

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

ANA PAULA ANTONELLO SIEG

**Estudo de um sistema de laje com fôrma de aço
incorporada**

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

São Carlos

2015

ANA PAULA ANTONELLO SIEG

Estudo de um sistema de laje com fôrma de aço incorporada

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Maximiliano Malite

São Carlos

2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

S571e Sieg, Ana Paula Antonello
Estudo de um sistema de laje com fôrma de aço
incorporada / Ana Paula Antonello Sieg; orientador
Maximiliano Malite. São Carlos, 2015.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Estruturas -- Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

1. estruturas mistas. 2. lajes mistas. 3. lajes com
fôrma de aço incorporada. 4. cisalhamento longitudinal.
5. método m-k. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Bacharel **ANA PAULA ANTONELLO SIEG.**

Título da dissertação: "Estudo de um sistema de laje com fôrma de aço incorporada."

Data da defesa: 01/07/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Maximiliano Malite (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Profa. Associada **Ana Lucia Homce de Cresce El Debs**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Profa. Dra. **Silvana De Nardin**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
(Engenharia de Estruturas):

Prof. Titular **Humberto Breves Coda**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pelo dom da vida, por Sua proteção divina e compaixão em todos o momentos que mais precisei.

A minha família, porto mais que seguro, exemplo e inspiração. Meus pais, Pedro e Diva, pelo carinho, compreensão e confiança durante toda a minha vida. Meu irmão Paulo, cunhada Scheila e meu sobrinho/afilhado Miguel pelo incentivo de nunca desistir de meus sonhos. Obrigada.

A Jackson, meu companheiro, amigo, namorado e noivo pela compreensão, atenção, paciência, amor e apoio incondicional durante toda a nossa caminhada até aqui.

A minha segunda família, que concedeu meu maior presente. Meus sogros, Luiz e Inêz pelo carinho e compreensão dedicados durante cada etapa percorrida. Ao cunhado Júnior pela inspiração e determinação.

Ao meu professor e orientador, Maximiliano Malite, pela disponibilidade, solicitude e dedicação durante cada fase deste trabalho. Agradeço pela atenção, paciência e confiança depositada em mim.

Aos amigos que fiz durante o período do mestrado: Karen, Camila, Lara, Margot, Laurenn, Gabriela, Thaís, Miguel, Giovanni, Sonia, Henrique, Sérgio C., Beatriz, Fernando, Luiz Gustavo, Júlio, Jeferson, Sergio A., Victor, Lucas, Thiago e Matheus, pelo apoio, amizade e momentos de descontração durante nossa convivência.

Aos amigos de longe, que mesmo separados pela distância e muitas vezes impedidos de reencontros pelas atribulações da vida foram e continuam sendo minha recorrência de apoio e minha grande admiração.

A todos os professores que fizeram parte de toda a minha formação, levo de cada um o exemplo, seja de como ser ou de como não ser um bom professor.

Aos técnicos de laboratório Vareda, Jorge, Mauri, Amaury, Fabiano, Douglas, Mário, Romeu e Fernando pelo apoio durante as análises experimentais.

A empresa Modular, pelos protótipos utilizados na pesquisa e pela confiança na execução dos ensaios.

A CAPES, pelo suporte financeiro.

*“O mestre provoca conhecimento ao
fazer operar a razão natural do
discípulo”*

Tomás de Aquino

RESUMO

SIEG, A. P. A. **Estudo de um sistema de laje com fôrma de aço incorporada.** 2015. 143p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2015.

Este trabalho trata do estudo de um novo perfil metálico a ser empregado como fôrma em lajes mistas (laje com fôrma de aço incorporada). A fôrma é obtida pelo dobramento a frio de chapa zincada e serve para suportar o concreto fresco e sobrecargas durante a fase de construção e para atuar como armadura positiva da laje após a cura do concreto. A pesquisa foi realizada em duas etapas: (i) a análise teórica do perfil de aço isolado de modo a identificar modos de instabilidade e respectivos esforços críticos, referentes à fase de construção, isto é, concreto não colaborante, e (ii) a análise teórica e experimental da laje mista, através do ensaio de protótipos, tendo como propósito determinar a formulação para o dimensionamento baseada no método semiempírico denominado “método m-k”. Tal método permite determinar equações lineares, sendo “m” e “k” os coeficientes angular e linear da reta. A análise teórica do perfil de aço foi realizada com o auxílio do programa CUFSM. Na análise experimental foram utilizados 14 protótipos agrupados conforme a espessura da fôrma de aço (0,08 mm – 6 protótipos e 1,25 mm – 8 protótipos) e variando a altura da laje em 110 mm e 170 mm. Outros dois protótipos também foram ensaiados, ambos com armadura adicional e fôrma de espessura 0,08 mm, onde um continha mossas em sua fôrma e outro não. A determinação das constantes m – k resultou na equação de dimensionamento que fundamenta-se no cisalhamento longitudinal, que é o estado-limite último dominante no projeto de lajes mistas.

Palavras-chave: estruturas mistas. lajes mistas. Lajes com fôrma de aço incorporada. cisalhamento longitudinal. método “m-k”.

ABSTRACT

SIEG, A. P. A. **Study of a slab system with incorporated sheeting**. 2015. 143p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2015.

This work studies a new steel profile to use as deck in composite slabs (slab with embedded steel deck profile). The deck is obtained by cold-formed and serves to support the fresh concrete and overloads during the construction stage and to act as positive reinforcement of the slab after the wet concrete. Research comprises two steps: (i) theoretical analysis of isolated steel deck profile to identify buckling modes and their critical stress, associated to the construction stage, i.e., not cooperating concrete, and (ii) theoretical and experimental analysis of the composite slab, through of test prototypes, with the purpose to determine the formulation to design based in semiempirical method called “m-k method”. The method allows determining linear equations, where “m” and “k” are angular and linear coefficients of the function. The theoretical analysis of the steel profile was performed with the aid of CUFSM program. In the experimental prototypes analysis used 14 grouped according to the thickness of the sheeting (0.08 mm - 1.25 mm prototypes and 6 - 8 prototypes) and varying slab height at 110 mm and 170 mm. Two other prototypes were also tested, both with additional armor and thick mold 0.08 mm, where one had dents in your pan and the other not. The determination of the constants m - k resulted in the scaling equation is based on longitudinal shear, which is the state limit last dominant in the design of composite slabs.

Palavras-chave: Composite structures. Composite slabs. Slab with embedded steel deck. Longitudinal shear. “m-k method”.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – WTorre Nações Unidas (DIAS,2014).	24
Figura 1.2 – Edifício The One (DIAS, 2014).....	24
Figura 1.3 – Edifício Multifuncional Allianz Arena (DIAS, 2014).....	25
Figura 1.4 – Wtorre Morumbi (DIAS, 2014).....	26
Figura 2.1 - Perfis típicos (adaptada de BS 5950: Parte 4:1994).	28
Figura 2.2 – Modos de colapso (adaptado de Johnson,1994).	30
Figura 2.3 – Diagrama de tensões para momento fletor positivo: LNP acima da fôrma de aço	31
Figura 2.4 –Esquema de forças na laje mista (adaptado de Queiroz et al., 2001). ...	32
Figura 2.5 – Determinação experimental das constantes m e k (Eurocódigo4)	33
Figura 2.6 - Regressão linear e redução da regressão linear (ANSI/ASCE, 1992). ...	35
Figura 3.1 – Sistema proposto (TAKEY, 2001).	36
Figura 3.2 - Perfil único (VIEIRA, 2003).	37
Figura 3.3 - Três perfis (VIEIRA, 2003).	38
Figura 3.4 - Modelo desenvolvido por Beltrão (2003).....	38
Figura 3.5 – Sistema proposto por Vianna (2005).....	39
Figura 3.6 – Características do perfil Steel Deck MF 75 (GOMES, 2001).....	40
Figura 3.7 – Características do perfil Steel Deck MF 50 (BRENDOLAN, 2007).....	42
Figura 3.8 - Tipos de enchimento (Tuper S.A, 2015).	43
Figura 3.9- Pull out test (adaptada de DANIELS & CRISINEL, 1993).	44
Figura 3.10 - Push off test (adaptada de DANIELS & CRISINEL, 1993).....	45
Figura 3.11 - Fôrma e <i>stud bolt</i> na extremidade (NETO, 2001).	45
Figura 3.12 - Tipos de geometrias considerados pelo programa de Baião Filho (2003).....	46
Figura 3.13 - Seções dos painéis (CARVALHO, 2005).	47
Figura 3.14 - Esquemas dos 3 conectores mecânicos usados por Lakshmikandhan et al. (2013)	49
Figura 4.1 - Perfil MD55	50
Figura 4.2 - Largura plana dos elementos da fôrma (ABNT NBR 8800:2008).	51
Figura 4.3 - Seção transversal representativa da fôrma, modelada no programa CUFSM.....	54

Figura 4.4 – Propriedades da seção fornecida pelo CUFMS, conforme os eixos da Figura 3.2.....	54
Figura 4.5 – Curva de flambagem para perfil de espessura nominal 0,80 mm.....	56
Figura 4.6 – Curva de flambagem para perfil de espessura nominal 1,25 mm.....	57
Figura 5.1 – Seção transversal típica dos protótipos	76
Figura 5.2 – Fôrma de aço Steel Deck Modular MD55.....	77
Figura 5.3 –Vista geral do perfil MD55 com o padrão das mossas em destaque.	78
Figura 5.4 – Posição dos extensômetros elétricos na seção a meio vão	79
Figura 5.5 – Extensômetros na fôrma de aço	80
Figura 5.6 - Extensômetro no concreto.....	80
Figura 5.7 – Esquema geral de ensaio de lajes mistas (Eurocódigo 4)	81
Figura 5.8 – Vista geral do protótipo e aparato de ensaio	82
Figura 6.1 – Deslizamento relativo entre o concreto e o aço na extremidade	90
Figura 6.2 – Aspecto da fissura na região da força aplicada, após o deslizamento .	90
Figura 6.3 – Ondulações nas mesas superiores da fôrma metálica.	91
Figura 6.4 – Curva força x flecha do protótipo MD55-P2 (comportamento frágil)	92
Figura 6.5 – Curva força x flecha do protótipo MD55-P8 (comportamento dúctil)	92
Figura 6.6 – Resultados dos ensaios dos protótipos com fôrma de espessura 0,80 mm.....	93
Figura 6.7 – Resultados dos ensaios dos protótipos com fôrma de espessura 1,25 mm.....	93
Figura 6.8 – Resultados dos ensaios dos protótipos com armadura adicional	94
Figura 6.9 – Protótipos de mesmas dimensões sem e com armadura adicional	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação do consumo de material por m ² (Vianna, 2005).	39
Tabela 3.1 - Tabela resumo das verificações para a fôrma de aço isolada	73
Tabela 4.1 – Descrição dos protótipos	77
Tabela 5.1 - Propriedades mecânicas do aço das fôrmas	84
Tabela 5.2 - Propriedades mecânicas do concreto ¹	85
Tabela 5.3 - Resultados experimentais	86
Tabela 5.4 – Análise estatística e cálculo das constantes empíricas <i>m</i> e <i>k</i> para espessura de 0,80 mm	87
Tabela 5.5 – Análise estatística e cálculo das constantes empíricas <i>m</i> e <i>k</i> para espessura de 1,25 mm	88
Tabela 5.6 – Análise comparativa entre os resultados experimentais e teóricos da força cortante calculados com base nas expressões obtidas via <i>método m-k</i>	96
Tabela 5.7 – Momento fletor solicitante <i>versus</i> momento fletor resistente	96
Tabela 6.1 - Máximos vãos para as fôrmas isoladas	98

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Vantagens	22
1.2	Desvantagens	23
1.3	Exemplos da utilização de lajes mistas em obras no Brasil	23
2	LAJES MISTAS	27
2.1	Dimensionamento de lajes mistas	28
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	36
3.1	Novos sistemas de lajes mistas desenvolvidos	36
3.1.1	Novos perfis para o mercado	40
3.1.2	Novos mecanismos, ensaios e softwares	43
4	ANÁLISE DA FÔRMA DE AÇO MD55	50
4.1	Relações geométricas	50
4.2	Análise de estabilidade elástica	54
4.3	Momentos fletores resistentes	58
4.3.1	Momento fletor resistente de uma onda da fôrma com espessura nominal 0,80 mm	59
4.3.2	Momento fletor resistente de uma onda da fôrma com espessura nominal 1,25 mm	61
4.4	Força cortante resistente	63
4.4.1	Força cortante resistente da fôrma com espessura nominal 0,8 mm	64
4.4.2	Esforço cortante resistente da fôrma com espessura nominal 1,25 mm	65
4.5	Determinação do vão máximo	66
4.5.1	Combinação última de construção	66
4.5.2	Combinação de serviço (nesse caso considera-se apenas a ação permanente)	67
4.5.3	Verificação do máximo vão para atender ELU e ELS	68
5	PROGRAMA EXPERIMENTAL	75
5.1	Características das lajes ensaiadas	75
5.2	Equipamentos utilizados e instrumentação	78
5.3	Procedimento de ensaio	81
6	RESULTADOS DA ANÁLISE EXPERIMENTAL	84
6.1	Caracterização dos materiais	84

6.2	Ensaio dos protótipos	86
7	CONCLUSÕES.....	98
7.1	Conclusões da análise teórica da fôrma isolada.....	98
7.2	Conclusões da análise experimental	99
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102
	ANEXO A – Fotografias	107
	ANEXO B – Resultados dos ensaios	115

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas estruturais – sejam em aço ou em concreto – são utilizados na construção civil há muito tempo, há aproximadamente 150 e 100 anos respectivamente, e individualmente têm uma ampla e consolidada aplicação.

Já os sistemas compostos mais industrializados e aprimorados começaram a ser executados nos Estados Unidos em torno da década de 30, combinando os sistemas estruturais de aço e concreto. Na década de 40 surgiram as lajes comercialmente chamadas de *steel deck*, onde efetivamente a chapa de aço e o concreto possuíam uma ação composta.

Foi a partir da década de 60 que o desenvolvimento de estruturas mistas e híbridas evoluíram de forma considerável Brasil. Tais estruturas propiciaram um horizonte ilimitado de soluções, ampliando espaços para a liberdade de criação.

As estruturas mistas foram normatizadas no Brasil pela primeira vez no ano de 1986 pela ABNT NBR 8800, norma referente ao dimensionamento de estruturas de aço e que incluía também o dimensionamento de vigas mistas. No entanto somente na década de 90 o *steel deck* foi introduzido no mercado brasileiro.

A utilização de lajes com fôrma de aço incorporada está consolidada em vários países, por ser um sistema de piso econômico e eficiente em edifícios de andares múltiplos estruturados em aço e vêm ganhando popularidade crescente no Brasil.

Há uma gama de fôrmas no mercado, principalmente estrangeiro, que diferem entre si quanto as seções, padrão de moedas e fabricantes. Cada seção de fôrma desenvolvida visa otimizar o desempenho tanto na fase mista quanto em sua fase de construção.

Em alguns casos, as fôrmas de aço são somente utilizadas como tais, ou seja, não se considera o seu comportamento misto. Com isso a laje deve ser convencionalmente armada para resistir aos carregamentos em que está submetida. Entretanto na maioria dos casos o comportamento misto é considerado, o que agrega ao sistema maior capacidade e economia.

A consideração do comportamento misto depende do estado-limite dominante que, no caso das lajes mistas, é o “cisalhamento longitudinal”, e o mesmo está

associado ao comportamento estrutural da interface fôrma de aço-concreto e, portanto, dependente do padrão de mossa da fôrma, tornando-se necessário proceder a uma análise experimental com protótipos para a determinação de fórmulas para o dimensionamento.

O estudo do comportamento dos novos perfis utilizados como fôrma de aço incorporada é fundamental para a determinação da eficiência do sistema misto utilizado como laje. Um novo perfil disponibilizado no mercado, denominado *Steel Deck modular MD 55*, foi analisado nesse trabalho, através do método *m-k*. Esse método apresenta parâmetros para a determinação do cisalhamento longitudinal.

Os modos de falha que podem ocorrer no sistema de lajes mistas são: flexão, cisalhamento vertical, cisalhamento longitudinal e punção, porém o modo mais comum é o modo do cisalhamento longitudinal.

O crescente emprego de estruturas mistas, onde duas matérias formam um elemento estrutural e trabalham de forma conjunta e estruturas híbridas, onde elementos estruturais de diversos materiais formam a estrutura, faz aumentar a produção das lajes mistas.

O uso de lajes mistas é de grande aplicabilidade, esse sistema misto pode ser empregado tanto para a composição de estruturas mistas, quanto para estruturas híbridas.

1.1 Vantagens

O sistema de lajes mistas possibilita uma construção mais racional, com maior produtividade e velocidade, tornando-se uma grande opção tecnológica para o desenvolvimento da construção.

Dentre as vantagens do sistema com lajes mistas produzidas por diversas empresas destacam-se as seguintes: (i) dispensa de escoramento; (ii) redução de desperdício de material; (iii) facilidade de instalação e maior rapidez construtiva; (iv) facilidade de passagem de dutos e de fixação de forros; (v) eliminação da armadura de tração na região de momentos positivos; (vi) maior segurança do trabalho, por funcionar como plataforma de serviço e de proteção aos operários que trabalham em andares inferiores; e (vii) praticidade de execução, uma vez que a fôrma fica

incorporada ao sistema, não havendo a etapa de desfôrma. (METFORM, 2013; YU, 2000)

1.2 Desvantagens

As principais desvantagens são: (i) necessidade de utilização de forros suspensos, por razões estéticas; e (ii) demanda por maior quantidade de vigas secundárias, caso não se utilize o sistema escorado e/ou fôrmas de grande altura, devido a limitação dos vãos antes da cura do concreto (QUEIROZ et al., 2001).

1.3 Exemplos da utilização de lajes mistas em obras no Brasil

Existem, atualmente, muitas obras no Brasil já construídas com estruturas mistas e que utilizam lajes de fôrma de aço incorporada, entre elas estão:

- **WTorre Nações Unidas – São Paulo-SP (2008)** (Figura 2.2)

A edificação é constituída de estrutura de aço até o terceiro pavimento e por pilares e vigas mistas nos demais pavimentos. As lajes são lajes mistas. A garantia de estabilidade horizontal da construção dá-se por núcleos laterais de concreto armado que circundam os elevadores, são esses núcleos que, executados sempre em frente das estruturas de aço, possibilitam o travamento das lajes steel deck fazendo com que elas atuem como diafragma (DIAS, 2014).



Figura 1.1 – W Torre Nações Unidas (DIAS,2014).

- **Edifício The One – São Paulo-SP (2011) (Figura 2.3)**

O projeto inicial desenvolvido para a estrutura do edifício era de uma construção convencional. Em razão da necessidade de rapidez de execução o projeto inicial foi adaptado para o desenvolvimento de uma estrutura mista aço-concreto (DIAS, 2014).



Figura 1.2 – Edifício The One (DIAS, 2014).

- **Edifício Multifuncional Allianz Arena – São Paulo-SP (2013) (Figura 2.4)**

A edificação é composta por seis pavimentos. O sistema estrutural é híbrido de aço e concreto, sendo dois núcleos laterais rígidos de concreto, pilares metálicos revestidos com concreto armado, lajes steel deck trabalhando de forma solidária com as vigas mistas e formando assim um diafragma horizontal (DIAS, 2014).



Figura 1.3 – Edifício Multifuncional Allianz Arena (DIAS, 2014).

- **Edifício WTorre Morumbi – São Paulo (2014)** (Figura 2.5)

A construção é predominantemente mista, sendo somente cinco subsolos com estrutura de concreto moldado *in loco*. O edifício é composto por duas torres interligadas por uma passarela que contém escritórios, em cada torre existe um núcleo rígido central. A estrutura é composta por vigamentos metálicos, pilares e lajes mistas de aço e concreto.(DIAS, 2014).

