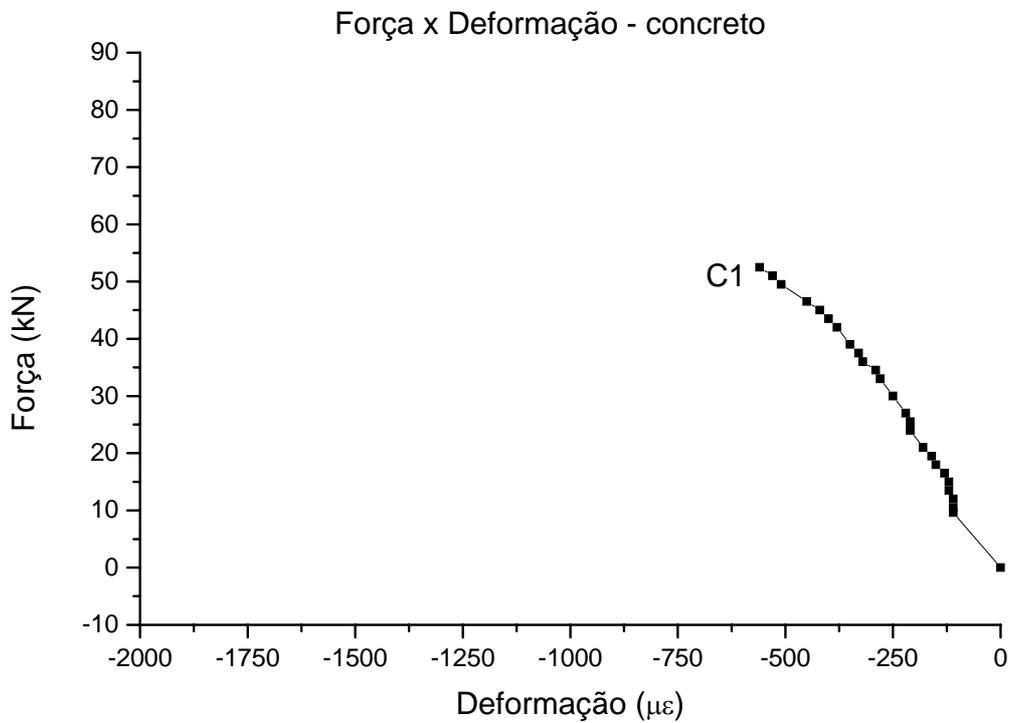


Figura A.57 – Deformação no concreto para o painel P-SL-100b

A.2 Relação entre força e flecha

A seguir são apresentados os gráficos relacionando força e flecha máxima para os painéis que tiveram que ser repetidos por problemas no ensaio e não constam na análise de resultados.

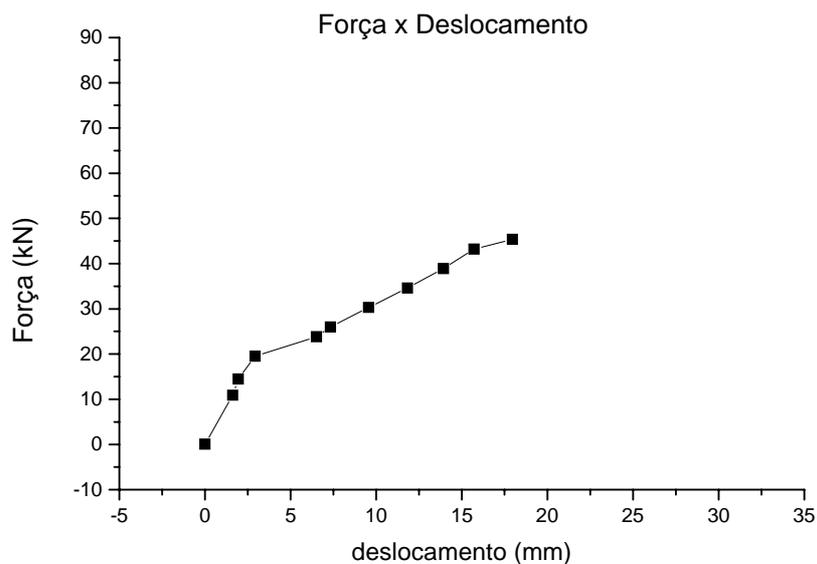


Figura A.58 – Relação entre força e deslocamento para o modelo P-2L-PP-45b.

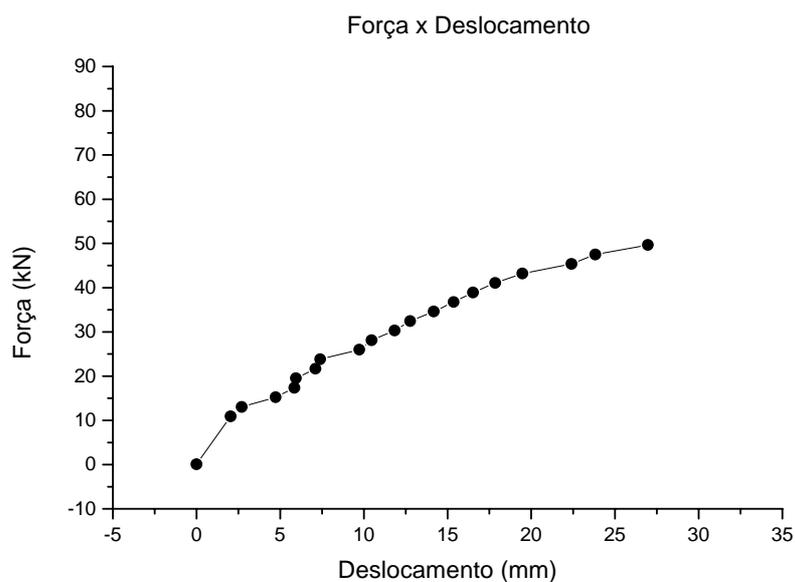


Figura A.59 – Relação entre força e deslocamento para o modelo P-2L-PN-100b.

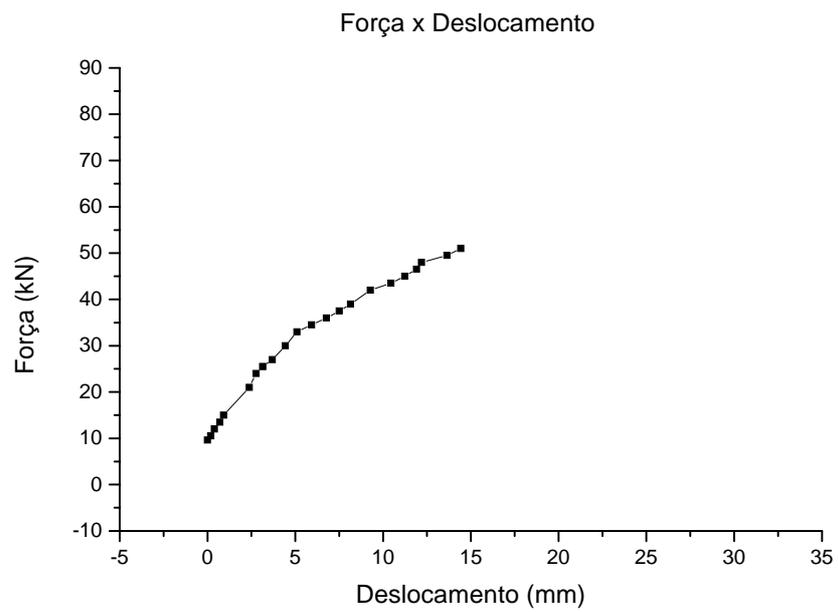


Figura A.60 – Relação entre força e deslocamento para o modelo P-SL-100b.

ANEXO B: Modelagem numérica

Além dos ensaios experimentais uma análise numérica foi realizada através do software ANSYS permitindo uma modelagem do comportamento mecânico, com o objetivo principal de explicar a contribuição do conector tipo treliça na resistência à flexão do painel.

B.1 Descrição dos elementos finitos empregados

Utilizou-se para modelar as placas de concreto e o núcleo o elemento SOLID 65. Este elemento tridimensional possui oito nós com três graus de liberdade cada um, translações em x, y e z, podendo ser usado para modelar tanto concreto simples como concreto armado. Para as treliças utilizou-se o elemento SPAR 8 tipo LINK, não sendo utilizados elementos de contato na interface entre a placa e o núcleo, sendo sua conexão realizada apenas pela treliça (Figura B.1).

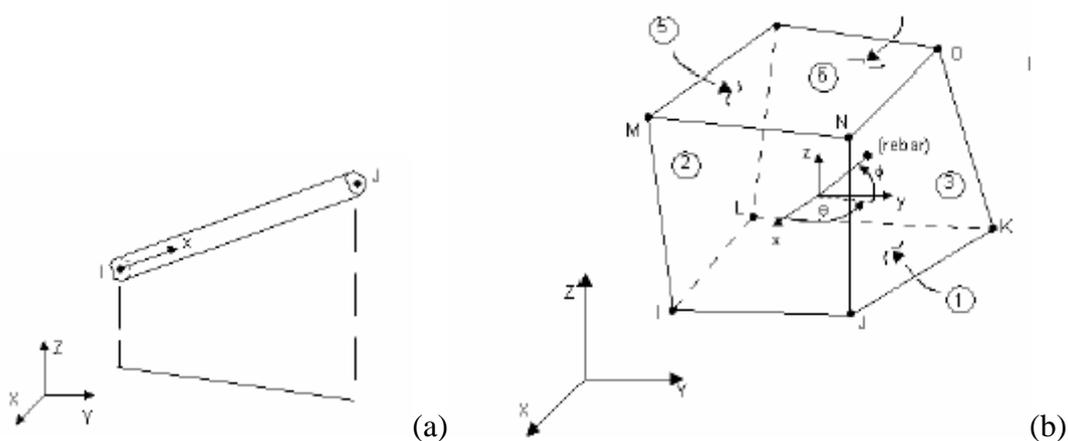


Figura B.1 - Esquemas dos elementos usados para a modelagem. (a) Tipo LINK. (b) SOLID65.

B.2 Descrição da malha utilizada

A Figura B.2 mostra a malha utilizada para modelar o painel com uma linha de treliça e 35 % de Vermiculita Expandida. A região de cisalhamento constante foi enrijecida para que fosse possível representar a rigidez das placas ao cisalhamento devido o painel ser espesso. Quando a relação a/d está entre 2.5 e 6 há interferência do cisalhamento ao longo da altura da placa no comportamento do painel. Portanto nas extremidades do painel entre a força aplicada e o apoio foram adicionados modelos elásticos lineares.

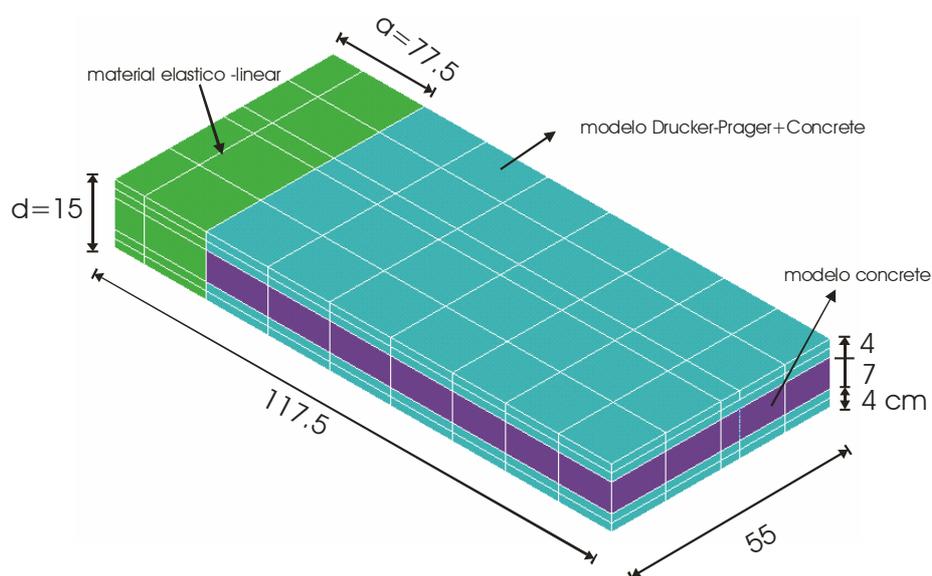


Figura B.2 - Malha utilizada na modelagem dos painéis P-2L-PN-45, P-1L-PN-45 e P-SL-45.