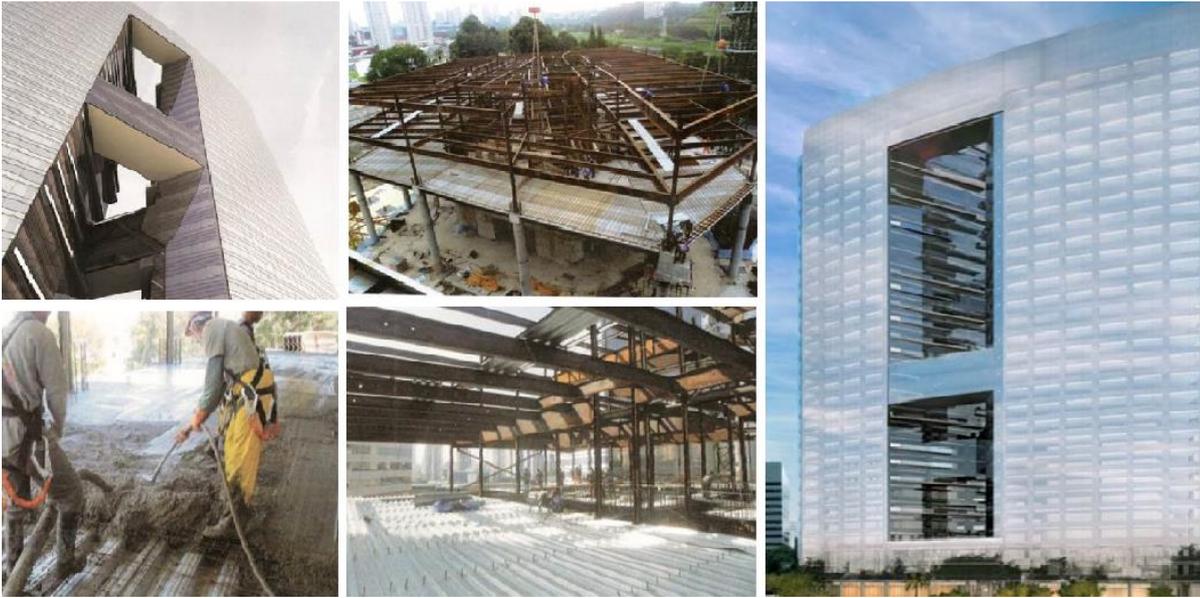


Figura 1.4 – Wtorre Morumbi (DIAS, 2014).

2 LAJES MISTAS

A norma brasileira em vigor atualmente a ABNT NBR 8800:2008, define o sistema estrutural de lajes mistas como:

[...] laje mista de aço e concreto, também chamada de laje com fôrma de aço incorporada, é aquela em que, na fase final, o concreto atua estruturalmente em conjunto com a fôrma de aço, funcionando como parte ou como toda a armadura de tração da laje. Na fase inicial, ou seja, antes de o concreto atingir 75 % da resistência à compressão especificada, a fôrma de aço suporta isoladamente as ações permanentes e a sobrecarga de construção.

Outros pontos destacados pela ABNT NBR 8800:2008 são referentes à capacidade de transmissão do cisalhamento longitudinal na interface entre aço e concreto. A aderência química existente entre esses dois materiais não é suficiente para garantir um comportamento misto e não pode ser considerada na transmissão do cisalhamento longitudinal, segundo Queiroz et al. (2012). Sendo assim é necessário garantir: (i) para fôrmas trapezoidais, ligações mecânicas por meio de mossas e (ii) para fôrmas de aço reentrantes, ligações por meio de atrito devido ao confinamento do concreto.

Segundo Queiroz et al. (2001), para garantir o comportamento misto, além dos meios descritos acima, podem ser utilizados outros, desde que devidamente assegurados por ensaios ou por uma combinação adequada de análise e ensaios. Um deles é a utilização de conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça.

Existem variados perfis, podendo os mesmos apresentar mossas, reentrâncias e até mesmo a combinação de ambas. A Figura 2.1 apresenta alguns perfis representativos.

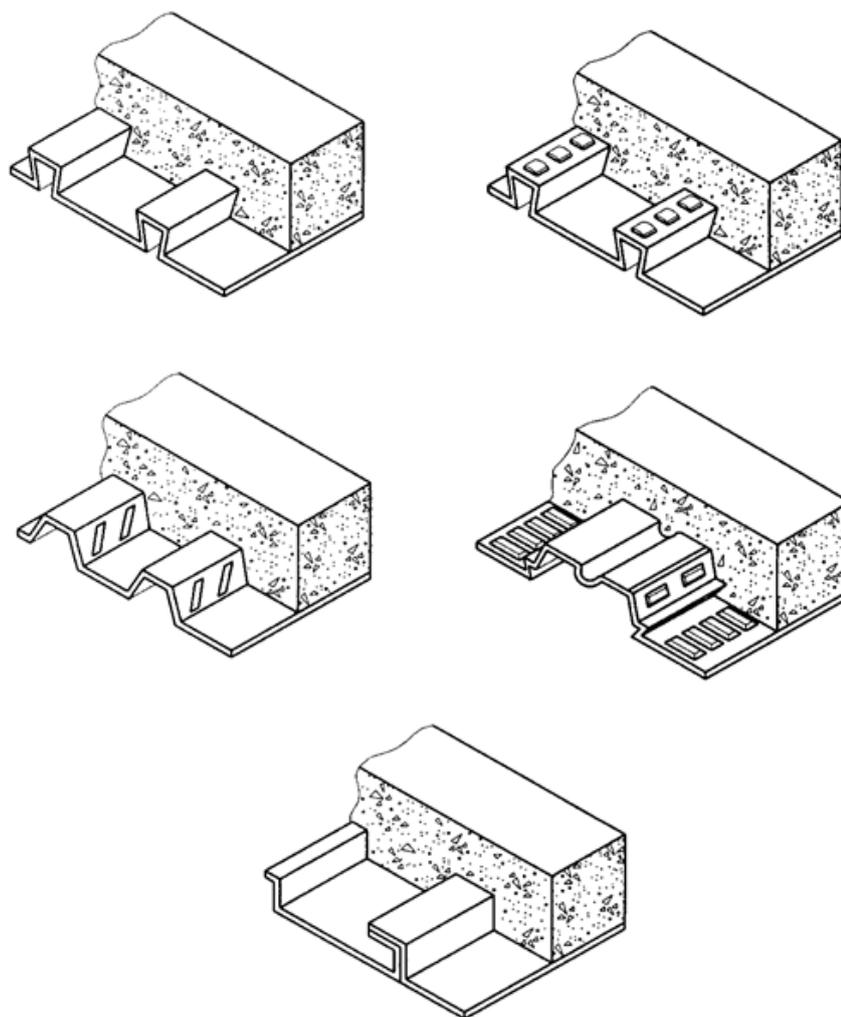


Figura 2.1 - Perfis típicos (adaptada de BS 5950: Parte 4:1994).

O cálculo de lajes mistas envolve a análise do sistema em duas fases: (i) fase de construção, quando a fôrma de aço deve resistir aos esforços solicitantes provenientes do peso do concreto fresco, da presença de equipamentos e operários em serviço, constituindo sobrecarga de construção; e (ii) fase final ou mista, que ocorre convencionalmente após a resistência do concreto atingir $0,75f_{ck}$, quando devem ser verificados estados limites últimos e estados limites de serviço, destacando-se o cisalhamento longitudinal (QUEIROZ et al., 2001).

2.1 Dimensionamento de lajes mistas

Na fase de construção, a fôrma de aço deve ser analisada sobre o regime dos estados limites últimos e estados limites de utilização segundo a ABNT NBR 14762:2001. Tais critérios dos estados são descritos por Baião Filho (2003) como:

- Estados limites últimos
 - colapso devido ao momento fletor positivo;
 - colapso devido ao momento fletor negativo;
 - colapso devido à interação do momento fletor com a força cortante;
 - colapso por esmagamento local na região do apoio;
 - colapso devido à interação do momento fletor com o efeito de cargas concentradas, incluindo o “efeito Ponding” (acúmulo de concreto).
- Estados limites de serviço
 - comprometimento do desempenho e da estética da construção causada por deslocamentos excessivos.

Na fase mista, apesar do modo de colapso ser predominante por cisalhamento longitudinal, Queiroz et al. (2012) descrevem esse e outros modos de colapso:

- flexão: resistência ao momento fletor. Esse limite pode ocorrer se o vão de cisalhamento for suficientemente grande e se houver interação completa entre concreto e a fôrma;
- cisalhamento longitudinal: a força máxima é determinada pela resistência ao cisalhamento longitudinal e depende da interação entre o aço e concreto;
- cisalhamento vertical: esse estado limite pode ser crítico se a laje for espessa, de vão curto e as forças forem elevadas;
- punção: se o perímetro da área carregada e a espessura forem pequenos e se a força concentrada for muito elevada esse estado pode ser o crítico.

Johnson (1994) localiza os modos de colapso através das seções da Figura 2.6: seção I (flexão), seção II (cisalhamento horizontal) e seção III (cisalhamento vertical).

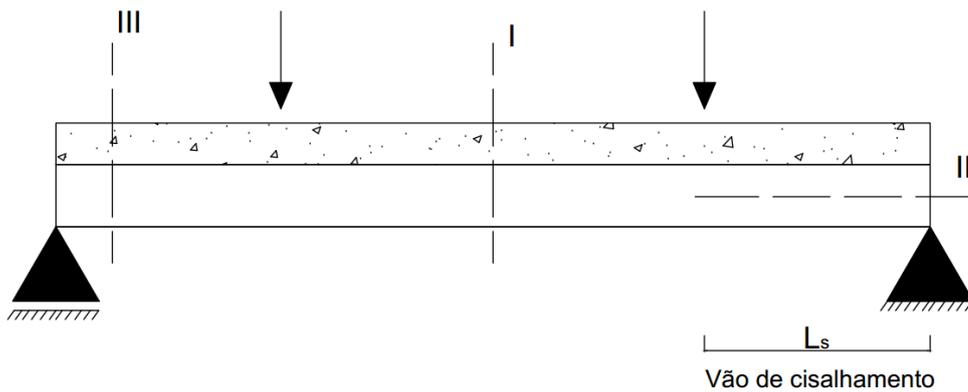


Figura 2.2 – Modos de colapso (adaptado de Johnson, 1994).

Admitindo-se interação completa e linha neutra plástica (LNP) na capa de concreto, que é o caso mais frequente, o momento fletor resistente de cálculo, ABNT 8800:2010, é dado por:

$$M_{Rd} = A_{F,ef} f_{yFd} (d_F - 0,5a) + A_{sl} f_{sd} (d_s - 0,5a) \quad (1)$$

onde:

$A_{F,ef}$ é área da seção efetiva da fôrma, determinada desprezando-se a largura das mossas na seção transversal;

A_{sl} é a área da armadura adicional;

f_{yFd} é o valor de cálculo da resistência ao escoamento do aço da fôrma ($f_{yF}/1,10$);

f_{sd} é o valor de cálculo da resistência ao escoamento do aço da armadura ($f_{ys}/1,15$);

d_F é a distância da face superior da laje de concreto ao centróide da seção efetiva da fôrma;

d_s é a distância da face superior da laje ao centro geométrico da armadura adicional.

a é a altura do bloco de compressão do concreto, dada por:

$$a = \frac{A_{F,ef} f_{yFd} + A_{sl} f_{sd}}{0,85 f_{cd} b} \quad (2)$$

b é a largura da laje;

f_{cd} é o valor de cálculo da resistência à compressão do concreto ($f_{ck}/1,40$).

Para efeito de comparação com os resultados experimentais, o momento fletor resistente deve ser determinado desconsiderando-se os coeficientes de ponderação da resistência, bem como o fator de modificação da resistência à compressão do concreto (0,85), resultando:

$$M_R = A_{F,ef} f_{yF} (d_F - 0,5a) + A_{sl} f_{ys} (d_s - 0,5a) \quad (3)$$

$$a = \frac{A_{F,ef} f_{yF} + A_{sl} f_{ys}}{f_c b} \quad (4)$$

A Figura 2.8 apresenta a correspondente distribuição de tensões na seção mista sem armadura adicional (ABNT NBR 8800:2008).

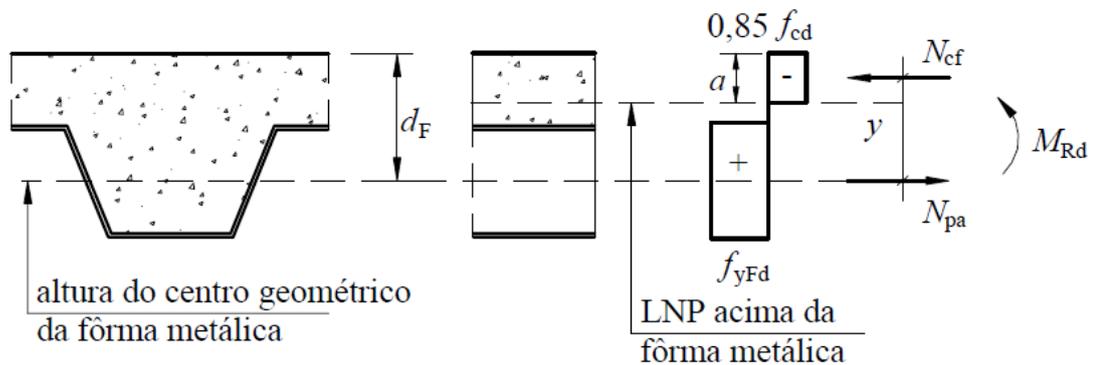


Figura 2.3 – Diagrama de tensões para momento fletor positivo: LNP acima da fôrma de aço

Existem dois métodos utilizados atualmente para verificar a interação das lajes com perfis de aço incorporados, o método *m-k* e o Método da Interação Parcial (MIP). O primeiro está baseado em uma equação semiempírica, que relaciona a resistência nominal ao esforço cortante obtido através dos parâmetros de ensaio. O segundo utiliza equações analíticas, porém deve ser utilizado apenas em lajes que apresentem comportamento dúctil.

O método *m-k* foi desenvolvido por Schuster (1970) e é um método semiempírico fundamentado por meio da consideração de uma laje simplesmente apoiada submetida a duas forças concentradas, de mesma intensidade, a uma distância L_s dos apoios (Figura 2.7).

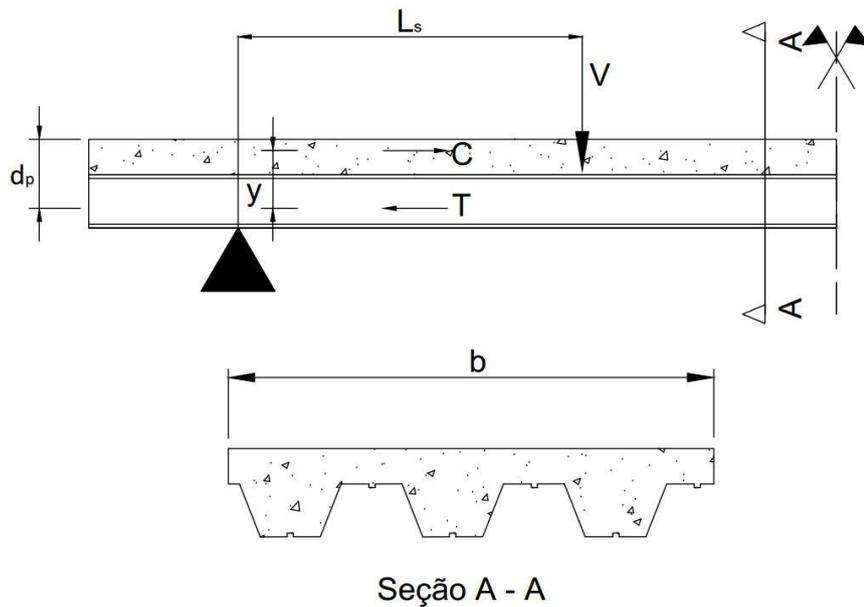


Figura 2.4 –Esquema de forças na laje mista (adaptado de Queiroz et al., 2001).

Essa configuração, definida por Queiroz et al. (2001), apresenta como momento fletor máximo $M = VL_s$ e, como é possível observar, o momento resistente dado por $M = Ty$, onde a força de tração T é limitada pela resistência ao cisalhamento longitudinal que acontece na superfície da seção transversal da fôrma pelo semiperímetro superior e o vão de cisalhamento L_s e pelo atrito nos apoios. O braço de alavanca pode ser assumido como d_p , onde d_p é a distância entre a face superior da laje ao centro de gravidade da fôrma e a superfície aproximada por bL_s , onde atua a tensão média de cisalhamento longitudinal. Essas considerações são atribuídas sem introduzir erro significativo, sendo assim é possível definir que o momento resistente é proporcional a d_p e à área bL_s e adicionando a parcela de atrito nos apoios, tem-se:

$$M = VL_s \propto (F_{\text{atrito}} + \tau bL_s) d_p \quad (5)$$

Entretanto, o momento fletor resistente presumindo interação completa constitui apenas um valor de referência, uma vez que o estado-limite último dominante no caso de lajes mistas é o cisalhamento longitudinal, devido à interação parcial entre o aço e o concreto. O dimensionamento nesse caso pode ser feito pelo método semiempírico $m-k$, onde m e k são as constantes de uma reta obtida experimentalmente (Figura 2.9).

Assim, a força cortante resistente de cálculo associada ao cisalhamento longitudinal $V_{\ell,Rd}$ é calculada por meio da seguinte expressão:

$$V_{\ell,Rd} = \frac{bd_F \left[\left(\frac{mA_{F,ef}}{bL_s} \right) + k \right]}{\gamma_{sl}} \quad (6)$$

onde:

d_F é a distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva da fôrma (anotado como d_p na Figura 2.9);

b é a largura da laje;

L_s é o vão de cisalhamento;

m e k são constantes empíricas;

$A_{F,ef}$ é a área da seção efetiva da fôrma;

γ_{sl} é o coeficiente de ponderação da resistência, igual a 1,25 conforme Eurocódigo 4.

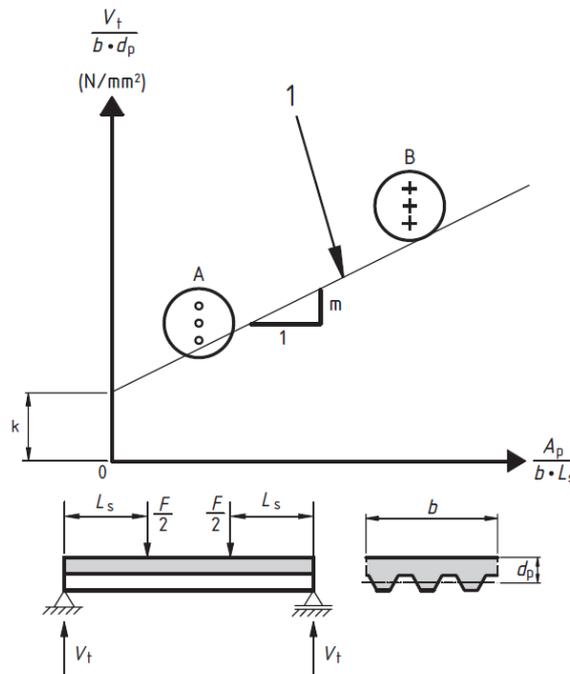


Figura 2.5 – Determinação experimental das constantes m e k (Eurocódigo4)

Para o cálculo de deslocamentos (estado-limite de serviço), o anexo Q da ABNT NBR 8800:2008 (Q.3.2.2) estabelece que o deslocamento vertical não pode

ser maior que $L_F/350$, considerando apenas o efeito das ações variáveis, onde L_F é o vão teórico da laje na direção das nervuras. Todavia ela é omissa quanto ao procedimento para cálculo do momento de inércia da seção a ser empregado no cálculo dos deslocamentos.