O modelo de material utilizado nas placas de concreto é baseado na teoria de Drucker-Prager que considera a coesão e o ângulo de atrito, representa melhor o concreto comprimido. Já o material utilizado no núcleo baseou-se no modelo concrete do ANSYS que é baseado na superfície de ruptura definida por Willam Warnke utilizado quando o concreto está mais sujeito aos esforços de tração. O material utilizado para representar o aço foi um modelo bilinear isotrópico e inelástico, por ser bilinear é possível determinar o limite elástico e plástico do material.

B.3 Curva força-deslocamento vertical

As curvas força-deslocamento experimental e numérica convergiram. Isto porque, a modelagem foi realizada com controle de deslocamento sendo alteradas as propriedades dos elementos para que o modelo convergisse com a curva experimental (Tabela B.1).

Tabela B.1 – Descrição das propriedades dos elementos.

Descrição do Modelo		E_c (Pa)	f_{ctm} (Pa)	ν	c	ϕ
P-2L-PN-45	Placas de concreto	$1,1 \cdot 10^8$	2781	0,15	8650	37
	Núcleo	$1,0 \cdot 10^7$	1287	0,15	-	-
P-1L-PN-45	Placas de concreto	$1,1 \cdot 10^8$	2781	0,15	8650	37
	Núcleo	$1,0 \cdot 10^7$	1287	0,15	-	-
P-SL-45	Placas de concreto	$2,4 \cdot 10^7$	3090	0,15	8613	37
	Núcleo	$7,0 \cdot 10^6$	1430	0,15	-	-

c = coesão;
 ϕ = coeficiente de atrito;
 $f_{cm} = 4.c.$

Nota: Apenas as placas de concreto foram modeladas utilizando-se o modelo de Drucker-Prager e, portanto, apresentam valores de coesão e coeficiente de atrito. .

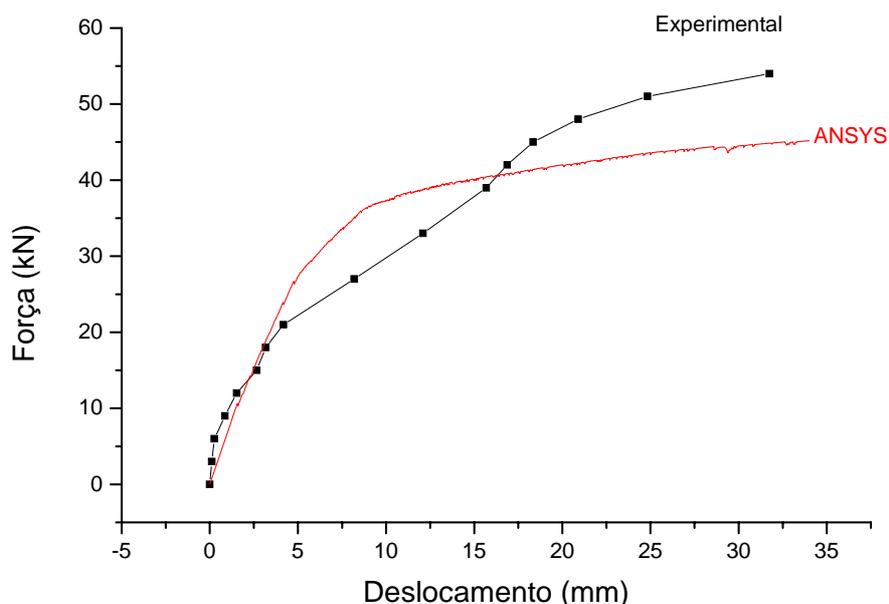


Figura B.3 – Relação entre força e deslocamento para o modelo P-1L-PN-45.

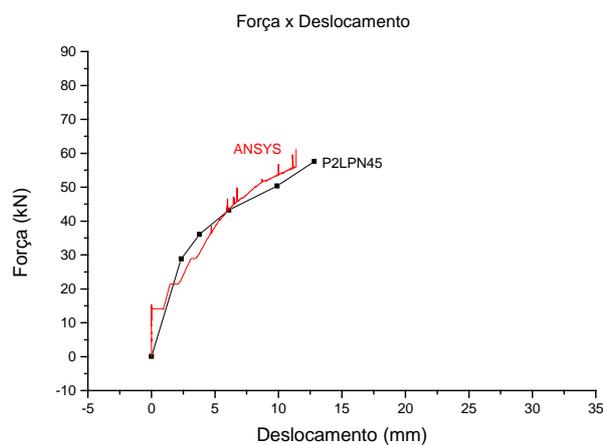


Figura B.4 - Relação entre força e deslocamento para o modelo P-2L-PN-45.

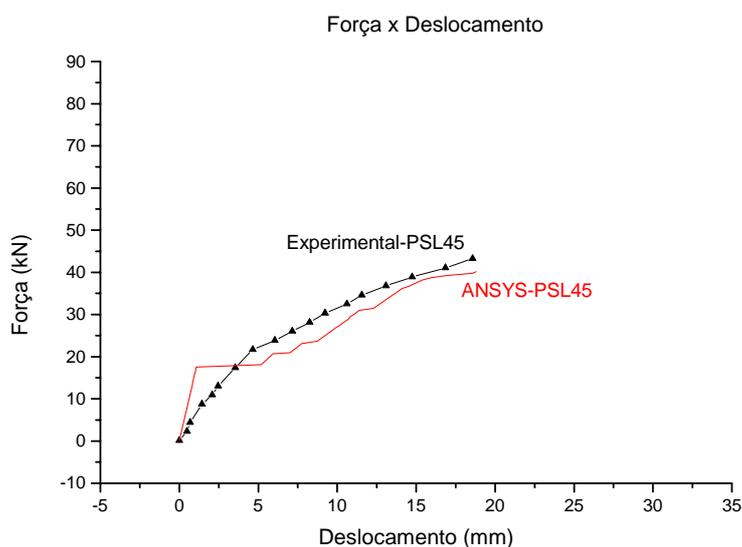


Figura B.5 - Relação entre força e deslocamento para o modelo P-SL-45.

B.4 Curva força-deformação

B.4.1 Concreto

Foram obtidos através da modelagem numérica gráficos relacionando força e deformação no concreto para os modelos P-2L-PN-45, P-1L-PN-45 e P-SL-45 (Figuras B.6 a B.8).

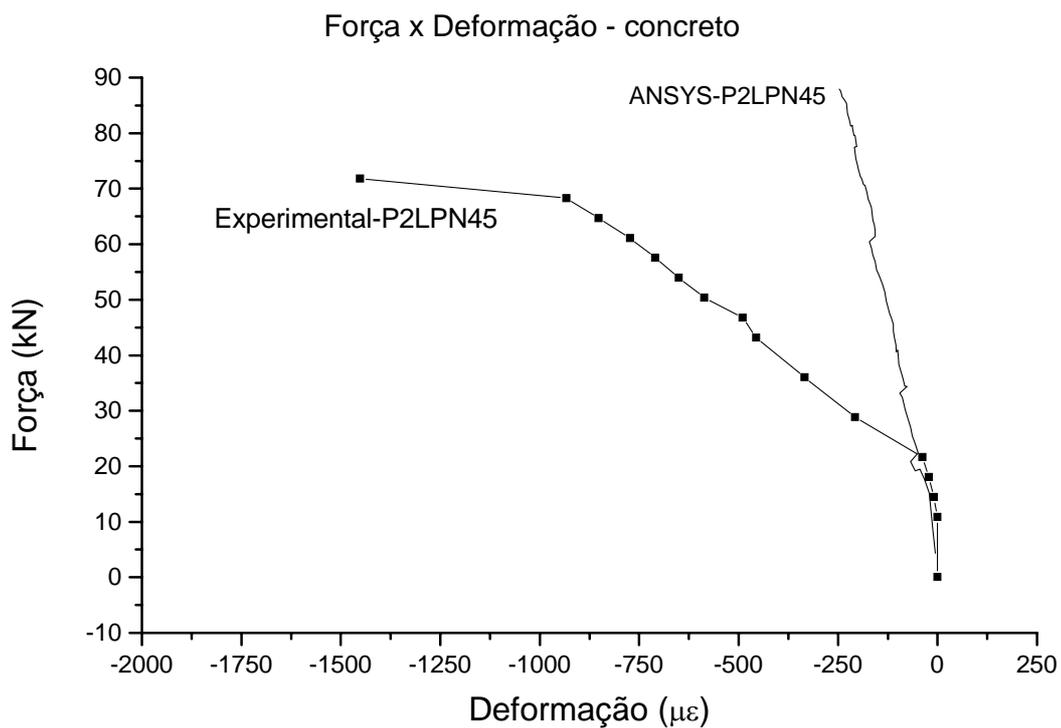


Figura B.6 – Gráfico força x deformação no concreto para o painel P-2L-PN-45.

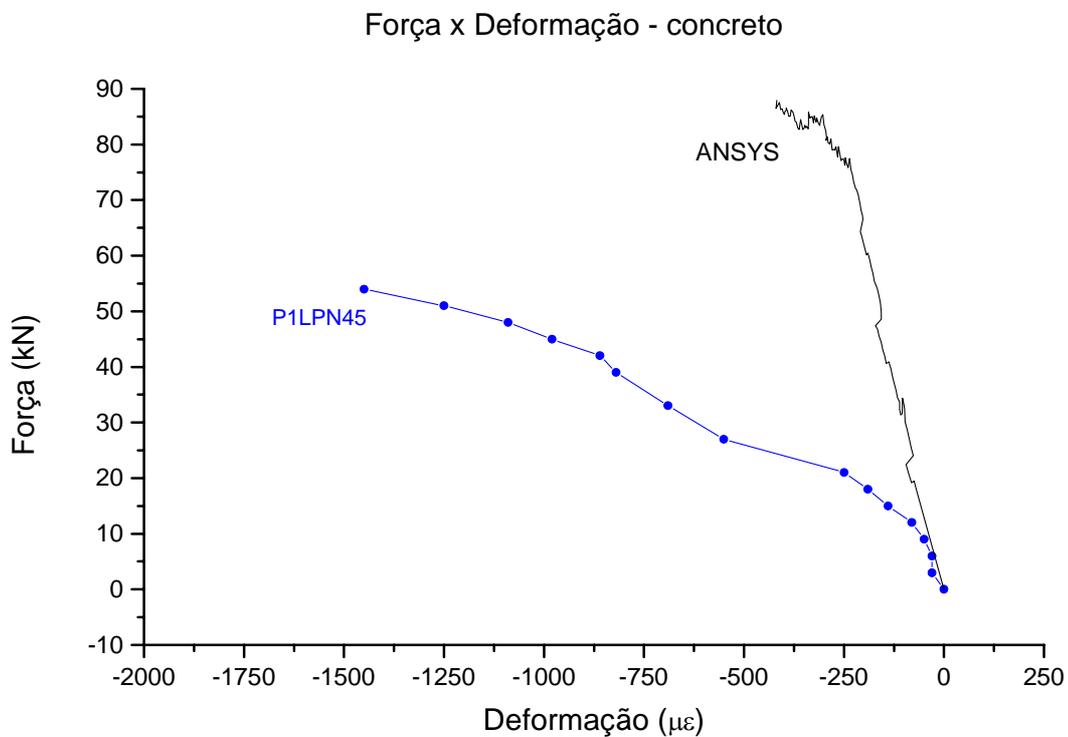


Figura B.7 – Gráfico força x deformação no concreto para o painel P-1L-PN-45.