Com base no procedimento indicado no anexo O da ABNT NBR 8800:2008 (O.1.2) – vigas mistas com interação completa, deve ser feita uma análise elástica, tomando-se o momento de inércia calculado por meio da homogeneização teórica da seção, obtida dividindo-se a largura efetiva da laje pela razão modular $\alpha_E = E/E_c$, sendo E e E_c os módulos de elasticidade do aço e do concreto, respectivamente, e ignorando-se a participação do concreto na zona tracionada.

O método *m-k* é um método bastante consolidado. As equações que compõem esse método estão presentes na ABNT NBR 8800:2008, no EUROCODE 4 (2004), CANADIAN SHEET STEEL BUILDING S2(CSSBI) (2008), American National Standards Institute/American Society of Civil Engineers ANSI/ASCE 3-91 (1992), entre outros.

Os ensaios realizados são semelhantes nessas normas, mas a obtenção dos parâmetros “m” e “k”. O CSSBI S2 (2008) encontra esses parâmetros por meio de uma regressão linear, que pode ser realizada pelo método dos mínimos quadrados. A razão entre as resistências calculadas e experimentais deve estar entre os limites de 0,85 e 1,15, inclusive. Caso isto não ocorra, os valores de “m” e “k” devem ser reduzidos em 5%. O coeficiente de redução de resistência para o cisalhamento ϕ é adotado com o valor de 0,70.

O ANSI/ASCE (1992) utiliza uma equação análoga a da ABNT NBR 8800:2008, cujo fator de redução de resistência ϕ empregado sofre alterações dependentes da forma de ruptura da laje, não podendo assumir valor maior que 0,8. A obtenção dos parâmetros “m” e “k” dá-se através de uma regressão linear que passa por uma redução de 15% no caso de até oito testes e uma redução de 10% para casos com oito ou mais testes. A Figura 2.10 ilustra a regressão linear e redução da mesma, para encontrar as constantes “m” e “k” pela norma americana.

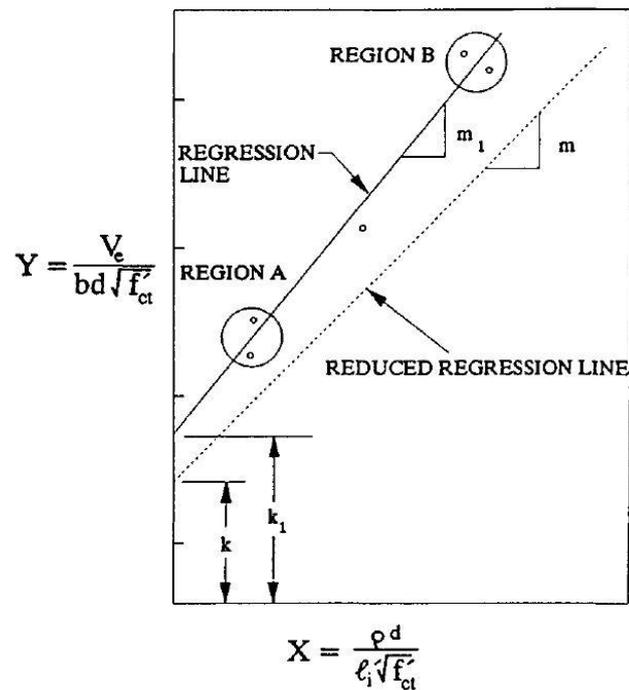


Figura 2.6 - Regressão linear e redução da regressão linear (ANSI/ASCE, 1992).

Levando em consideração que o método *m-k* utiliza um modelo experimental, quando as dimensões dos elementos, materiais ou modo de carregamento diferirem daqueles utilizados nos ensaios, devem ser feitas hipóteses conservadoras. Além disso, o método não contempla o uso de armaduras longitudinais de reforço nem a consideração de ancoragem nas extremidades de apoio.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De modo a apresentar as pesquisas já realizadas sobre os assuntos relacionados a lajes mistas, foram elencadas algumas e dispostas por meio de três grandes temas, que correlacionam os novos sistemas, os novos perfis e os mecanismos/ensaios para lajes mistas.

3.1 Novos sistemas de lajes mistas desenvolvidos

Estudos realizados por Takey (2001) na Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ deram início a novos sistemas de lajes mistas. O sistema proposto pelo pesquisador não utilizou a fôrma metálica em toda a superfície inferior da laje, no entanto sua proposta assemelhou-se às lajes pré-fabricadas, misturando dois materiais, o perfil metálico no lugar das vigotas e EPS no lugar das lajotas de cerâmica. Os dois materiais dispostos lado a lado e preenchidos por concreto constituíram o sistema de laje mista, conforme a Figura 2.11.

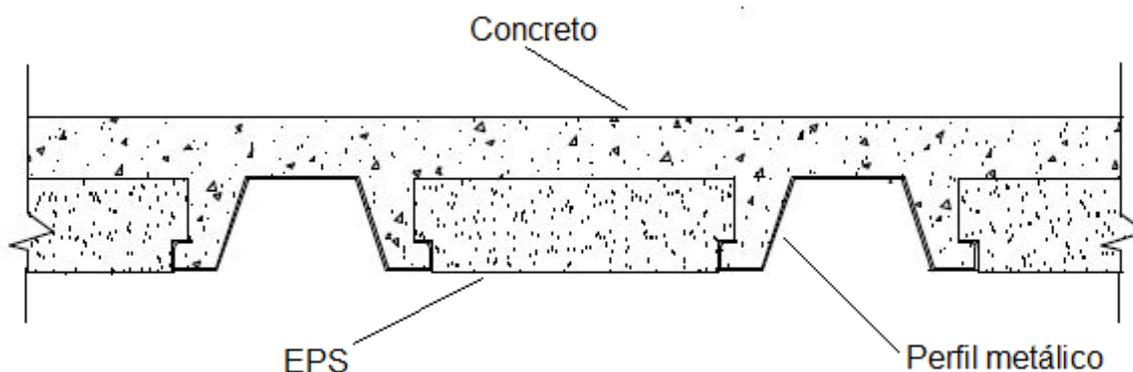


Figura 3.1 – Sistema proposto (TAKEY, 2001).

Os protótipos analisados pelo pesquisador consistem em dois perfis metálicos e EPS entre esse perfis, analisando as seguintes configurações:

- Laje de 4,30m X 1,0m, com dois perfis de chapa dobrada lisa e sem conectores de cisalhamento.
- Laje de 3,0m X 1,0m, com dois perfis de chapa dobrada lisa e sem conectores de cisalhamento.

- Laje de 4,30m X 1,0m, com dois perfis de chapa dobrada e com conectores de cisalhamento (parafusos autobrocantes espaçados de 100 em 100 milímetros).
- Laje de 3,0m X 1,0m, com dois perfis de chapa dobrada com conectores de cisalhamento (parafusos autobrocantes espaçados de 100 em 100 milímetros).
- Laje de 3,0m X 1,0m, com dois perfis de chapa dobrada com conectores de cisalhamento (parafusos autobrocantes espaçados de 200 em 200 milímetros).

As lajes do comprimento de 4,30m foram as mesmas ensaiadas com o comprimento de 3,0m, para isso houve apenas o deslocamento dos apoios para o encurtamento do vão. O autor garante que essa modificação não altera a fidelidade dos resultados, segundo ele o primeiro ensaio não provoca deslizamento relativo e a seção usada no segundo ensaio permanece com as características iniciais.

A pesquisa de Takey (2001) foi desenvolvida em três partes: otimização do perfil, obtenção do estado limite último e validação dos ensaios através da comparação com as normas de aço. Os resultados obtidos na pesquisa foram satisfatórios, sendo os custos equivalentes ao sistema convencional de laje mista. A viabilidade desse sistema se caracteriza pelas baixas perdas e baixo tempo de construção.

Pela mesma universidade, Vieira (2003) adotou outro sistema de laje mista, utilizando um perfil “C” enrijecido e preenchido com concreto estrutural. Foram desenvolvidos dois sistemas que utilizarão o perfil, em um deles apenas um perfil foi preenchido com concreto e analisado, de acordo com a Figura 2.12, e em outro, três perfis foram associados e preenchidos com concreto, de acordo com a Figura 2.11.

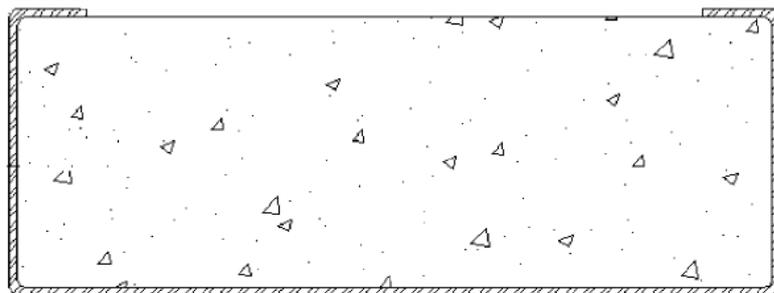


Figura 3.2 - Perfil único (VIEIRA, 2003).

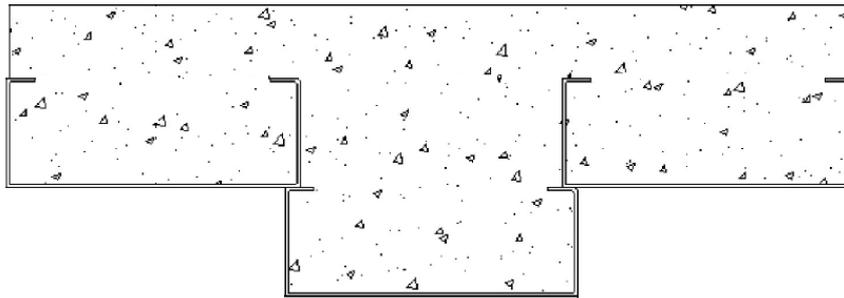


Figura 3.3 - Três perfis (VIEIRA, 2003).

Foram utilizados septos (placas de contenção entre as almas dos perfis), que dividiam o comprimento das lajes, podendo ser apenas nas extremidades ou a cada 1/3 de vão.

Nesse sistema desenvolvido por Vieira (2003), a ruptura ocorre no concreto e o local de ruína depende diretamente da localização dos septos. Quando os septos foram colocados nas extremidades, a ruptura da laje ocorreu no meio do vão. Quando foram colocados nas extremidades e em cada terço do vão, a ruptura do concreto ocorreu em um dos terços. Aos septos está atribuído a não existência de deslizamento relativo entre o perfil e o concreto e o aumento da capacidade resistente da laje.

No mesmo ano, Beltrão (2003) desenvolveu um sistema de laje mista com perfis metálicos de chapas dobradas com coroações na alma e intercaladas com chapas também corrugadas e preenchidas de concreto estrutural (Figura 2.14). Foram realizados testes de “push out” para avaliar a aderência entre o perfil e o concreto. Tanto o ensaio de aderência quanto o ensaio do sistema construtivo mostraram-se coerentes em relação a outros sistemas de lajes mistas e resultados encontrados na literatura.

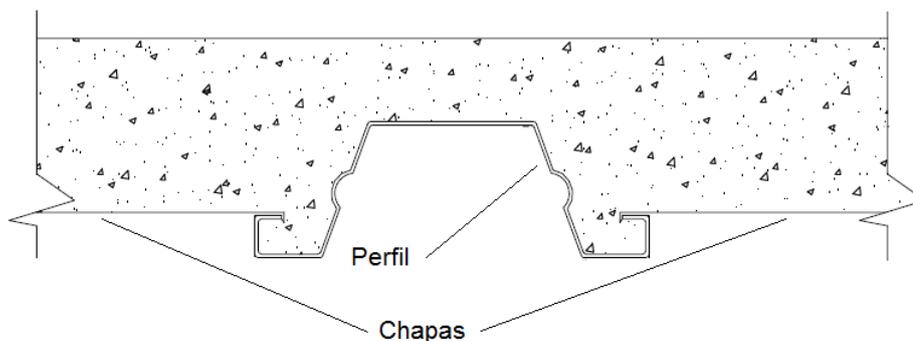


Figura 3.4 - Modelo desenvolvido por Beltrão (2003).

Com o objetivo de encontrar uma melhor aderência mecânica entre concreto e aço, Vianna (2005) desenvolveu uma nova geometria para o perfil. O sistema utilizado foi similar ao de Takey (2001), sendo perfis de chapa dobrada com dois enrijecedores intermediários na mesa superior e com corrugações na alma e EPS dispostos entre os perfis e cobertos com uma capa de concreto (Figura 2.15).

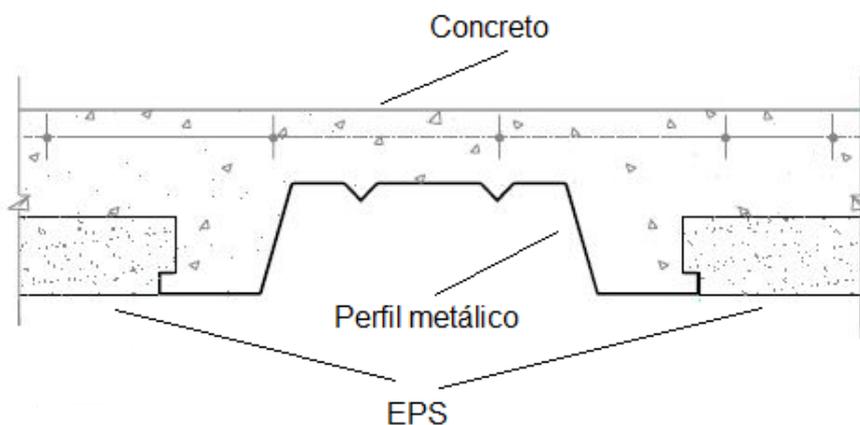


Figura 3.5 – Sistema proposto por Vianna (2005).

Para as análises realizaram-se os ensaios de *pull-out test* e flexão. O sistema destaca-se em relação aos modelos de Beltrão (2003) e Takey (2011) por sua economia de tempo e trabalho, já que todos os modelos não utilizaram conectores de cisalhamento, e por atender maiores vãos. Além disso, a rigidez do sistema é cerca de 15% maior que os sistemas dos outros dois autores. Através da Tabela 2.1 é possível comparar o consumo de material por m² entre os esquemas de Takey (2001) e Vianna (2005), sendo que apenas o consumo de concreto é maior em Vianna (2005).

Tabela 3.1 – Comparação do consumo de material por m² (Vianna, 2005).

Materiais	Unidade	Quantidade por m ²		Diferença %
		Takey	Vianna	
Isopor	Um	2,00	1,33	-33,50
Perfil Metálico	Kg	12,64	8,88	-29,74
Parafuso conector	Um	30,00	-	-
Concreto	m ³	0,07	0,10	+30,00
Malha de aço	M	11,00	10,40	-5,45

3.1.1 Novos perfis para o mercado

Uma das primeiras pesquisas utilizando fôrmas de aço (*steel deck*) fabricadas no Brasil foram realizadas através da parceria entre a empresa METFORM S. A e a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Para o desenvolvimento do perfil “Steel Deck MF 75”, que tem suas características apresentadas na Figura 2.16, vários estudos foram realizados na UFMG. Mello (1999) fundamentou seu trabalho na aplicação desse perfil como base das lajes em estruturas de edifícios metálicos. As lajes mistas foram analisadas como simplesmente apoiadas. Parâmetros como altura total, vão de cisalhamento, espessuras e dimensões foram variadas para obter uma gama maior de resultados para a definição do comportamento e da capacidade resistente das lajes mistas. A pesquisadora verificou que o único modo de ruína a afetar o perfil analisado era o colapso por cisalhamento longitudinal, sendo assim, dois parâmetros m e k foram estipulados para o dimensionamento dessas lajes.

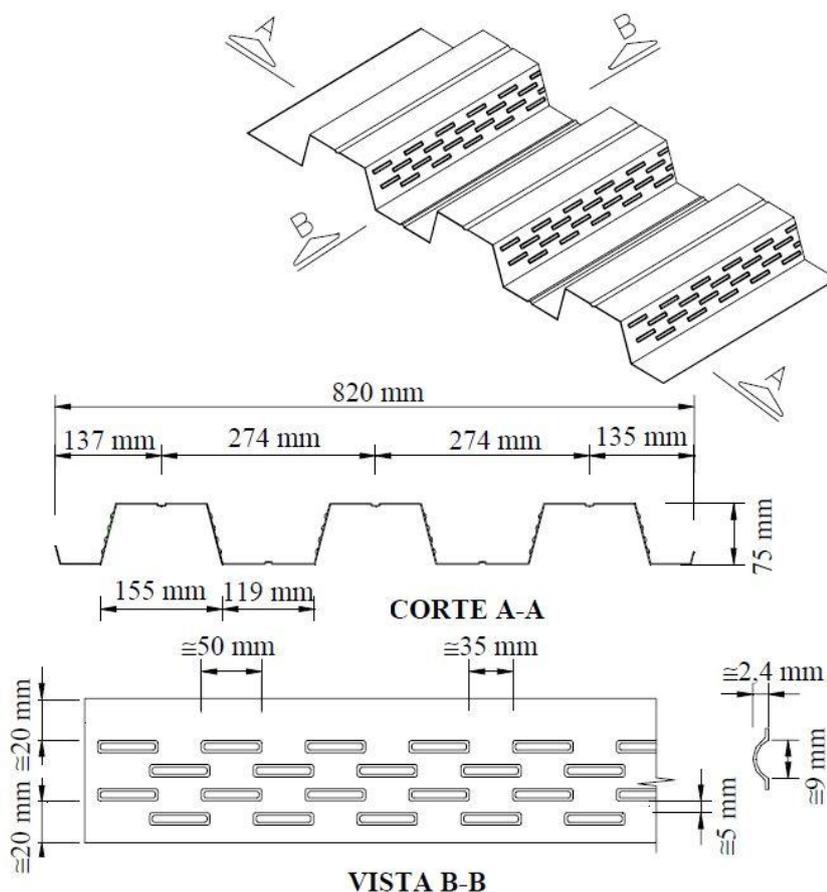


Figura 3.6 – Características do perfil Steel Deck MF 75 (GOMES, 2001).

No mesmo ano, Silva (1999) investigou a aplicação do sistema de laje mista com o “MF 75” em estruturas usuais de concreto armado, utilizando apenas lajes simplesmente apoiadas em vigas de concreto, estabelecendo novamente que o modo de colapso ocorrente foi o cisalhamento longitudinal. O autor constatou ainda a viabilidade da aplicação desse sistema de laje mista em estruturas de concreto armado.

Campos (2001) avaliou o efeito da continuidade em lajes mistas confeccionadas com o “MF 75” através de protótipos colocados sobre três apoios equidistantes, garantindo vãos contínuos idênticos e submetidos a um carregamento simétrico. A continuidade da estrutura foi estabelecida pela continuidade da fôrma metálica, da tela soldada e da armadura negativa sobre o apoio intermediário. Os resultados dos ensaios apontaram que a disposição contínua aumenta de forma considerável a capacidade portante e a rigidez das lajes mistas contínuas em relação as lajes mistas simplesmente apoiadas, além da continuidade retardar o deslizamento relativo entre a fôrma de aço e a laje de concreto.

Gomes (2001) analisou o emprego de concreto estrutural leve com densidade de 1800 kg/m^3 como substituto do concreto estrutural convencional nas lajes mistas, também utilizando o “MF 75”. O autor obteve um bom desempenho com o emprego desse concreto no sistema, considerando que a capacidade de carga para estado limite de utilização da fôrma de aço foram similares as lajes produzidas com concreto convencional. A diferença encontrada entre os valor das constantes m e k é muito pequena, o que mostra a similaridade da utilização do concreto leve e do concreto convencional.