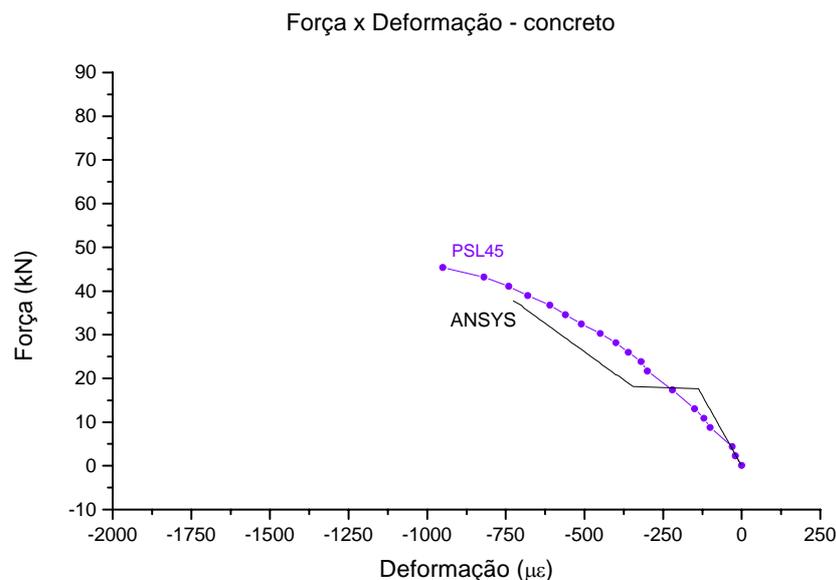


Figura B.8 – Gráfico força x deformação no concreto para o painel P-SL-45.

Observou-se nos gráficos das Figuras B.6, B.7 que a curva relacionando carga-deformação apresentou maior rigidez que a obtida experimentalmente. Já o gráfico da Figura B.8 mostrou convergência com o resultado experimental. Isto porque, primeiro a convergência se deu por controle de deslocamento, segundo porque para os modelos com conector P-2L-PN-35 e P-1L-PN-35 há a contribuição da treliça na rigidez à flexão do painel. Pode-se dizer também, que houve uma parcela de contribuição na rigidez, embora menor que a da treliça, do enrijecimento da região entre o apoio e a aplicação de carga para que fosse considerada a influência da placa na rigidez ao cisalhamento.

B.4.2 Deformações no conector

Foram traçadas curvas relacionado força e deformação para o banzo da treliça, para a diagonal da treliça na região entre o ponto de aplicação de carregamento e o apoio e para diagonal da treliça localizada no meio do vão do painel para os modelos P-2L-PN-35, P-1L-PN-45 e P-SL-45.

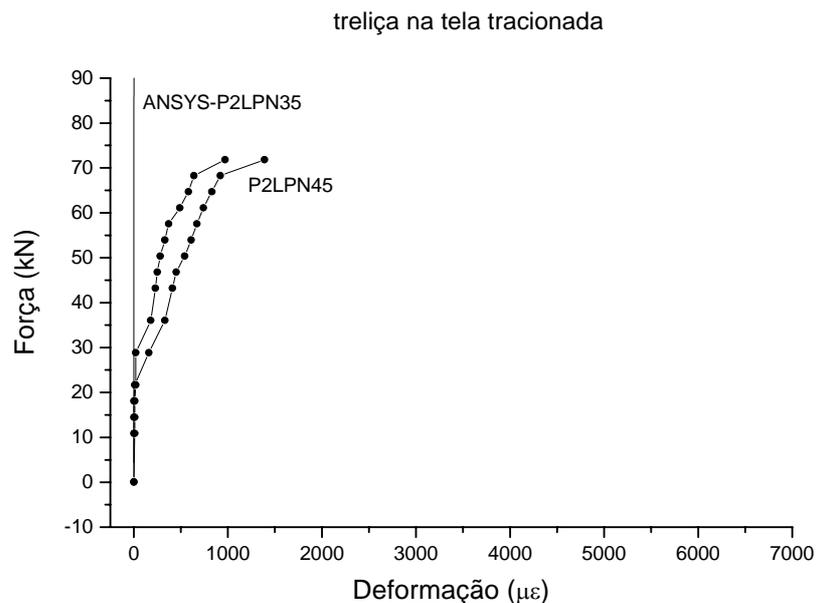


Figura B.9 – Gráfico força x deformação na diagonal central para o painel P-2L-PN-45

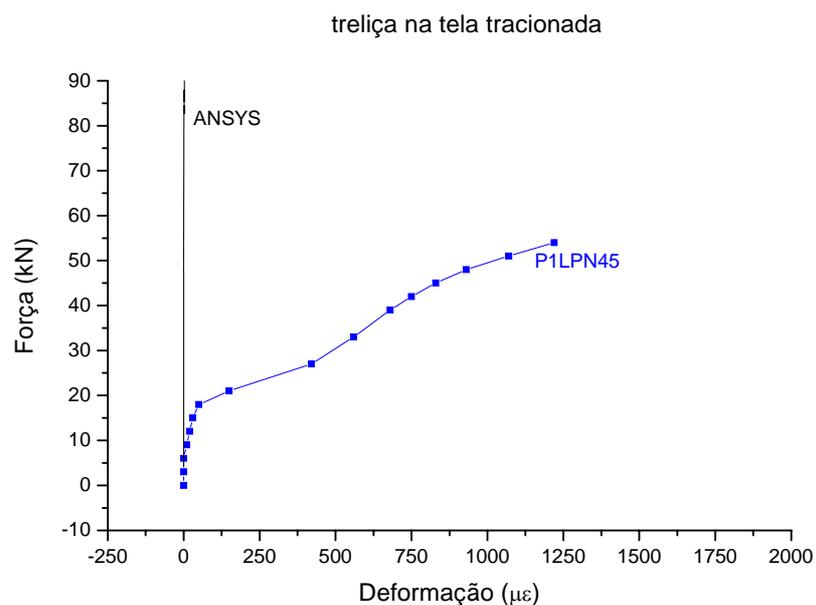


Figura B.10 – Gráfico força x deformação na diagonal central para o painel P-1L-PN-45

Os gráficos das Figuras B.9 e B.10 mostram que o modelo numérico praticamente não apresentou deformação na diagonal localizada no meio do vão do painel. Já o resultado experimental apresentou deformações na ordem de 1000 μm . Isto ocorreu porque o modelo numérico apresentou maior rigidez que o painel ensaiado.