Os perfis MF 50 (Figura 2.17) com espessuras de 0,8 mm e 1,25 mm, fabricados pela empresa METFORM, foram analisados através de dois métodos de cálculo para o cisalhamento longitudinal, sendo eles o método $m-k$ e o método da interação parcial. Pelo método $m-k$ foi possível encontrar valores para a fôrma de espessura 0,95 mm através da interpolação dos valores das outras espessuras analisadas. Os dois métodos utilizados foram satisfatórios e considerados seguros pelo autor. Outro ponto observado foi o comportamento da laje mista durante os ensaios, onde as etapas apresentaram a mesma sequência: fissuração, acomodação e deslizamento. Esse comportamento foi encontrado em todas as séries estudadas (BRENDOLAN, 2007).

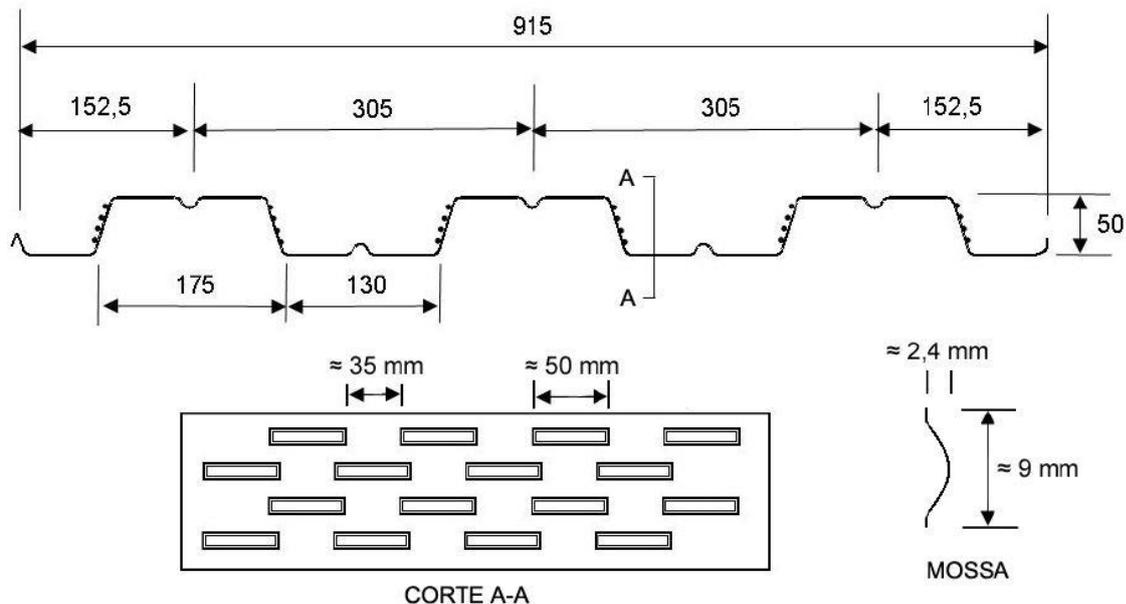


Figura 3.7 – Características do perfil Steel Deck MF 50 (BRENDOLAN, 2007).

Araújo (2008) utilizou os dados da pesquisa de Rodrigues e Lavall (2005), referentes ao Deck-60 da empresa USIMINAS, para analisar os dois métodos previstos no EUROCODE 4 (método $m-k$ e método da interação parcial (MIP)) para o sistema de laje mista. A pesquisa foi composta por doze modelos, sendo seis com fôrmas de 0,8 mm de espessura e seis com fôrmas de 0,95 mm de espessura. Os modelos foram bi apoiados e submetidos aos ensaios conforma o EUROCODE 4. As relações analisadas foram: força x deslizamento relativo na extremidade; força x flecha no meio do vão e força x deformação no aço. Os resultados encontrados entre os dois métodos indicaram boa correlação. O MIP apresentou melhor resultado para o comportamento dúctil das fôrmas com boa ligação mecânica e das lajes com grandes vãos..

Outra pesquisa foi desenvolvida por Sernizon (2009) utilizando o Deck-60. A pesquisa considerou a influência do atrito dos apoios e avaliou o momento inicial efetivo para os métodos empregados ($m-k$, MIP), onde o MIP foi analisado considerando e desconsiderando a influência do atrito nas extremidades. Os resultados obtiveram boas correlações, sendo que para vãos maiores o atrito nos apoios influenciou pouco em relação aos vãos menores.

O MIP surge como uma alternativa ao método $m-k$ para a verificação da capacidade resistente ao cisalhamento longitudinal, explorando melhor o comportamento dúctil das fôrmas com boa ligação mecânica e grandes vãos. Além do mais, o método permite considerar as contribuições do atrito na região dos

apoios, as ancoragens de extremidade e as armaduras de reforço, que melhoram a capacidade de resistência ao cisalhamento longitudinal do sistema de laje mista (SERNIZON, 2009).

Hedao et al. (2012) realizaram a análise dos perfis de laje mista de uma empresa indiana. Foram produzidas 18 amostras divididas em 6 conjuntos, cada um com 3 amostras. As amostras foram simplesmente apoiadas no aparato de ensaio e submetidas a froças estáticas e cíclicas. O cisalhamento longitudinal foi avaliado pelo método $m-k$ e pelo Método da Interação Parcial e seus valores comparados. A correlação entre os valores dos dois métodos foram satisfatórias, tendo o método $m-k$ como mais conservador.

Recentemente foi disponibilizado um sistema estrutural de laje mista nervurada, desenvolvido pela empresa Tuper S.A., que utiliza vigotas metálicas incorporadas ao concreto. O sistema comporta três tipos de enchimento: EPS, base placa cimentícia com EPS e cerâmica, conforme a Figura 2.18. Considerando que as vigotas metálicas são mais leves que as tradicionais vigotas pré-fabricadas e treliçadas. A facilidade de montagem gera economia na mão de obra.



Figura 3.8 - Tipos de enchimento (Tuper S.A, 2015).

3.1.2 Novos mecanismos, ensaios e softwares

Daniels & Crisinel (1993) sugeriram um novo procedimento de cálculo em alternativa aos ensaios de escala real de lajes mistas com fôrma de aço incorporada não lisas. Para isso os ensaios utilizados foram o *pull out test* – encarregado de investigar o comportamento e a resistência na interface de ligação entre a fôrma de

aço e o concreto – e o *push off test* – escolhido para determinar o comportamento e a capacidade resistente da ancoragem de extremidade entre a viga de apoio, a fôrma de aço e a laje de concreto nos apoios. Esse novo procedimento combina os resultados experimentais obtidos com uma análise numérica que determina a capacidade resistente da laje mista e seu comportamento, sendo aplicável em lajes simplesmente apoiadas ou contínuas, sendo esses procedimentos descritos na pesquisa.

Hipóteses e simplificações foram adotadas em relação às propriedades dos materiais, tendo previsões razoáveis da capacidade resistente e comportamento de lajes mistas. As vantagens desse novo procedimento de cálculo foram sua versatilidade e seu baixo custo, além da possibilidade de estimativa dos deslocamentos para o regime de serviço, e a análise dos parâmetros adicionais, como a ancoragem de extremidade, a contribuição da armadura existente nas regiões de momento negativo e a aplicação em lajes contínuas. As Figuras 2.19 e 2.20 ilustram os ensaios de *pull out test* e *push off test* (DANIELS & CRISINEL, 1993).

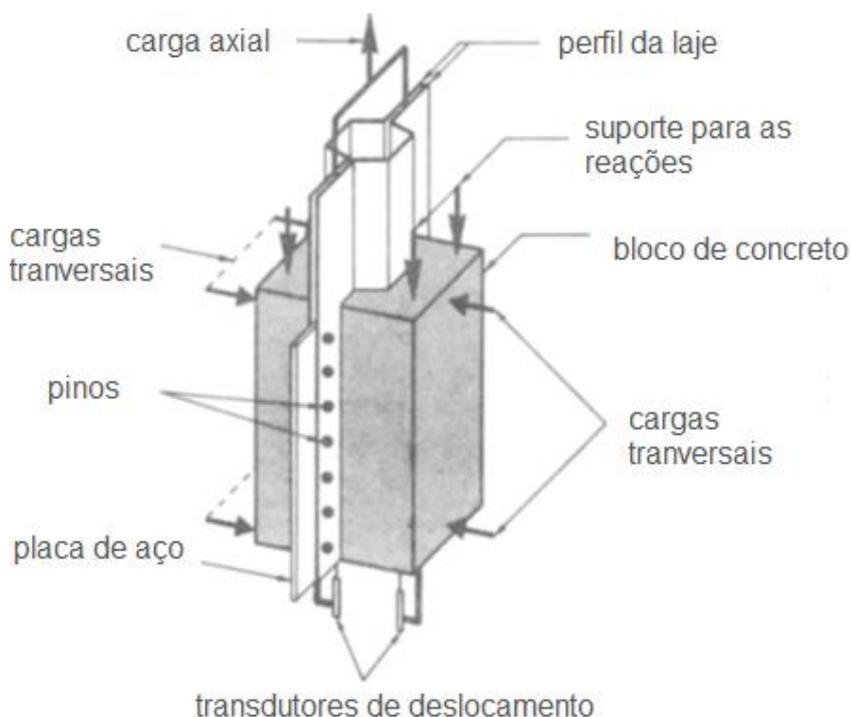


Figura 3.9- Pull out test (adaptada de DANIELS & CRISINEL, 1993).

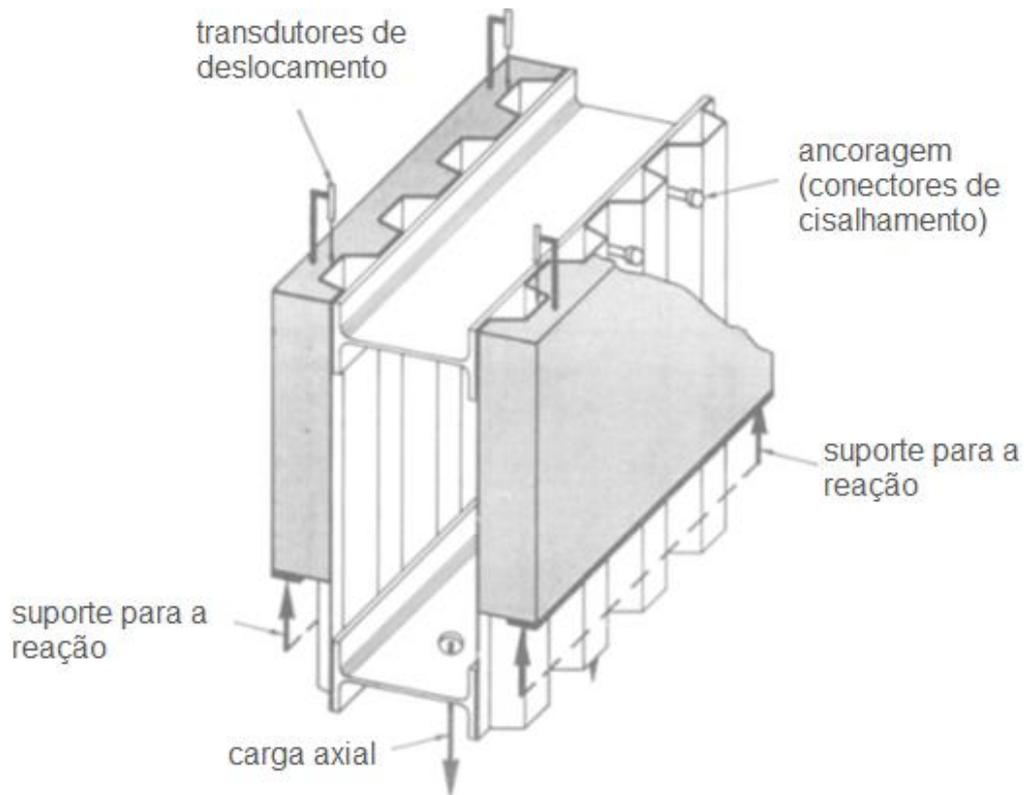


Figura 3.10 - Push off test (adaptada de DANIELS & CRISINEL, 1993).

Neto (2001) estudou o uso de conectores de cisalhamento – *stud bolts* – nas extremidades das lajes mistas, conforme Figura 2.21. O uso dessa ancoragem de extremidade demonstrou um aumento significativo, tanto na rigidez quanto na resistência ao cisalhamento longitudinal, com relação às lajes não ancoradas. No entanto, o modo de ruptura continuou sendo o mesmo das lajes não ancoradas, o cisalhamento longitudinal. Houve um acréscimo de 45% a 125 % na capacidade de carga, variando com as dimensões das lajes, para os sistemas que continham *stud bolt* em relação aos sistemas sem ancoragem, simplesmente apoiados.

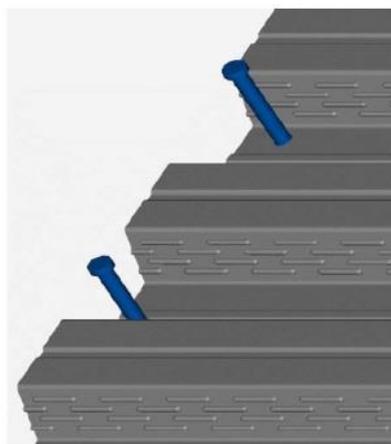


Figura 3.11 - Fôrma e *stud bolt* na extremidade (NETO, 2001).

Baião Filho (2003) desenvolveu uma rotina no software Excel® para o cálculo do máximo vão de diversas seções de fôrmas de aço utilizadas na confecção de lajes mistas em sua fase inicial, ou seja, na fase de construção. Os dados de entrada do programa foram a geometria da seção da fôrma, propriedades do aço e os carregamentos atuantes. O máximo vão passou pelos seguintes critérios:

- Colapso devido ao momento fletor positivo;
- Colapso devido ao momento fletor negativo;
- Colapso devido à força cortante;
- Colapso por esmagamento local na região de apoio;
- Colapso por interação do momento fletor e a força cortante.

O programa pré-define nove tipos de geometria básica, conforme a Figura 2.22, sendo os parâmetros ajustáveis através da entrada de dados para o tipo de geometria e para três formas de disposição (bi apoiadas, contínua com dois vãos e contínua com três vãos). A análise da planilha de cálculo retorna o máximo vão e o critério de colapso (BAIÃO FILHO, 2003).

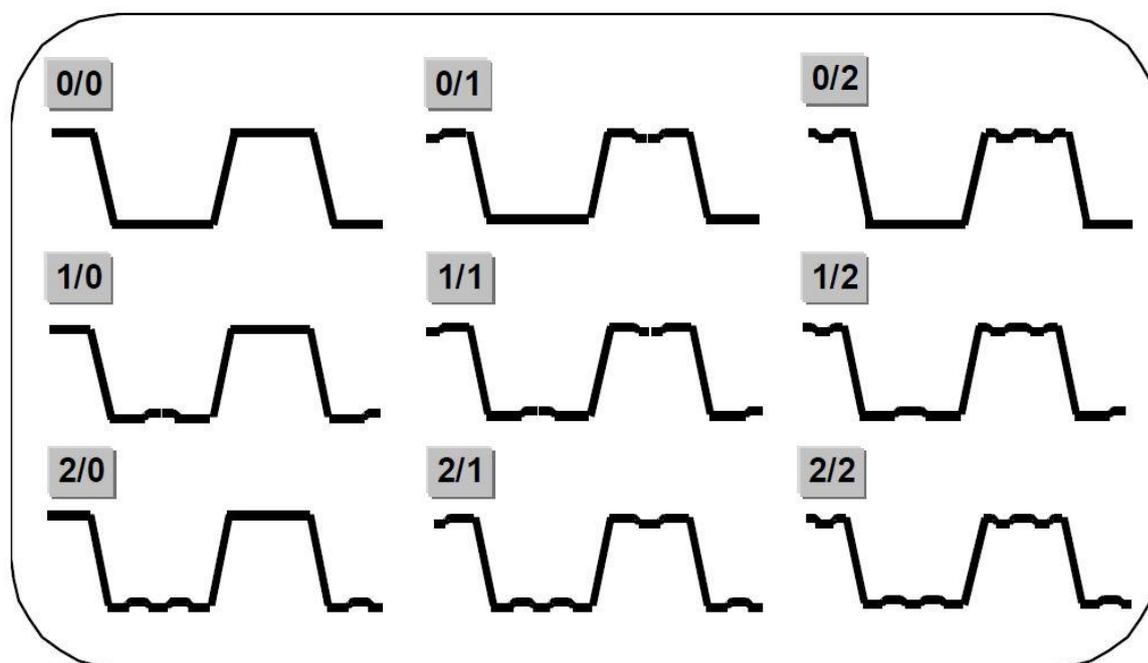


Figura 3.12 - Tipos de geometrias considerados pelo programa de Baião Filho (2003).

Outras análises abordadas na pesquisa de Baião Filho (2003) foram a influência das mossas em um elemento de fôrma submetido à força normal de tração (importante na fase mista) e a influência das mossas em elementos de fôrma

submetidos a um momento fletor puro (importante para a fase inicial). Ambas as análises foram realizadas através do software ANSYS 5.7.

Crisinel e Marimon (2004) desenvolveram um novo método simplificado para reproduzir o comportamento dúctil ou frágil das lajes mistas. Para esse método os pesquisadores utilizaram o ensaio de *pull out*, desenvolvido no Laboratório de Construção Metálica (ICOM) da Escola Politécnica Federal de Lausanne (EPFL) por Daniels (1990) *apud* Crisinel e Marimon (2004), para encontrar parâmetros como coeficiente atrito e a consideração das condições de ancoragem. O modelo físico que representa esse novo método é um perfil I que apresenta as mesmas propriedades da fôrma de aço utilizada, ou seja, apresenta a mesma área e momento de inércia e similarmente o concreto é moldado com uma seção retangular de mesma área e momento de inércia da seção de concreto da laje mista, sendo assim a laje mista fica expressa por meio de uma viga mista.

Carvalho (2005) estudou o comportamento das fôrmas profundas com alma corrugada na fase antes da cura do concreto. Para esse estudo foram analisados primeiramente três painéis isolados: chapas lisas, painéis com corrugações borda a borda e painéis com corrugações parciais, conforme a Figura 2.23.

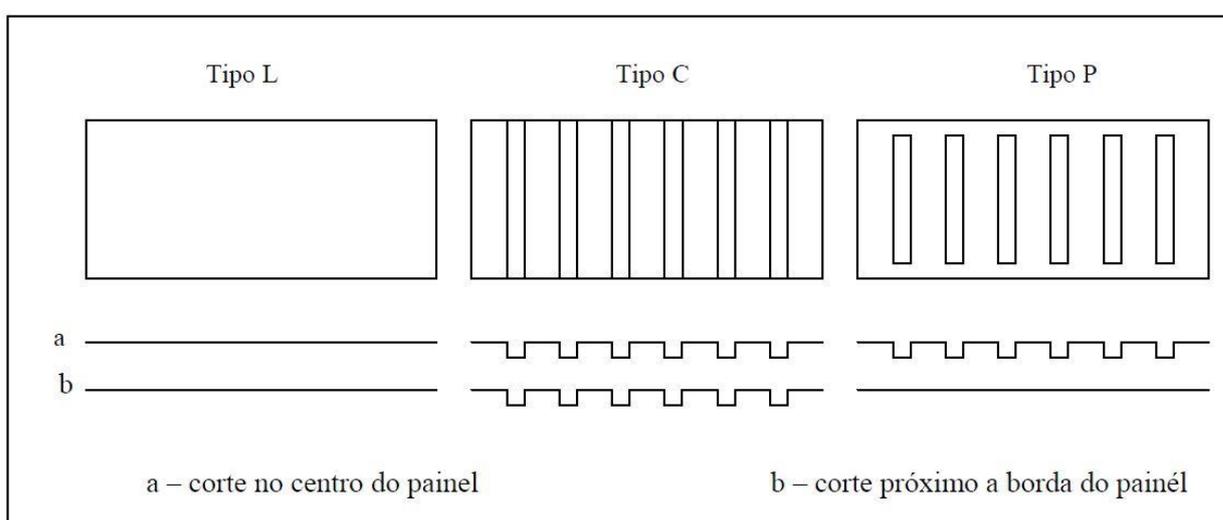


Figura 3.13 - Seções dos painéis (CARVALHO, 2005).

Os resultados foram obtidos através do método de elementos finitos, modelados através do ANSYS e da formulação teórica para os seguintes carregamentos:

- Cisalhamento puro;
- Compressão uniforme;

- Carga concentrada.

Foram estudados, também, a composição de fôrmas com esses painéis através da modelagem, no mesmo programa, considerando os carregamentos:

- Tração no sentido longitudinal da fôrma;
- Momento concentrado nas extremidades da fôrma.

As relações obtidas através de formulações e da análise de elementos finitos foram satisfatórias, viabilizando a utilização de fôrmas profundas de alma corrugada. (CARVALHO, 2005).

Lakshmikandhan et al. (2013) desenvolveram três esquemas de conectores mecânicos, além do padrão de laje mista sem mecanismos de conexão. Todos os esquemas exibiram interação completa e insignificante deslizamento, já o padrão apresentou uma interação parcial e deslizamento relativo entre a fôrma e o concreto. As lajes mistas desenvolvidas com conectores possuíram cerca de uma vez e meia mais resistência comparada com lajes de concreto convencionalmente armadas e até duas vezes quando comparadas com lajes mistas sem conectores mecânicos. A Figura 2.24 ilustra as três disposições dos conectores mecânicos analisados na pesquisa.

A inserção de barras transversais nas lajes, conforme os esquemas 2 e 3, segundo os autores, torna o sistema mais rígido, o que pode dispensar o escoramento temporário na fase de construção. Considerando que as cargas últimas dos esquemas 1, 2 e 3 foram cerca de 115 KN, 120 KN, 115 KN, respectivamente, e que a carga última de laje mista padrão foi de 65 KN, pode-se dizer que os esquemas propostos conferiram as lajes mistas uma maior capacidade de carga, além de conferir ao sistema uma interação completa. (LAKSHMIKANDHAN et al., 2013).

Os esquemas propostos nessa pesquisa fazem uma boa análise sobre as diversas disposições, porém são economicamente inviáveis, a introdução desses conectores ao longo dos vãos das lajes torna o sistema caro.

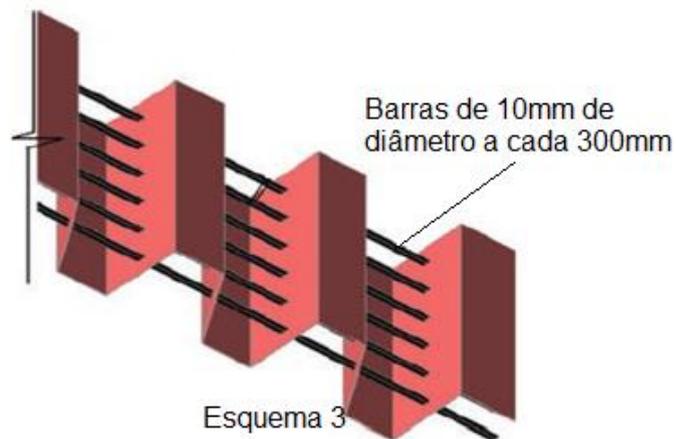
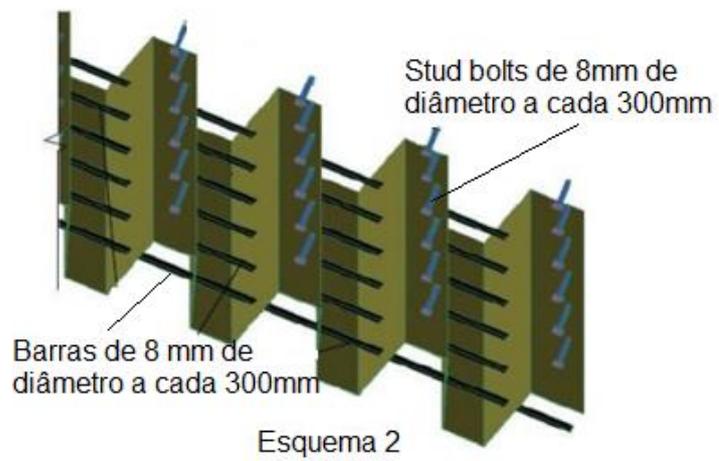
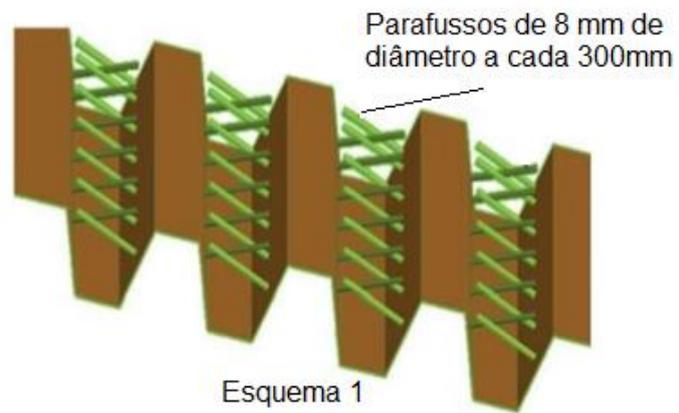


Figura 3.14 - Esquemas dos 3 conectores mecânicos usados por Lakshmikandhan et al. (2013)

4 ANÁLISE DA FÔRMA DE AÇO

MD55

O perfil utilizado na pesquisa é um perfil trapezoidal com altura de 55 mm e mossas nas almas, cujas espessuras nominais são 0,80 mm e 1,25 mm. Esse tipo de fôrma tem ligação mecânica entre o aço e o concreto associada as mossas e capacidade resistente associada a altura e a espessura do perfil. A Figura ilustra o perfil MD55 empregado na pesquisa.

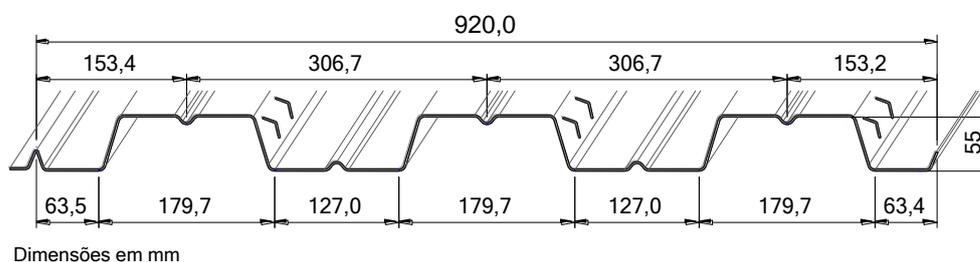


Figura 4.1 - Perfil MD55

4.1 Relações geométricas

Conforme o item Q.3.1.1.4 da ABNT NBR 8800:2008: deve-se assegurar que não haverá flambagem local da fôrma de aço na fase construtiva. Para isso, a largura plana de todos os elementos da fôrma (Figura 3.1), deve atender à seguinte exigência:

$$b_F \leq \frac{26,49 \sqrt{\frac{E}{f_{yF}}}}{(13\alpha - 1)} t_F \quad \text{quando } \alpha \geq 0,5 \quad (7)$$

$$b_F \leq \frac{2,4 \sqrt{\frac{E}{f_{yF}}}}{\alpha} t_F \quad \text{quando } \alpha < 0,5 \quad (8)$$

Onde:

α é a relação entre a largura da parte comprimida e a largura plana do elemento;

t_F é a espessura da fôrma de aço.

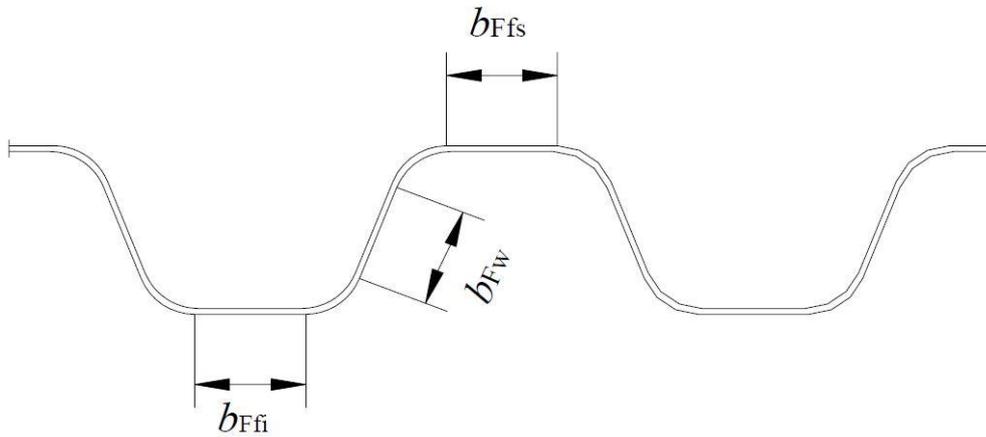


Figura 4.2 - Largura plana dos elementos da fôrma (ABNT NBR 8800:2008).

Verificação para a fôrma com espessura nominal de 0,80 mm

Dados:

$$t = 0,76 \text{ mm}$$

$$f_y = 280 \text{ MPa}$$

$$E = 200.000 \text{ MPa}$$

$$b_{Ffs} = b_{Ffi} = 50,8 \text{ mm}$$

$$b_{Fw} = 47,3 \text{ mm}$$

Alma:

$$\alpha = 0,5$$

$$b_{F,m\acute{a}x} = \frac{26,49 \sqrt{\frac{200.000}{280}}}{(13 \times 0,5 - 1)} 0,76 = 97,8 \text{ mm}$$

$$b_{Fw} < b_{F,m\acute{a}x} \rightarrow OK$$

Mesas:

$$\alpha = 1$$

$$b_{F,m\acute{a}x} = \frac{26,49 \sqrt{\frac{200.000}{280}}}{(13 \times 1 - 1)} 0,76 = 44,8 \text{ mm}$$

$$b_{Ffs} = b_{Ffi} \cong b_{F,m\acute{a}x} \rightarrow OK$$

Verificação para a fôrma com espessura nominal de 1,25 mm

Dados:

$$t = 1,21 \text{ mm}$$

$$f_y = 345 \text{ MPa}$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$b_{Ffs} = b_{Ffi} = 50,8 \text{ mm}$$

$$b_{Fw} = 47,3 \text{ mm}$$

Alma:

$$\alpha = 0,5$$

$$b_{F,m\acute{a}x} = \frac{26,49 \sqrt{\frac{200.000}{280}}}{(13 \times 0,5 - 1)} 1,21 = 140,3 \text{ mm}$$

$$b_{Fw} < b_{F,m\acute{a}x} \rightarrow OK$$

Mesas:

$$\alpha = 1$$

$$b_F = \frac{26,49 \sqrt{\frac{200.000}{280}}}{(13 \times 1 - 1)} 1,21 = 63,3 \text{ mm}$$

$$b_{Ffs} = b_{Ffi} < b_{F,m\acute{a}x} \rightarrow OK$$

4.2 Análise de estabilidade elástica

A análise de estabilidade elástica da fôrma de aço isolada (fase de construção) foi realizada por meio do software CUFSM (versão 4.05), Li, Z., Schafer, B.W (2010), que utiliza o método das faixas finitas semianalíticas para análise da estabilidade elástica de perfis com paredes finas.

O programa analisa a geometria do perfil e calcula as tensões críticas de flambagem com base na tensão de referência. A análise foi feita considerando apenas uma onda da seção, conforme figura 3.2.

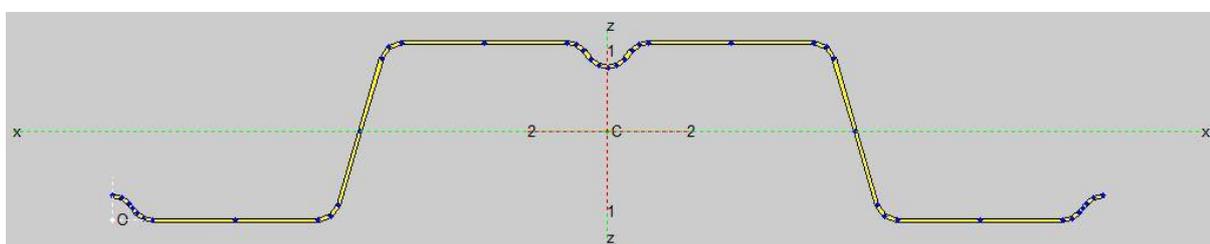


Figura 4.3 - Seção transversal representativa da fôrma, modelada no programa CUFSM.

As propriedades geométricas calculadas pelo CUFSM estão apresentadas na Figura 3.3.

Espessura 0,80 mm		Espessura 1,25 mm	
A = 298.8743	J = 57.5433	A = 475.8393	J = 232.2255
xcg = 153.1454	zcg = 27.4997	xcg = 153.1454	zcg = 27.4997
bx = 172761.3328	lzz = 2249514.2039	bx = 275054.2272	lzz = 3581463.4036
bxz = 40.0311	$\theta = -89.9989$	bxz = 63.7337	$\theta = -89.9989$
I11 = 2249514.2047	I22 = 172761.332	I11 = 3581463.4048	I22 = 275054.2259
Open Section Properties		Open Section Properties	
Xs = 153.1513	Zs = 68.0551	Xs = 153.1513	Zs = 68.0551
Cw = 421391579.2827		Cw = 670899751.2263	
$\beta_1 = -0.014457$	Basic Plot <input type="button" value="v"/> ω scale = <input type="text" value="1"/>	$\beta_1 = -0.014457$	Basic Plot <input type="button" value="v"/> ω scale = <input type="text" value="1"/>
$\beta_2 = 303.5754$	<input type="button" value="warping text out"/>	$\beta_2 = 303.5754$	<input type="button" value="warping text out"/>

Figura 4.4 – Propriedades da seção fornecida pelo CUFSM, conforme os eixos da Figura 3.2.

O programa CUFSM apresenta a curva “load factor” *versus* comprimento de meia onda, permitindo identificar os modos de flambagem e respectivos esforços críticos. O “load fator” é a relação entre a tensão crítica e a tensão de referência informada pelo usuário. Neste caso adotou-se como tensão de referência 1MPa, portanto, o “load fator” é a própria tensão crítica em MPa.

As Figuras 3.4 e 3.5 apresentam as curvas de flambagem para as espessuras nominais de 0,80 mm e 1,25 mm, respectivamente.

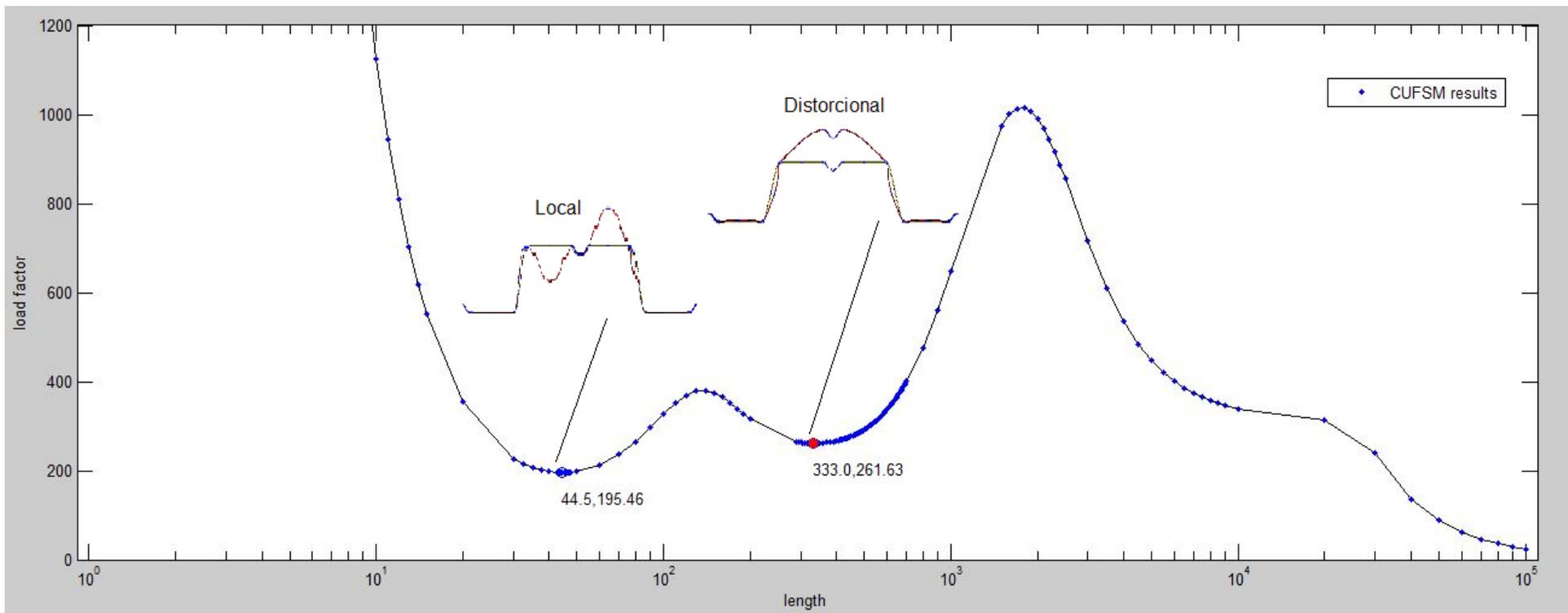


Figura 4.5 – Curva de flambagem para perfil de espessura nominal 0,80 mm
 Tensão máxima da referência: 1 MPa
 Comprimento de meia onda em mm

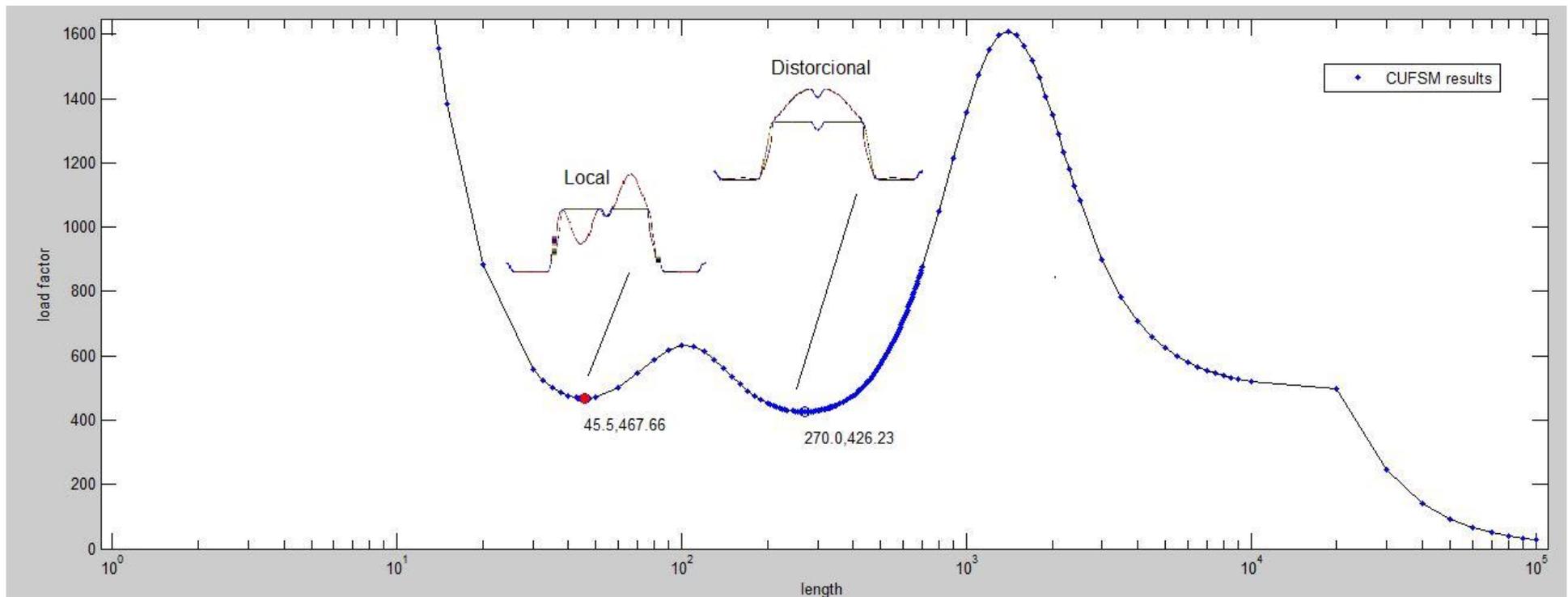


Figura 4.6 – Curva de flambagem para perfil de espessura nominal 1,25 mm
 Tensão máxima da referência: 1 MPa
 Comprimento de meia onda em mm

4.3 Momentos fletores resistentes

Os momentos fletores resistentes de flambagem local e de flambagem distorcional foram obtidos com base no método da resistência direta, conforme ABNT NBR 14762:2010.