Os gráficos das Figuras B.11 e B.12 mostram a relação entre carga e deformação na diagonal localizada na região de esforço cortante constante e carga e deformação do banzo tracionado da treliça, respectivamente. Verificou-se também, que o modelo numérico apresentou maior rigidez que o experimental.

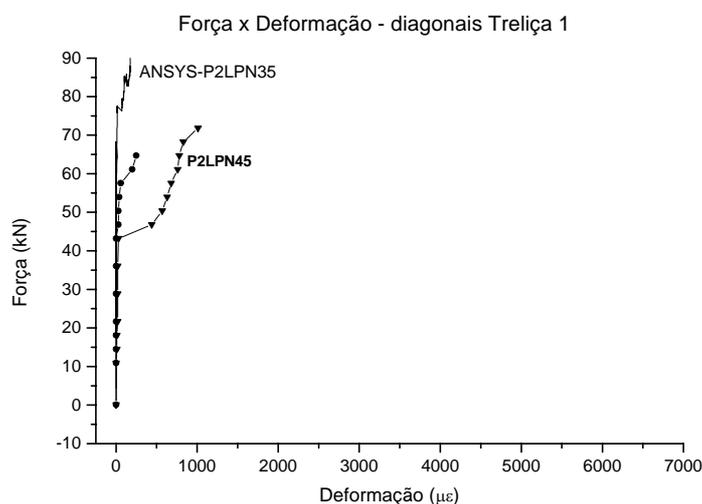


Figura B.11 – Gráfico força x deformação na diagonal da extremidade para o painel P-2L-PN-45.

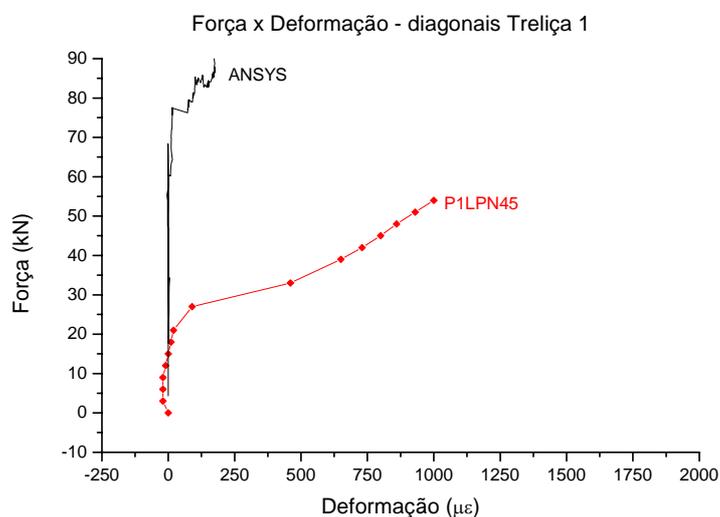


Figura B.12 – Gráfico força x deformação na diagonal da extremidade para o painel P-1L-PN-45.

As deformações na tela tracionada também foram obtidas numericamente e confrontadas com as deformações obtidas no ensaio.

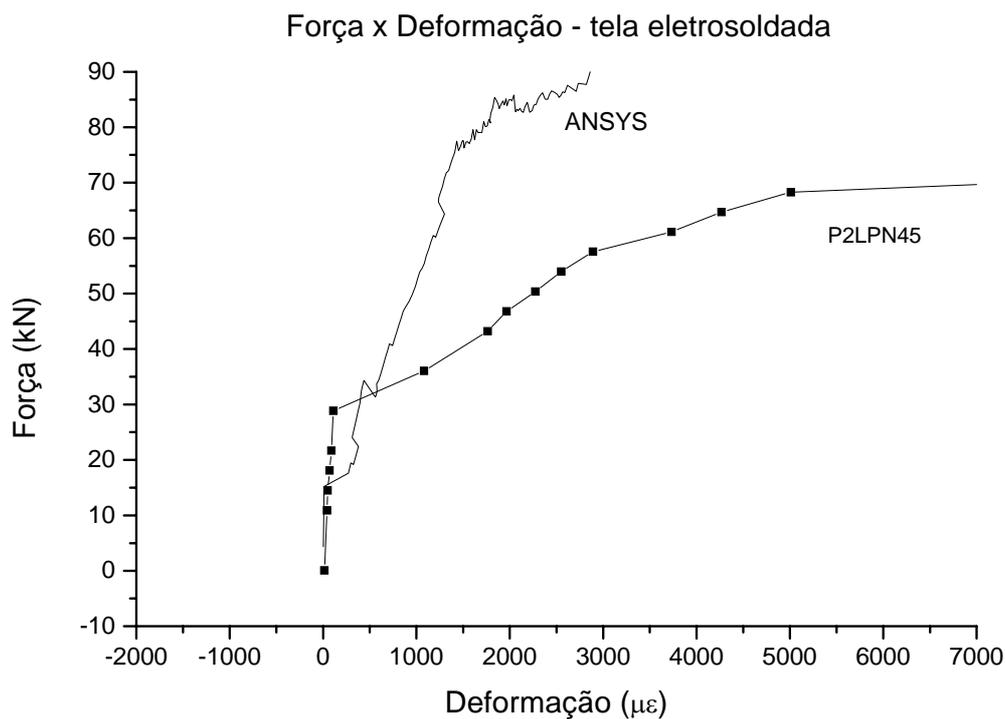


Figura B.13 – Gráfico força x deformação no banzo tracionado para o painel P-2L-PN-45