O valor característico do momento fletor resistente M_{Rk} deve ser tomado como o menor valor calculado para a flambagem local e distorcional, $M_{R\ell}$, M_{Rdist} , respectivamente. O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} é dado por M_{Rk}/γ , onde γ é igual a 1,10.

Flambagem local

$$M_{R\ell} = M_{Re} \text{ para } \lambda_{\ell} \leq 0,776 \quad (9)$$

$$M_{R\ell} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_{\ell}^{0,8}}\right) \frac{M_{Re}}{\lambda_{\ell}^{0,8}} \text{ para } \lambda_{\ell} > 0,776 \quad (10)$$

Onde:

$$\lambda_{\ell} = \left(\frac{M_{Re}}{M_{\ell}}\right)^{0,5} \quad (11)$$

M_{ℓ} é o Momento crítico de flambagem elástica local ($M_{\ell} = W\sigma_{\ell}$)

M_{Re} é definido pela análise da flambagem lateral com torção ou igual a M_y quando o perfil tem contenção lateral continua ($M_{Re} = Wf_y$)

Flambagem distorcional

$$M_{Rdist} = Wf_y \text{ para } \lambda_{dist} \leq 0,673 \quad (12)$$

$$M_{Rdist} = \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{dist}} \right) \frac{Wf_y}{\lambda_{dist}} \text{ para } \lambda_{dist} > 0,673 \quad (13)$$

Onde:

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{Wf_y}{M_{dist}} \right)^{0,5} \quad (14)$$

M_{dist} é o Momento crítico de flambagem elástica distorcional ($M_{dist} = W\sigma_{dist}$)

4.3.1 Momento fletor resistente de uma onda da fôrma com espessura nominal 0,80 mm

Propriedades referentes a uma onda:

$$A = 298,87 \text{ mm}^2$$

$$y_{cg} = 27,5 \text{ mm}$$

$$W = 6.280 \text{ mm}^3$$

$$I_x = 172.761 \text{ mm}^4$$

Propriedades referentes ao aço:

$$E = 200.000 \text{ MPa}$$

$$G = 77.000 \text{ MPa}$$

$$f_y = 280 \text{ MPa}$$

Tensão crítica local (CUFSM):

$$\sigma_\ell = 19,55 \text{ kN / cm}^2$$

Cálculo do momento resistente local pelo método da resistência direta:

$$M_\ell = 1,23 \text{ kN.m}$$

$$M_{Re} = W \cdot f_y = 1,76 \text{ kN.m}$$

$$\lambda_\ell = \left(\frac{1,76}{1,23} \right)^{0,5}$$

$$\lambda_\ell = 1,20 > 0,776$$

$$M_{R\ell} = \left(1 - \frac{0,15}{1,20^{0,8}} \right) \frac{1,73}{1,20^{0,8}}$$

$$M_{R\ell} = 1,32 \text{ kN.m}$$

Tensão crítica distorcional (CUFSM):

$$\sigma_{dist} = 26 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

Cálculo do momento resistente distorcional pelo método da resistência direta:

$$M_{dist} = 1,63 \text{ kN.m}$$

$$W \cdot f_y = 1,76 \text{ kN.m}$$

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{1,76}{1,63} \right)^{0,5}$$

$$\lambda_{dist} = 1,04 > 0,673$$

$$M_{Rdist} = \left(1 - \frac{0,22}{1,04} \right) \frac{1,76}{1,04}$$

$$M_{Rdist} = 1,33 \text{ kN.m}$$

Valor característico do momento fletor resistente e momento fletor resistente de cálculo:

$$M_{Rk} = M_{R\ell} = 1,32 \text{ kN.m} \cong M_{Rdist}$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{Rk}}{\gamma}$$

$$M_{Rd} = \frac{1,32}{1,10}$$

$$M_{Rd} = 1,20 \text{ kN.m}$$

Para a largura unitária da fôrma: $M_{Rd} = 1,20 / 0,306 = 3,92 \text{ kN.m/m}$

4.3.2 Momento fletor resistente de uma onda da fôrma com espessura nominal 1,25 mm

Propriedades referentes a uma onda:

$$A = 475,83 \text{ mm}^2$$

$$y_{cg} = 27,5 \text{ mm}$$

$$W = 10.000 \text{ mm}^3$$

$$I_x = 275.054 \text{ mm}^4$$

Propriedades referentes ao aço:

$$E = 200.000 \text{ MPa}$$

$$G = 77.000 \text{ MPa}$$

$$f_y = 345 \text{ MPa}$$

Tensão crítica local (CUFSM):

$$\sigma_\ell = 46,76 \text{ kN/cm}^2$$

Cálculo do momento resistente local pelo método da resistência direta:

$$M_{\ell} = 4,68 \text{ kN.m}$$

$$M_{Re} = 3,45 \text{ kN.m}$$

$$\lambda_{\ell} = \left(\frac{3,45}{4,68} \right)^{0,5}$$

$$\lambda_{\ell} = 0,86 > 0,776$$

$$M_{R\ell} = \left(1 - \frac{0,15}{0,86^{0,8}} \right) \frac{3,45}{0,86^{0,8}}$$

$$M_{R\ell} = 3,23 \text{ kN.m}$$

Tensão crítica distorcional (CUFSM):

$$\sigma_{dist} = 42,62 \text{ kN / cm}^2$$

Cálculo do momento resistente distorcional pelo método da resistência direta:

$$M_{dist} = 4,26 \text{ kN.m}$$

$$W \cdot f_y = 3,45 \text{ kN.m}$$

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{3,45}{4,26} \right)^{0,5}$$

$$\lambda_{dist} = 0,9 > 0,673$$

$$M_{Rdist} = \left(1 - \frac{0,22}{0,9} \right) \frac{3,45}{0,9}$$

$$M_{Rdist} = 2,90 \text{ kN.m}$$

Valor característico do momento fletor resistente e momento fletor resistente de cálculo:

$$M_{Rk} = M_{Rdist} = 2,90 \text{ kN.m}$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{Rk}}{\gamma}$$

$$M_{Rd} = \frac{2,90}{1,10}$$

$$M_{Rd} = 2,63 \text{ kN.m}$$

Para a largura unitária da fôrma: $M_{Rd} = 2,63 / 0,306 = 8,58 \text{ kN.m / m}$

4.4 Força cortante resistente

As equações utilizadas para p calculo desse item encontram-se na ABNT NBR 14762:2010.

A força cortante resistente de cálculo V_{Rd} deve ser calculada por:

- Para $h/t \leq 1,08(Ek_v/f_y)^{0,5}$

$$V_{Rd} = 0,6f_yht/\gamma \quad (\gamma = 1,1) \quad (15)$$

- Para $1,08(Ek_v/f_y)^{0,5} < h/t \leq 1,4(Ek_v/f_y)^{0,5}$

$$V_{Rd} = 0,65t^2(k_vf_yE)^{0,5}/\gamma \quad (\gamma = 1,1) \quad (16)$$

- Para $h/t > 1,4(Ek_v/f_y)^{0,5}$

$$V_{Rd} = \left[0,905Ek_v t^3 / h \right] / \gamma \quad (\gamma = 1,1) \quad (17)$$

Onde:

t é a espessura da alma;

h é a largura da alma (altura da parte plana da alma);

k_v é o coeficiente de flambagem local por cisalhamento, dado por:

Para alma sem enrijecedores transversais ou para $a/h > 3$:

$$k_v = 5 \quad (18)$$

Para alma com enrijecedores transversais:

$$k_v = 5 + \frac{5}{(a/h)^2} \quad (19)$$

Onde:

a é a distância entre enrijecedores transversais de alma.

Para seções com duas ou mais almas, cada alma deve ser analisada como um elemento separado resistindo à sua parcela de força cortante.

4.4.1 Força cortante resistente da fôrma com espessura nominal 0,8 mm

Dados:

$$h = 47,25 \text{ mm}$$

$$t = 0,76 \text{ mm}$$

$$k_v = 5$$

$$f_y = 280 \text{ MPa}$$

$$E = 200.000 \text{ MPa}$$

$$\gamma = 1,1$$

$$h/t = 62,17$$

$$1,08(Ek_v/f_y)^{0,5} = 64,54$$

$$h/t \leq 1,08(Ek_v/f_y)^{0,5}$$

Para uma alma:

$$V_{Rd} = 0,6f_yht/\gamma = 5,48 \text{ kN / alma}$$

Para a largura unitária da fôrma:

$$V_{Rd} = 6 \times 5,48 / 0,92 = 35,7 \text{ kN / m}$$

4.4.2 Esforço cortante resistente da fôrma com espessura nominal 1,25 mm

Dados:

$$h = 47,25 \text{ mm}$$

$$t = 1,21 \text{ mm}$$

$$k_v = 5$$

$$f_y = 345 \text{ MPa}$$

$$E = 200.000 \text{ MPa}$$

$$\gamma = 1,1$$

$$h/t = 39,05$$

$$1,08(Ek_v/f_y)^{0,5} = 58,14$$

$$h/t \leq 1,08(Ek_v/f_y)^{0,5}$$

Para uma alma:

$$V_{Rd} = 0,6f_yht/\gamma = 10,76 \text{ kN / alma}$$

Para a largura unitária da fôrma:

$$V_{Rd} = 6 \times 10,76 / 0,92 = 70,2 \text{ kN / m}$$

4.5 Determinação do vão máximo

Os máximos vão são determinados pelos estados-limites, conforme a ABNT NBR 8800:2008, que se caracterizam pela situação a partir da qual a estrutura deixa de atender a uma das finalidades de sua construção.

O estado-limite último (ELU) determina a capacidade de segurança da estrutura, que podem ocorrer por ruptura, colapso, perda de estabilidade ou deterioração pela fadiga.

O estado-limite de serviço (ELS) determina a inadequação de uso da estrutura, que pode ocorrer por deformações, deslocamentos, fissuração e vibrações de forma excessiva.

4.5.1 Combinação última de construção

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j.ef} F_{Qj,k}) \quad (20)$$

Para laje com altura de 110 mm:

$$\gamma_g = 1,3$$

$$\gamma_q = 1,3$$

$$F_G = 2,06 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$F_Q = 1 \text{ kN} / \text{m}^2 \rightarrow$ sobrecarga de construção (valor mínimo recomendado pela ABNT NBR 8800 : 2008)

$$F_d = 1,3 \times 2,06 + 1,3 \times 1 = 4 \text{ kN} / \text{m}^2$$

Para laje com altura de 170 mm:

$$\gamma_g = 1,3$$

$$\gamma_q = 1,3$$

$$F_G = 3,56 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$F_Q = 1 \text{ kN} / \text{m}^2 \rightarrow$ sobrecarga de construção

$$F_d = 1,3 \times 3,56 + 1,3 \times 1 = 5,93 \text{ kN} / \text{m}^2$$

4.5.2 Combinação de serviço (nesse caso considera-se apenas a ação permanente)

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} \tag{21}$$

Para laje com altura de 110 mm:

$$F_G = 2,06 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$$F_{ser} = 2,06 \text{ kN} / \text{m}^2$$

Para laje com altura de 170 mm:

$$F_G = 3,56 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$$F_{ser} = 3,56 \text{ kN} / \text{m}^2$$

4.5.3 Verificação do máximo vão para atender ELU e ELS

- ELU: cálculo do máximo vão para fôrma com espessura nominal de 0,80 mm e altura de 110 mm

$$M_{Sd} = M_{Rd} \qquad M_{Sd} = \frac{F_d L_F^2}{8}$$

$$M_{Rd} = 3,92 \text{ kN.m} / \text{m} \qquad 3,92 = \frac{4L_F^2}{8}$$

$$L_F = 2,8 \text{ m}$$

$$V_{Sd} = V_{Rd} \qquad V_{Sd} = \frac{F_d L_F}{2}$$

$$V_{Rd} = 35,78 \text{ kN} / \text{m} \qquad 35,78 = \frac{4L_F}{2}$$

$$L_F = 17,9 \text{ m}$$

- ELS: cálculo do máximo vão para fôrma com espessura nominal de 0,80 mm e altura de 110 mm

$$\delta = \delta_{m\acute{a}x}$$

$$\delta_{\text{máx}} = \frac{L_F}{180} \text{ ou } 20 \text{ mm (o que for menor)}$$

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{F_{\text{ser}} L_F^4}{EI}$$

$$\frac{L_F}{180} = \frac{5}{384} \frac{F_{\text{ser}} L_F^4}{EI}$$

$$\frac{L_F}{180} = \frac{5}{384} \frac{2,06 L_F^4}{2 \times 10^8 \times 5,64 \times 10^{-7}}$$

$$L_F = 2,85 \text{ m}$$

$$\text{Verificando: } \frac{L_F}{180} = \frac{2850}{180} = 15,8 \text{ mm} \leq 20 \text{ mm}$$

$$\text{Logo, } \boxed{L_{F\text{máx}} = 2,80 \text{ m}}$$

- ELU: cálculo do máximo vão para fôrma com espessura nominal de 0,80 mm e altura de 170 mm

$$M_{Sd} = M_{Rd} \qquad M_{Sd} = \frac{F_d L_F^2}{8}$$

$$M_{Rd} = 3,92 \text{ kN.m / m} \qquad 3,92 = \frac{5,93 L_F^2}{8}$$

$$L_F = 2,30 \text{ m}$$

$$V_{Sd} = V_{Rd} \qquad V_{Sd} = \frac{F_d L_F}{2}$$

$$V_{Rd} = 35,78 \text{ kN} / m$$

$$5,48 = \frac{5,93L_F}{2}$$

$$L_F = 12,06 \text{ m}$$

- ELS: cálculo do máximo vão para fôrma com espessura nominal de 0,80 mm e altura de 170 mm

$$\delta = \delta_{m\acute{a}x}$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{L_F}{180} \text{ ou } 20 \text{ mm} \text{ (o que for menor)}$$

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{F_{ser} L_F^4}{EI}$$

$$\frac{L_F}{180} = \frac{5}{384} \frac{F_{ser} L_F^4}{EI}$$

$$\frac{L_F}{180} = \frac{5}{384} \frac{3,5625L_F^4}{2 \times 10^8 \times 5,64 \times 10^{-7}}$$

$$L_F = 2,38 \text{ m}$$

$$\text{Verificando: } \frac{L_F}{180} = \frac{2380}{180} = 13,2 \text{ mm} \leq 20 \text{ mm}$$

$$\text{Logo, } \boxed{L_{Fm\acute{a}x} = 2,30 \text{ m}}$$

- ELU: cálculo do máximo vão para fôrma com espessura nominal de 1,25 mm e altura de 110 mm

$$M_{Sd} = M_{Rd} \qquad M_{Sd} = \frac{F_d L_F^2}{8}$$

$$M_{Rd} = 8,58 \text{ kN.m / m} \qquad 8,58 = \frac{4L_F^2}{8}$$

$$L_F = 4,14 \text{ m}$$

$$V_{Sd} = V_{Rd} \qquad V_{Sd} = \frac{F_d L_F}{2}$$

$$V_{Rd} = 70,26 \text{ kN / m} \qquad 70,26 = \frac{4L_F}{2}$$

$$L_F = 35,13 \text{ m}$$

- ELS: cálculo do máximo vão para fôrma com espessura nominal de 1,25 mm e altura de 110 mm

$$\delta = \delta_{m\acute{a}x}$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{L_F}{180} \text{ ou } 20 \text{ mm (o que for menor)}$$

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{F_{ser} L_F^4}{EI}$$

$$\frac{L_F}{180} = \frac{5}{384} \frac{F_{ser} L_F^4}{EI}$$

$$\frac{L_F}{180} = \frac{5}{384} \frac{2,06 L_F^4}{2 \times 10^8 \times 8,98 \times 10^{-7}}$$

$$L_F = 3,34 \text{ m}$$

$$\text{Verificando: } \frac{L_F}{180} = \frac{3340}{180} = 18,55 \text{ mm} \leq 20 \text{ mm}$$

$$\text{Logo, } \boxed{L_{Fm\acute{a}x} = 3,34 \text{ m}}$$

- ELU: cálculo do máximo vao para forma com espessura nominal de 1,25 mm e altura de 170 mm

$$M_{Sd} = M_{Rd} \qquad M_{Sd} = \frac{F_d L_F^2}{8}$$

$$M_{Rd} = 8,58 \text{ kN.m / m} \qquad 8,58 = \frac{5,93 L_F^2}{8}$$

$$L_F = 3,4 \text{ m}$$

$$V_{Sd} = V_{Rd} \qquad V_{Sd} = \frac{F_d L_F}{2}$$

$$V_{Rd} = 70,26 \text{ kN / m} \qquad 70,26 = \frac{5,93 L_F}{2}$$

$$L_F = 23,69 \text{ m}$$

- ELS: cálculo do máximo vao para forma com espessura nominal de 1,25 mm e altura de 170 mm

$$\delta = \delta_{m\acute{a}x}$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{L_F}{180} \text{ ou } 20 \text{ mm (o que for menor)}$$

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{F_{ser} L_F^4}{EI}$$

$$\frac{L_F}{180} = \frac{5}{384} \frac{F_{ser} L_F^4}{EI}$$

$$\frac{L_F}{180} = \frac{5}{384} \frac{3,5625 L_F^4}{2 \times 10^8 \times 8,98 \times 10^{-7}}$$

$$L_F = 2,78 \text{ m}$$

$$\text{Verificando: } \frac{L_F}{180} = \frac{2780}{180} = 15,44 \text{ mm} \leq 20 \text{ mm}$$

$$\text{Logo, } \boxed{L_{Fm\acute{a}x} = 2,78 \text{ m}}$$

A Tabela 3.1 resume os resultados encontrados nas verificações.

Tabela 4.1 - Tabela resumo das verificações para a fôrma de aço isolada

Caso	Máximo vão	Estado dominante
Espessura nominal da fôrma: 0,8 mm Altura da laje: 110 mm	2,8 m	E.L.U
Espessura nominal da fôrma: 0,8 mm Altura da laje: 170 mm	2,3 m	E.L.U
Espessura nominal da fôrma: 1,25 mm Altura da laje: 110 mm	3,34 m	E.L.S
Espessura nominal da fôrma: 1,25 mm Altura da laje: 170 mm	2,78m	E.L.S

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para a determinação do modo de falha mais recorrente em lajes mistas, o cisalhamento longitudinal, foi utilizado o método experimental *m-k*. Através da obtenção das constantes *m* e *k* e a introdução das mesmas na equação de dimensionamento ao cisalhamento longitudinal, foi possível a determinar equações para cada espessura dos perfis de aço estudados.