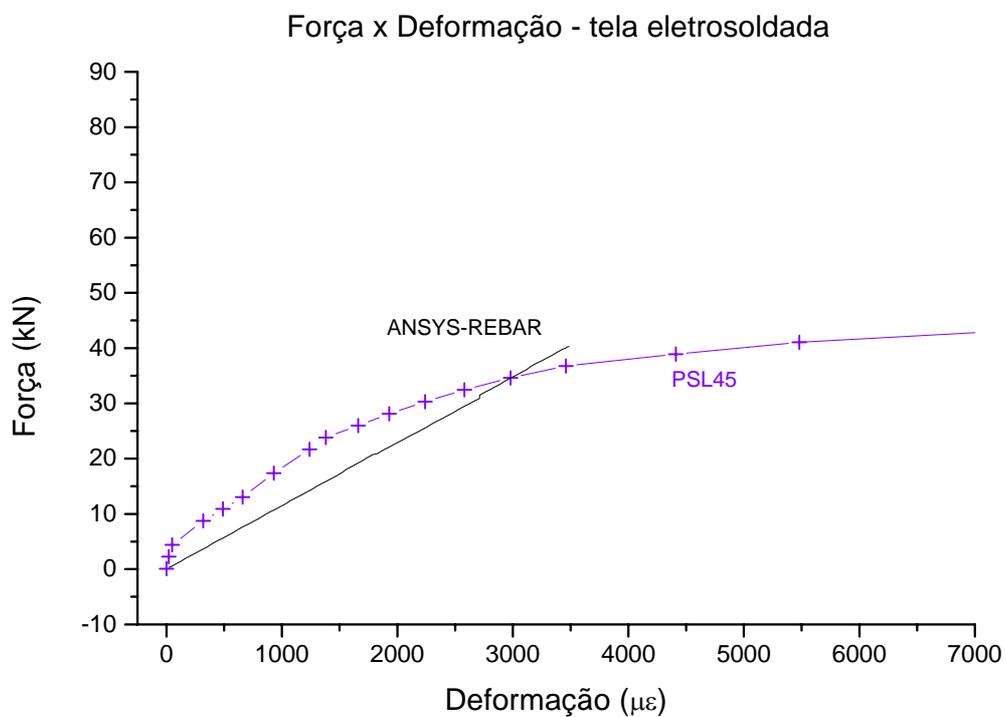


Figura B.14 – Gráfico força x deformação na tela tracionada para o painel P-SL-45.

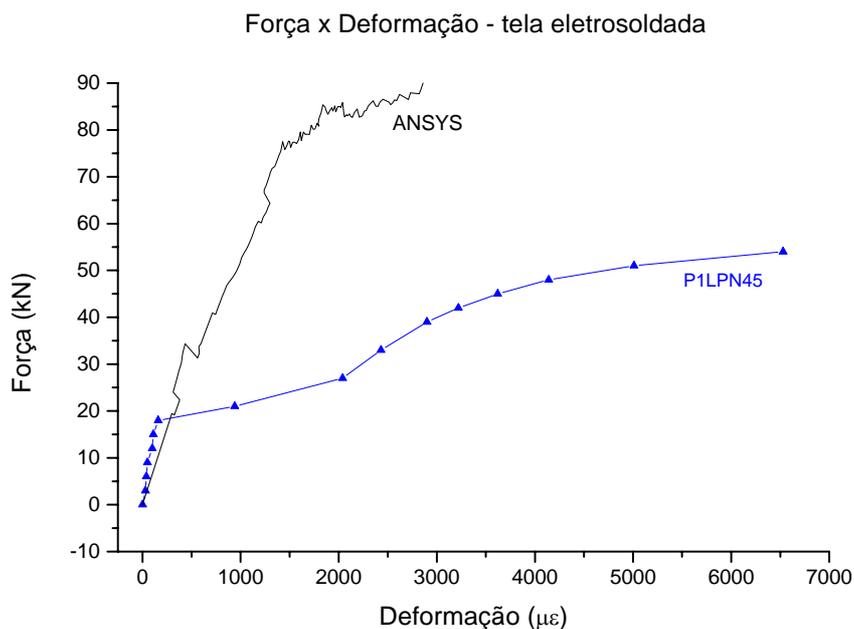


Figura B.15 – Gráfico força x deformação na tela tracionada para o painel P-1L-PN-45

B.5 Considerações Finais

Observou-se que a relação entre carga e deformação obtida pela modelagem apresentou-se mais rígida que os resultados experimentais, exceto para o modelo P-SL-45. Os resultados obtidos por Bush e Wu (1998) apresentaram convergência entre os valores numéricos e experimentais. Os autores realizaram uma modelagem semelhante à utilizada neste trabalho, entretanto o painel era mais longo e esbelto não havendo problemas com o efeito de placas espessas na rigidez ao cisalhamento.

Salmon e Einea (1995) também conseguiram convergência entre valores analíticos e numéricos, mas, apesar do painel ser considerado curto não foi considerado a contribuição da rigidez do núcleo.

Einea et al (1994) também modelaram painéis sanduíche, mas não consideram a aderência entre o núcleo e as placas de concreto. Os autores conseguiram convergência entre os resultados experimentais e os numéricos porque o núcleo tinha pequena rigidez (poliestireno expandido).

Na modelagem realizada para este trabalho foi considerada aderência perfeita entre o núcleo e as placas. Contudo, esta consideração acarretou em erros

maiores, havendo a necessidade do uso de elementos de contato para melhor representação da superfície de contato núcleo-concreto.

Anexo C: Resistência Térmica

C.1 Propriedades Térmicas

A condutividade térmica é a principal propriedade térmica de um material específico que precisamos conhecer para calcular as demais características do painel. É definida como o “fluxo de calor que passa por condução, na unidade de tempo, através de uma espessura unitária de área, estabelecendo-se uma diferença unitária de temperatura na direção perpendicular à superfície isotérmica” (BALIK & BARNEY, 1984; FONSÊCA, 1994). A Tabela C.1 mostra o coeficiente de condutividade térmica de alguns materiais isolantes e convencionais utilizados na construção civil.

Tabela C.1 – Coeficiente de condutividade térmica.

Material	Densidade (kg/m³)	Condutividade Térmica (W /m² ° C)
Isolantes		
Poliestireno expandido moldado	11-30	0,04
Poliestireno expandido extrudido	30-28	0,03
Poliuretano isocianureto	35	0,03
Lã de vidro	24-96	0,04-0,03
Materiais de Construção		
Argamassa	1600	0,65
Concreto armado	2400	1,75
Concreto comum	2000-2400	1,28-1,74
Concreto com vermiculita	600-1400	0,17-0,50
Aço	7780	52
Cerâmica	Variável	0,46
Telha cerâmica	Variável	0,93
Tijolo de 8 furos	1700	0,91
Tijolo comum	1600	0,72

C.2 Resistência Térmica (R)

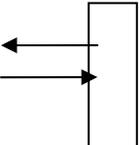
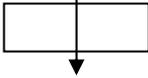
Por analogia ao que acontece em eletricidade, podemos introduzir o conceito de resistência térmica para avaliar a capacidade de um dado material em se opor à passagem do fluxo de energia. Para se determinar a resistência térmica de um material homogêneo, divide-se a espessura (e) submetida ao fluxo térmico pela condutividade térmica (k) do material (FONSÊCA, 1994).