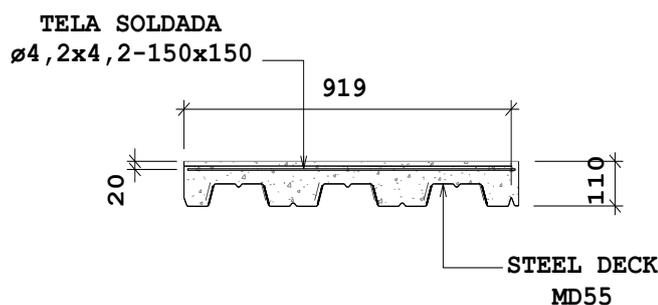
5.1 Características das lajes ensaiadas

O sistema estrutural analisado consistiu de painéis de laje formados pelo perfil MD55, em chapa zincada de espessura nominal $t_n = 0,80$ mm e $t_n = 1,25$ mm e capa de concreto (MALITE, 2014). A Figura 4.1 ilustra a seção transversal típica dos protótipos

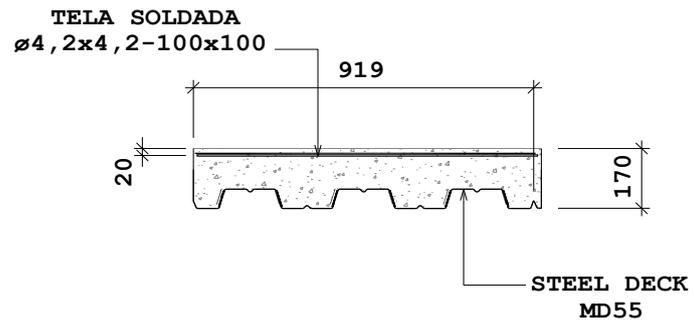
Para a determinação das fórmulas de dimensionamento (método *m-k*) foram ensaiados 14 protótipos, conforme Tabela 4.1. Em todos os protótipos foi inserida uma armadura de retração na capa de concreto, constituída por tela soldada $\phi 4,2 - 100 \times 100$ nas lajes com altura total de 170 mm e $\phi 4,2 - 150 \times 150$ nas lajes com altura total de 110 mm, posicionada a 2 cm da face superior da laje.

Complementando, foram também ensaiados dois protótipos com armadura adicional, constituída por seis barras $\phi 8 - CA50$, sendo um deles com a fôrma de aço usual (com mossas) e o outro com a fôrma de aço lisa (sem mossas).

O concreto utilizado em todos os protótipos foi usinado e o f_{ck} estabelecido foi de 25 MPa.



a) Protótipos com altura total da laje $h_t = 110$ mm



Protótipos com altura total da laje $h_t = 170$ mm
Figura 5.1 – Seção transversal típica dos protótipos

Tabela 5.1 – Descrição dos protótipos

Protótipo	Espessura nominal da chapa t_n (mm)	Altura da laje h_t (mm)	Largura b (mm)	Comprimento L_t (mm)	Vão teórico L_F (mm)	Vão de cisalhamento L_s (mm)
MD55-P1	0,80	110	925	2.000	1.800	450
MD55-P2	0,80	110	930	2.000	1.800	450
MD55-P3	0,80	110	925	2.000	1.800	450
MD55-P4	0,80	170	930	3.800	3.600	900
MD55-P5	0,80	170	930	3.800	3.600	900
MD55-P6	0,80	170	935	3.800	3.600	900
MD55-P7	1,25	110	980	2.000	1.800	450
MD55-P8	1,25	110	983	2.000	1.800	450
MD55-P9	1,25	110	983	2.000	1.800	450
MD55-P10	1,25	110	983	2.000	1.800	450
MD55-P11	1,25	170	983	3.800	3.600	900
MD55-P12	1,25	170	986	3.800	3.600	900
MD55-P13	1,25	170	984	3.800	3.600	900
MD55-P14	1,25	170	988	3.800	3.600	900
Protótipos com armadura adicional (6 barras $\phi 8$ CA-50)						
MD55-P20c (com mossas)	0,80	110	941	2.000	1.800	450
MD55-P20s (sem mossas)	0,80	110	984	2.000	1.800	450

A Figura 4.2 ilustra o perfil de aço Modular MD55. Para efeito de cálculo foi descontada a espessura do revestimento de zinco, considerada igual a 0,04 mm, resultando como espessura do aço $t_F = 0,76$ mm para os protótipos MD55-P1 a MD55-P6, MD55-P20c, MD55-P20s e $t_F = 1,21$ mm para os protótipos MD55-P7 a MD55-P14.

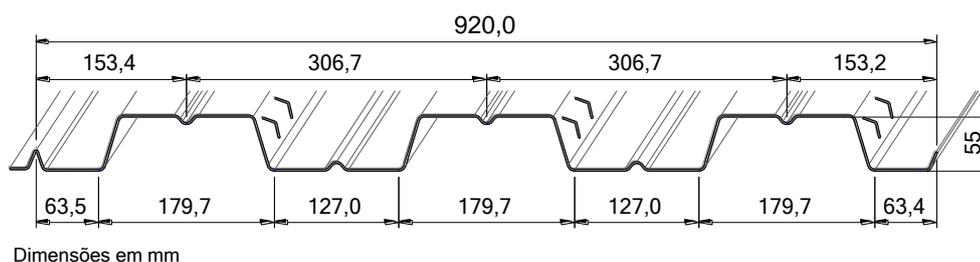


Figura 5.2 – Fôrma de aço Steel Deck Modular MD55

Em fôrmas trapezoidais a ligação mecânica é conferida através das mossas, que são corrugações estampada ao longo do comprimento da fôrma metálica. O padrão de mossas responsável por conferir a ligação mecânica ao sistema de lajes mistas MD55 foi desenvolvido pela empresa e pode ser visto na Figura 4.3.



Figura 5.3 –Vista geral do perfil MD55 com o padrão das mossas em destaque.

5.2 Equipamentos utilizados e instrumentação

Para aplicação do carregamento e medição das forças aplicadas, deslocamentos e deformações específicas foram empregados os seguintes equipamentos e instrumentos de medição:

- atuador servo-hidráulico marca MTS, com capacidade nominal de 500 kN e curso do pistão de 150 mm, para aplicação da força;
- célula de carga e rótula acoplada, com capacidade nominal de 500 kN, para medição da força aplicada;
- transdutores de deslocamento à base de extensômetros, curso de 25 mm, modelo HS25, marca VISHAY, para medição do deslizamento longitudinal relativo nas extremidades;
- transdutor de deslocamento à base de extensômetros, curso de 100 mm, modelo DT-100A, marca KYOWA, para medição de deslocamentos verticais;
- extensômetros elétricos de resistência, modelos KFG-5-120-C1-11 e KFG-10-120-C1-11, marca KYOWA, para medição de deformações específicas no aço e no concreto, respectivamente;

- sistema de aquisição de dados SYSTEM 5000, marca *Vishay*, para aquisição automática das leituras de forças, deslocamentos e deformações específicas.

A instrumentação consistiu de extensômetros elétricos uniaxiais na seção a meio vão, para medição de deformações específicas no aço e no concreto, de transdutor de deslocamento a meio vão para medição da flecha e de transdutores de deslocamento nas extremidades para medição do deslizamento longitudinal relativo entre o concreto e a fôrma de aço. A Figura 4.4 ilustra a posição dos extensômetros na seção a meio vão e as Figuras 4.5 e 4.6 os estensômetros colados na fôrma de aço e no concreto, respectivamente.

Nos protótipos com espessura da fôrma igual a 1,25 mm somente um dos protótipos de cada comprimento foi instrumentado com extensômetros elétricos, o MD55-P7 e o MD55-P11.

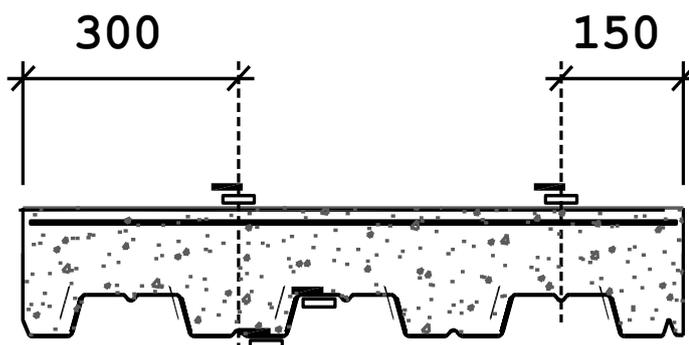


Figura 5.4 – Posição dos extensômetros elétricos na seção a meio vão



Figura 5.5 – Extensômetros na fôrma de aço

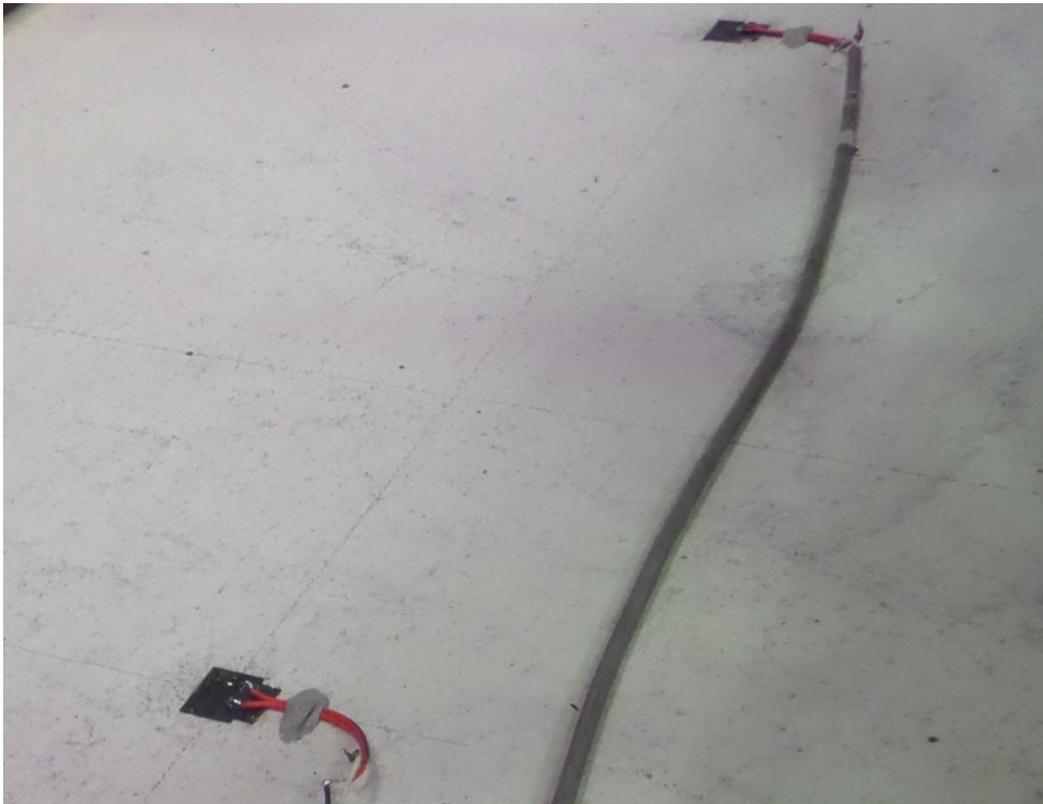


Figura 5.6 - Extensômetro no concreto

5.3 Procedimento de ensaio

O procedimento de ensaio adotado neste trabalho, com as devidas adaptações, é o recomendado pelo Eurocódigo 4¹ para as lajes mistas, cujo esquema geral de ensaio está apresentado na Figura 4.7. Trata-se de ensaios na condição estática simplesmente apoiada, com duas forças concentradas situadas a $L/4$ dos apoios (Figura 4.8).

Todos os ensaios foram conduzidos com controle de deslocamento do pistão do atuador (taxa variando de 0,01 mm/s a 0,05 mm/s). Foi inicialmente aplicada uma força de 4 kN, seguida de descarregamento, para acomodação do protótipo e aparato de ensaio, bem como verificação dos instrumentos de medição. Em seguida, as leituras foram zeradas e foi realizado o ensaio propriamente dito, até o esgotamento da capacidade do sistema. A força, os deslocamentos e as deformações específicas foram registrados automaticamente via sistema de aquisição de dados, a uma taxa de um registro por segundo.

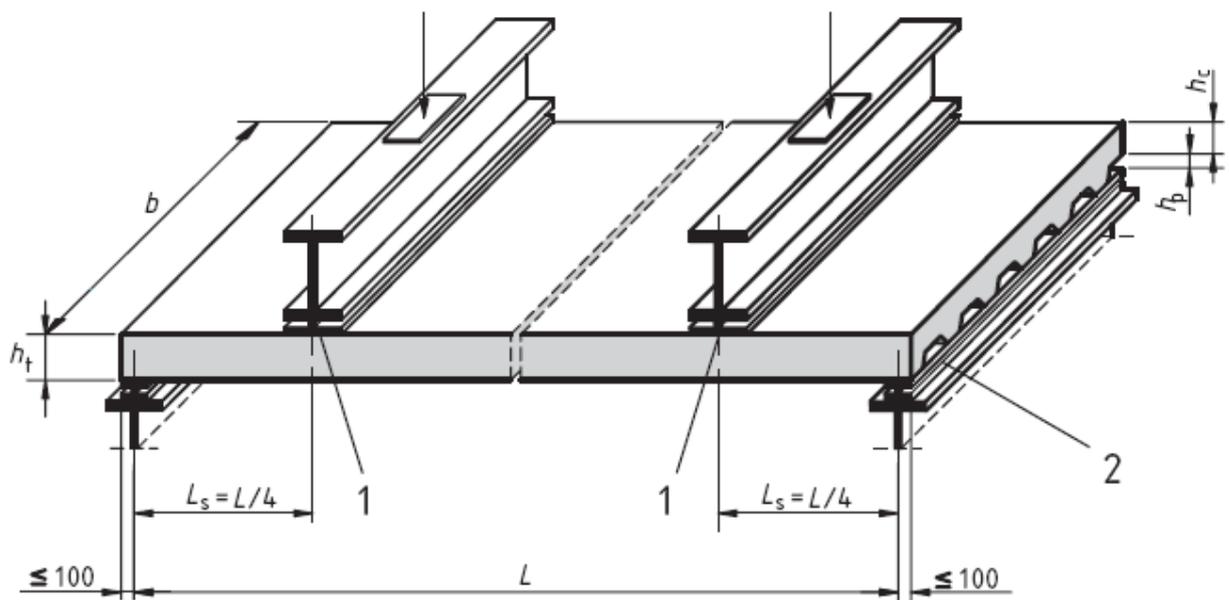
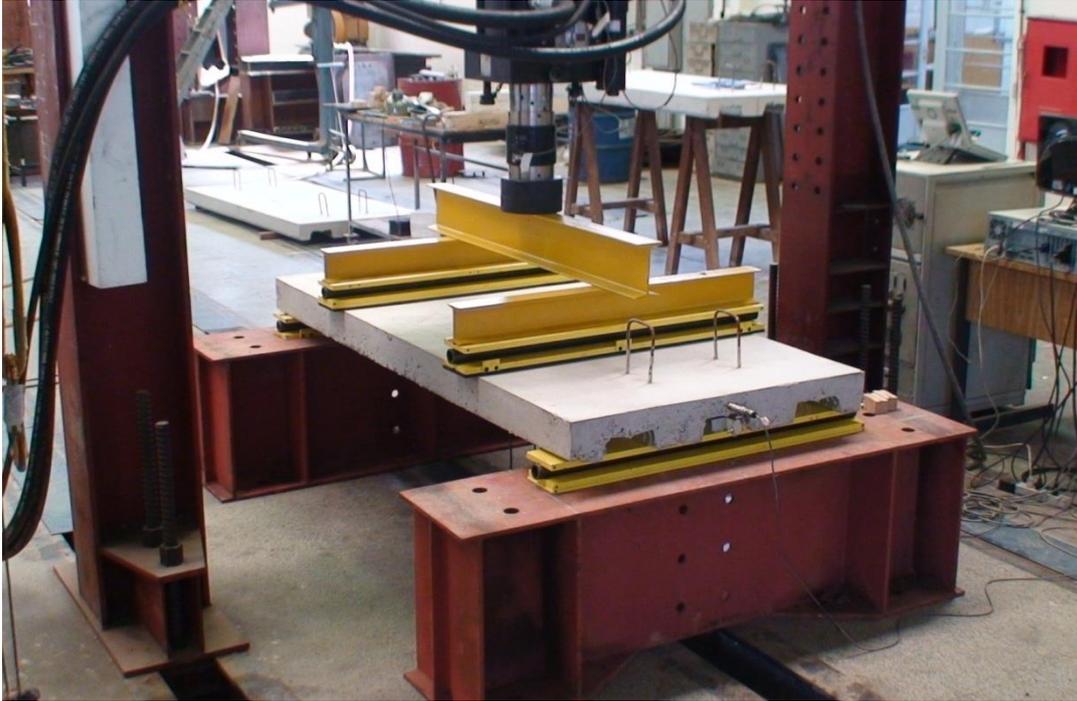
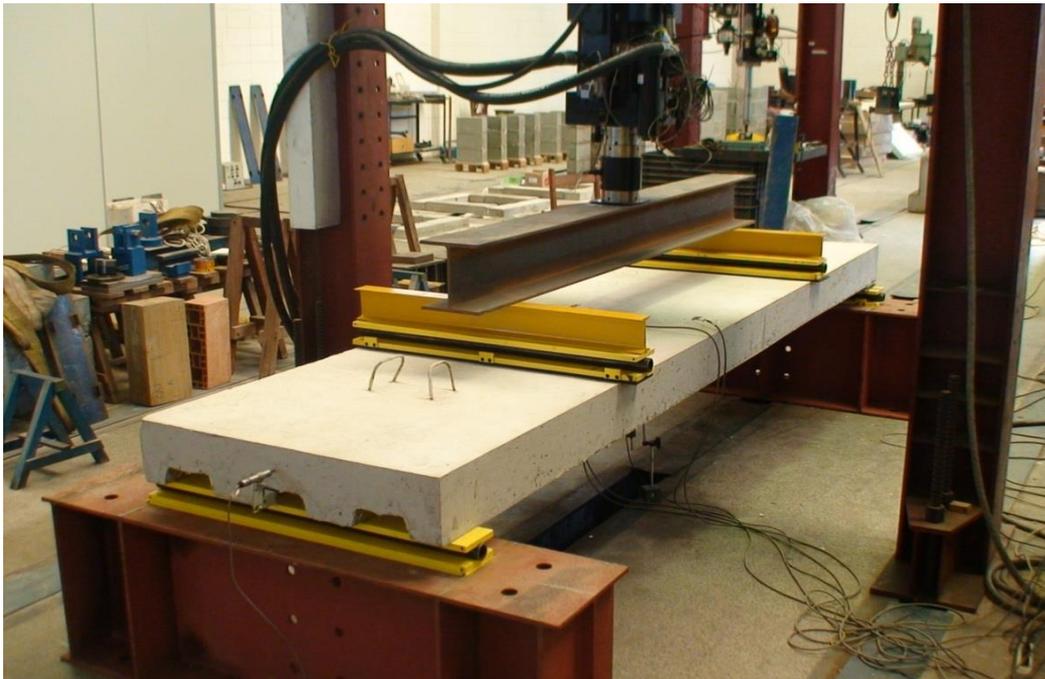


Figura 5.7 – Esquema geral de ensaio de lajes mistas (Eurocódigo 4)

¹ Eurocode 4:2007 – *Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings.*



a) Protótipo com vão teórico de 1.800 mm



b) Protótipo com vão teórico de 3.600 mm

Figura 5.8 – Vista geral do protótipo e aparato de ensaio

6 RESULTADOS DA ANÁLISE

EXPERIMENTAL

6.1 Caracterização dos materiais

Fôrma de aço

As propriedades mecânicas do aço das fôrmas foram determinadas com base em ensaios de tração em três corpos-de-prova extraídos de uma amostra de cada chapa fornecida pela contratante (Tabela 5.1). Conforme informado pela contratante, as chapas são de especificação ABNT NBR 7008 – ZAR 280 e NBR 7008 – ZAR 345 para espessura nominal de 0,80 mm e 1,25 mm, respectivamente.