Quando se trata de painéis sanduíche, constituído de várias camadas de materiais diferentes, a resistência térmica é calculada como se fosse uma associação em série de resistências térmicas individuais das camadas, conforme mostrado na equação (1).

$$R = \frac{1}{h_e} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + \frac{1}{h_i} \quad (1)$$

As incógnitas $1/h_e$ e $1/h_i$ correspondem a resistência térmica superficial da superfície externa e interna, respectivamente. A Tabela C.2 apresenta os valores utilizados para quantificar a resistência térmica da superfície externa e interna.

Tabela C.2 – Valores para resistências térmicas superficiais ($m^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$)

Posição da superfície e direção do fluxo de calor	Superfície Interna $1/h_i$	Superfície Externa $1/h_e$	
		Parede interna	Parede externa
 Parede vertical fluxo de calor horizontal	0,12	0,12	0,05
 Parede horizontal fluxo ascendente	0,10	0,09	0,05
 Parede horizontal fluxo descendente	0,17	0,17	0,05

Quando uma das camadas do painel não é heterogênea em espessura, mas em superfície, a resistência térmica é calculada associando-se em paralelo cada resistência térmica individual dos materiais da superfície, ponderada pela respectiva porcentagem de área ocupada pelo material sobre a área da superfície. A resistência térmica da camada heterogênea em superfície é mostrada pela equação (2).

$$R_{total} = \frac{1}{\frac{A_1}{R_1} + \frac{A_2}{R_2} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} \quad (2)$$

Esse método para cálculo da resistência térmica total é aproximado e pode apresentar erros consideráveis, principalmente quando ocorrem pontes térmicas de pequena área, mas elevada condutividade térmica em relação aos demais materiais. O ideal seria determinar experimentalmente o valor da resistência térmica total para painéis sanduíche.

Esse procedimento foi utilizado em painéis sanduíche com núcleo em poliestireno extrudido considerando-se diferentes tipos de conectores, conforme mostra a Tabela C.3.

Tabela C.3 Resistência Térmica de Painéis Sanduíche com núcleo em poliestireno extrudido (FONSÊCA, 1994).

Tipo do painel	U (W/m² °C)
Painel sem conectores e nervuras	0,528
Painel com conectores de aço (área de ocupação = 0,08%)	0,823
Painel com nervuras (área de ocupação = 7,2%)	1,810
Painel com nervuras (área de ocupação = 10,7%)	2,169
Painel com nervuras (7,2%) + conectores	2,543
Painel com blocos	0,868

Determinou-se a resistência térmica para o painel sanduíche com núcleo em Vermiculita Expandida (100%) e conector tipo treliça, estudo neste trabalho. Como valor de condutividade térmica para as placas de concreto armado foi adotado 1,75 W/m² °C, para o aço 52 W/m² °C e para a argamassa de preenchimento do núcleo com 100% de Vermiculita Expandida 0,878W/ m² °C. Foi considerada no cálculo parede vertical com fluxo de calor horizontal, portanto, os valores para 1/h_i (superfície interna) 1/h_e (superfície externa) foram respectivamente 0,12 e 0,05, considerando o painel posicionado externamente no perímetros da construção, conforme Tabela C.2.

Primeiramente foi considerado o painel sem conector e depois com duas linhas de conector. O primeiro modelo apresentou uma condutividade de $3,38 \text{ W/ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ cerca de quatro vezes superior ao obtido pelo painel sem conector e núcleo em poliestireno extrudido ($0,528 \text{ W/ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$). O segundo modelo apresentou uma condutividade térmica de $3,59 \text{ W/ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, que comparado ao painel com núcleo em poliestireno extrudido com conector de aço e nervura ($2,543 \text{ W/ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$) foi 40 % maior. Para o último modelo ao se determinar a resistência do isolante foi considerada camada heterogênea em superfície. Este último modelo foi comparado com o painel com nervuras e conector metálico, porque ambos os modelos, em termos de comportamento mecânico, são classificados em composto. A Tabela C.4 mostra um resumo da resistência térmica dos elementos que constituíam esses dois modelos de painéis sanduíche com Vermiculita Expandida.

Tabela C.4 Resistência Térmica para elementos do painel sanduíche com núcleo em Vermiculita Expandida.

Elemento do painel	Resistência Térmica (1/Condução Térm.)
<i>Painel sem conector</i>	
Superfície interna	0,1200 $\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$
Placa Interna	0,0230 $\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$
Isolante	0,0800 $\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$
Placa Externa	0,0230 $\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$
Superfície Externa	0,0500 $\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$
<i>Total resistência térmica</i>	0,296 $\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$
<i>Condutividade térmica</i>	3,38 $\text{W/ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$
<i>Painel com conector tipo treliça inserido na placa 25mm.</i>	
Superfície interna	0,1200 $\text{W/ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$
Placa Interna	0,0143 $\text{W/ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$
Isolante*	0,0800 $\text{W/ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$
Placa Externa	0,0143 $\text{W/ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$
Superfície Externa	0,0500 $\text{W/ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$
<i>Total resistência térmica</i>	0,279 $\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$
<i>Condutividade térmica</i>	3,59 $\text{W/ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

Nota: Foi considerado como camada heterogênea em superfície, sendo a área de ocupação do aço igual a 0,098% da área total da superfície do painel.

Como relatado anteriormente, esse cálculo não leva em consideração a indução de pontes térmicas provocada por conectores metálicos, nervuras e blocos de concreto. Provavelmente, obtendo-se a resistência térmica experimentalmente a resistência térmica do painel estudado nesta dissertação será melhorada em relação ao painel com núcleo em poliestireno extrudido. Isto porque, este último quando constituído também de conectores metálicos, tem os mesmo ancorados de placa a placa enquanto, o painel estudado tem conexão de placa a núcleo, o que possivelmente evitará a formação de pontes térmicas.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)