Tabela 6.1 - Propriedades mecânicas do aço das fôrmas

Chapa zincada de espessura nominal 0,80 mm (ZAR 280)		
Protótipos MD55-P1 a MD55-P6		
Corpo-de-prova	f_y (MPa)	f_u (MPa)
1	314	404
2	314	401
3	305	392
Média	311	399

Chapa zincada de espessura nominal 1,25 mm (ZAR 345)		
Protótipos MD55-P7 a MD55-P14		
Corpo-de-prova	f_y (MPa)	f_u (MPa)
1	375	447
2	369	434
3	360	438
Média	368	440

Chapa zincada de espessura nominal 0,80 mm (ZAR 280)		
Protótipos MD55-P20c e MD55-P20s		
Valores conforme certificado de conformidade do aço	f_y (MPa)	f_u (MPa)
	357	423

Concreto

O concreto, com resistência característica à compressão especificada $f_{ck} = 20$ MPa, foi dosado e misturado em usina, em duas etapas: a primeira referente à concretagem dos protótipos MD55-P1 a MD55-P6 ($t_n = 0,80$ mm) e a segunda referente à concretagem dos protótipos MD55-P7 a MD55-P14 ($t_n = 1,25$ mm) e protótipos com armadura adicional MD55-P20c e MD55-P20s.

As propriedades mecânicas foram determinadas com base em ensaios de compressão em corpos-de-prova cilíndricos. Na Tabela 5.2 são apresentados os valores da resistência à compressão (f_c) e do módulo de elasticidade secante (E_c).

Tabela 6.2 - Propriedades mecânicas do concreto¹

	Corpo-de-prova	f_c (MPa)	E_c (MPa) ²
Protótipos	1	22,7	22.679
MD55-P1 a MD55-P6	2	22,9	22.778
	3	22,9	22.778
	Média	22,8	22.745
Protótipos	1	28,9	25.589
MD55-P7 a MD55-P14	2	25,2	23.895
	MD55-P20c e MD55-P20s	3	28,7
Média		27,6	24.995

¹ Idade do concreto no dia dos ensaios de compressão:

Protótipos MD55-P1 a MD55-P6: 35 dias

Protótipos MD55-P7 a MD55-P14, MD55-P20c e MD55-P20s: 50 dias

² Módulo de elasticidade secante calculado conforme ABNT NBR 6118:2004

$$E_{cs} = \alpha \times 5.600 \sqrt{f_c} \quad (E_c \text{ e } f_c \text{ em MPa), com: } \alpha = 0,85$$

6.2 Ensaio dos protótipos

Os resultados dos ensaios estão sintetizados na Tabela 5.3 e a análise estatística com o cálculo das constantes empíricas m e k , conforme o Eurocódigo 4, apresentados nas Tabelas 5.4 e 5.5.

Tabela 6.3 - Resultados experimentais

Protótipo	F_{des}^a (kN)	F_{max}^b (kN)	F_{total}^c (kN)	F_{max} / F_{des}^d	Comportamento	V_t^e (kN)
MD55-P1	69,9	69,9	75,1	1,0	Frágil	30,04
MD55-P2	64,2	64,2	69,4	1,0	Frágil	27,76
MD55-P3	67,4	67,4	72,6	1,0	Frágil	29,04
MD55-P4	44,3	44,3	59,0	1,0	Frágil	23,60
MD55-P5	44,2	44,2	58,9	1,0	Frágil	23,56
MD55-P6	47,9	47,9	62,6	1,0	Frágil	25,04
MD55-P7	62,3	78,3	83,5	1,26	Dúctil	41,75
MD55-P8	56,9	76,9	82,1	1,35	Dúctil	41,05
MD55-P9	61,6	72,2	77,4	1,17	Dúctil	38,70
MD55-P10	47,9	73,3	78,5	1,53	Dúctil	39,25
MD55-P11	57,7	57,7	72,4	1,00	Frágil	29,00
MD55-P12	64,0	64,0	78,7	1,00	Frágil	31,48
MD55-P13	41,3	50,8	65,5	1,23	Dúctil	32,75
MD55-P14	58,5	67,0	81,7	1,14	Dúctil	40,85
MD55-P20c	60,0	100,0	105,2	1,67	Dúctil	52,60
MD55-P20s	53,1	104,7	109,9	1,97	Dúctil	54,95

^a F_{des} é a força convencional associada ao início de deslizamento relativo entre o aço e o concreto nas extremidades. Corresponde ao deslizamento relativo de 0,1 mm;

^b F_{max} é a máxima força aplicada (*peak load*) ou a força correspondente à flecha $L_F/50$;

^c F_{total} é a máxima força aplicada acrescida do peso próprio do protótipo (P_{prot}) e dos dispositivos de distribuição de força (P_{disp});

Protótipos com $L_t = 2.000$ mm: $P_{prot} + P_{disp} = 3,8 + 1,4 = 5,2$ kN

Protótipos com $L_t = 3.800$ mm: $P_{prot} + P_{disp} = 12,5 + 2,2 = 14,7$ kN

^d O comportamento é considerado dúctil se $F_{max} / F_{des} > 1,1$;

^e V_t é o valor experimental representativo da força cortante, igual a $0,5F_{total}$ se o comportamento for dúctil ou igual a $0,8 (0,5F_{total})$ se o comportamento for frágil.

Tabela 6.4 – Análise estatística e cálculo das constantes empíricas m e k para espessura de 0,80 mm

Unidades: N e mm

Protótipo	V_t (N)	$\frac{A_{F,ef}}{bL_s}$ ($\times 10^3$)	$\frac{V_t}{bd_F}$ (N/mm^2)	Análise estatística de $\frac{V_t}{bd_F}$
MD55-P1	30.040	2,18	0,391	Média: $v_m = 0,376 N/mm^2$ Desvio-padrão: $s = 0,0156 N/mm^2$ ^a Valor característico: $v_k = 0,350 N/mm^2$
MD55-P2	27.760	2,18	0,360	
MD55-P3	29.040	2,18	0,378	
MD55-P4	23.600	1,09	0,177	Média: $v_m = 0,180 N/mm^2$ Desvio-padrão: $s = 0,0058 N/mm^2$ ^a Valor característico: $v_k = 0,171 N/mm^2$
MD55-P5	23.560	1,09	0,177	
MD55-P6	25.040	1,09	0,187	

$t_n = 0,80$ mm

$A_{F,ef} = 912$ mm²

$d_F = 83$ mm para P1, P2 e P3

$d_F = 143$ mm para P4, P5 e P6

^a Valor característico inferior correspondente ao quantil de 5%: $v_k = v_m - 1,65s$

m = 164 N/mm²

$$V_{\ell,Rd} = \frac{bd_F}{\gamma_{sl}} \left[\left(\frac{164A_{F,ef}}{bL_s} \right) - 0,008 \right]$$

k = - 0,008 N/mm²

$$\gamma_{sl} = 1,25$$

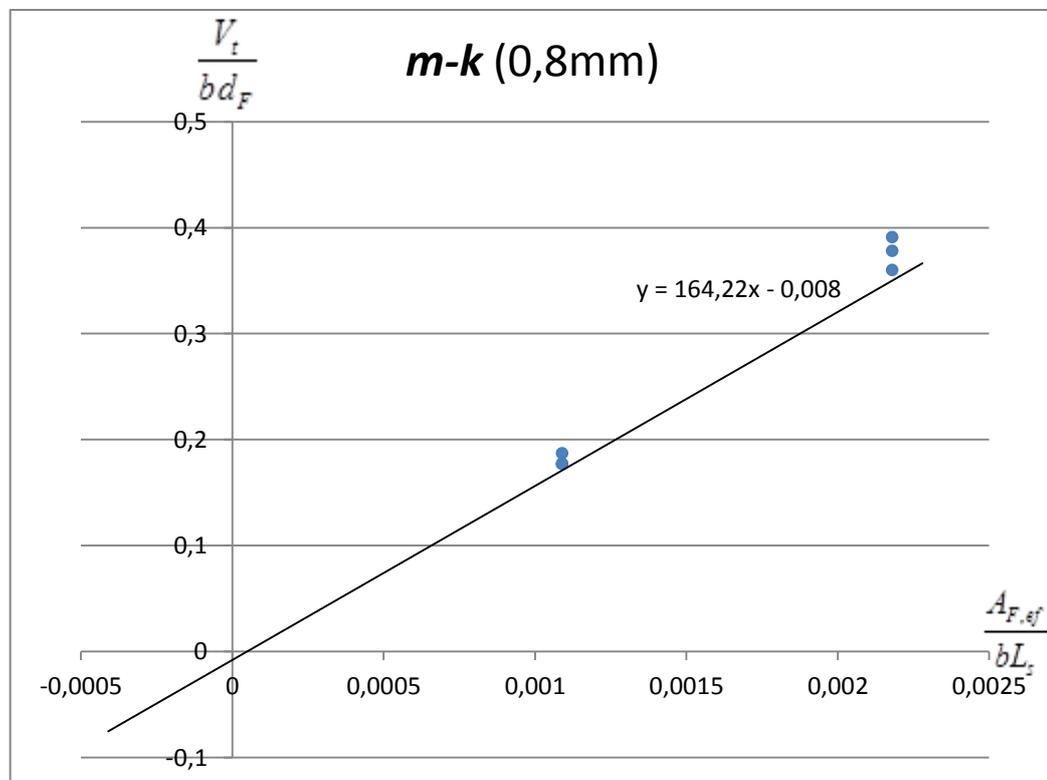


Tabela 6.5 – Análise estatística e cálculo das constantes empíricas m e k para espessura de 1,25 mm
Unidades: N e mm

Protótipo	V_t (N)	$\frac{A_{F,ef}}{bL_s}$ ($\times 10^3$)	$\frac{V_t}{bd_F}$ (N/mm ²)	Análise estatística de $\frac{V_t}{bd_F}$
MD55-P7	41.750	3,29	0,512	Média: $v_m = 0,493$ N/mm ² Desvio-padrão: $s = 0,018$ N/mm ² ^a Valor característico: $v_k = 0,463$ N/mm ²
MD55-P8	41.050	3,29	0,504	
MD55-P9	38.700	3,29	0,475	
MD55-P10	39.250	3,29	0,482	
MD55-P11	29.000	1,64	0,206	Média: $v_m = 0,221$ N/mm ² Desvio-padrão: $s = 0,014$ N/mm ² ^a Valor característico: $v_k = 0,198$ N/mm ²
MD55-P12	31.480	1,64	0,223	
MD55-P13	32.750	1,64	0,233	
^b MD55-P14	40.850	1,64	0,290	

$t_n = 1,25$ mm

$A_{F,ef} = 1.452$ mm²

$d_F = 83$ mm para P7 a P10

$d_F = 143$ mm para P11 a P14

^a Valor característico inferior correspondente ao quantil de 5%: $v_k = v_m - 1,65s$

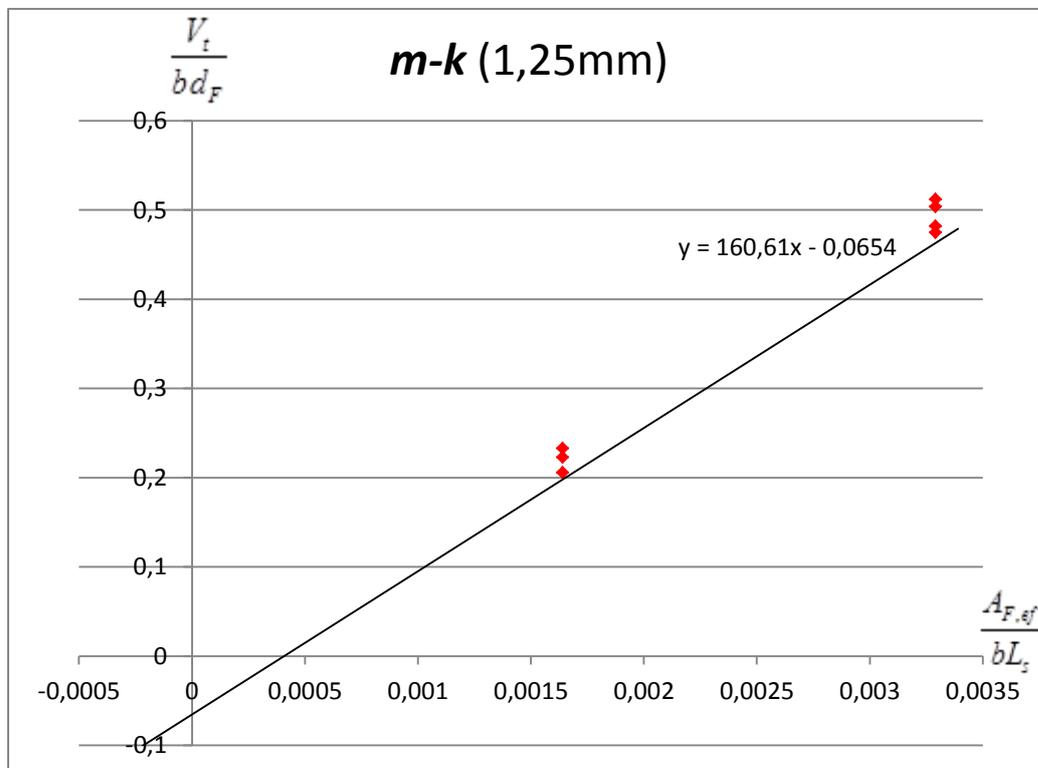
^b Desconsiderado na análise, pois apresenta desvio em relação à média superior a 15%

$m = 161$ N/mm²

$$V_{\ell,Rd} = \frac{bd_F}{\gamma_{s\ell}} \left[\left(\frac{161A_{F,ef}}{bL_s} \right) - 0,066 \right]$$

$k = - 0,066$ N/mm²

$$\gamma_{s\ell} = 1,25$$



No anexo A é apresentado um relatório fotográfico e no anexo B estão apresentadas as curvas força x deslocamento a meio vão (flecha), força x deslizamento relativo e força x deformação específica de todos os protótipos.

Em todos os protótipos ocorreu um brusco deslizamento relativo entre o concreto e a fôrma de aço em uma das extremidades, precedido por fissuras iniciadas na região de aplicação de força (do lado em que ocorreu o deslizamento). Ao ocorrer o deslizamento relativo (Figura 5.1), a força aplicada pelo atuador apresentou queda significativa e as fissuras foram prolongadas rapidamente até a posição da tela soldada (Figura 5.2). Nos protótipos com armadura adicional, a evolução das fissuras ocorreu mais lentamente. Foi, ainda, possível observar a ocorrência de ondulações nas mesas superiores do perfil da fôrma metálica após o termino do ensaio (formação do mecanismo plástico) (Figura 5.3).

Todos os protótipos com fôrma de espessura nominal 0,80 mm (sem armadura adicional) apresentaram comportamento frágil, uma vez que não mais foi possível atingir o nível de força aplicada antes do deslizamento. Com armadura adicional, o comportamento foi dúctil.

Dos protótipos com fôrma de espessura nominal 1,25 mm, apenas dois apresentaram comportamento frágil (MD55-P11 e MD55-P12). Os demais apresentaram comportamento dúctil, uma vez que após a ocorrência do deslizamento relativo em uma das extremidades, a estrutura continuou a suportar acréscimos de carregamento, atingindo força máxima superior à força de deslizamento ($1,14 \leq F_{\max} / F_{\text{des}} \leq 1,53$).

Para exemplificar, as Figuras 5.4 e 5.5 mostram a curva força x flecha dos protótipos MD55-P2 e MD55-P8, os quais apresentaram comportamento frágil e dúctil, respectivamente.

Nas Figuras 5.6 e 5.7 são apresentadas, em conjunto, as curvas força x flecha dos protótipos com fôrma de espessura 0,80 mm e 1,25 mm.

A Figura 5.8 e 5.9 permite comparar a resposta entre os dois protótipos com armadura, sem e com mossa e dois protótipos de mesmas dimensões, sem e com armadura adicional, respectivamente. Os resultados da Figura 5.8 mostram que com a presença de armadura adicional os mecanismos das mossa não contribuíram de forma significativa no conjunto, porém não é possível descartar a contribuição desse mecanismo. Para melhor caracterizar esse sistema seriam necessários um numero

maior de amostras, além de instrumentação da armadura para melhor definir a solitação da mesma e conseqüentemente a participação da fôrma.



Figura 6.1 – Deslizamento relativo entre o concreto e o aço na extremidade



Figura 6.2 – Aspecto da fissura na região da força aplicada, após o deslizamento



Figura 6.3 – Ondulações nas mesas superiores da fôrma metálica.

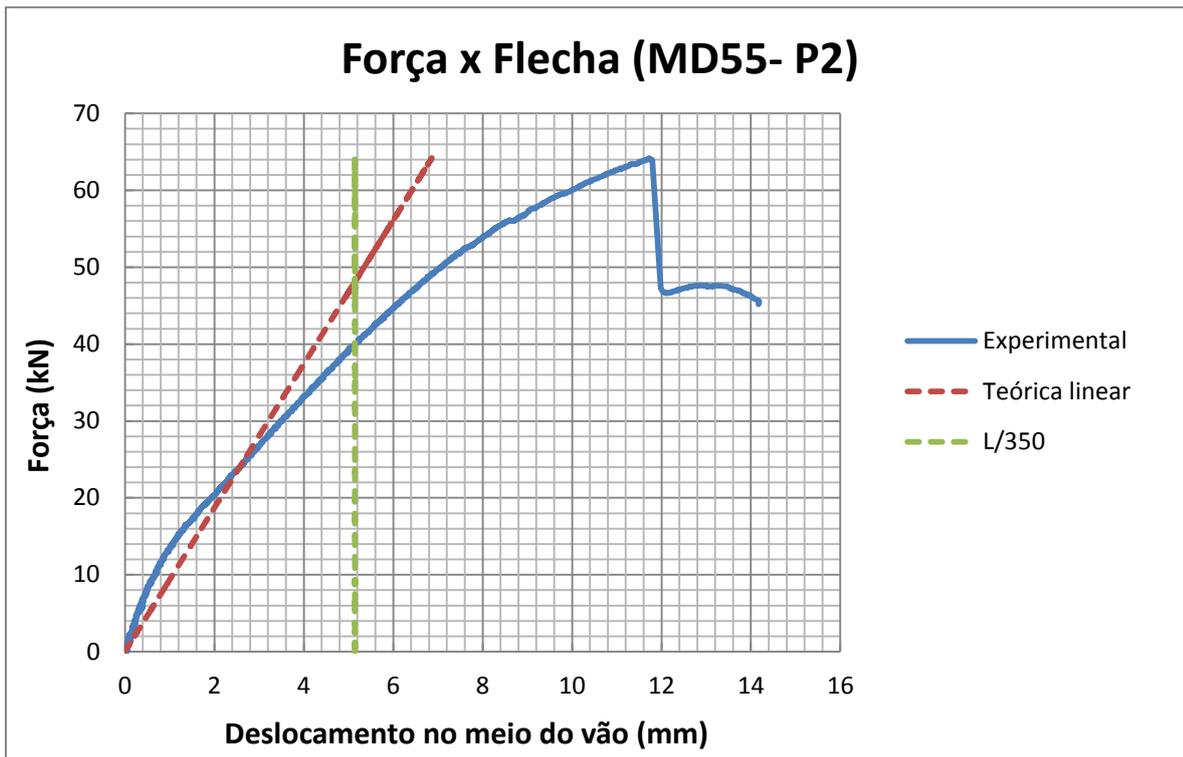


Figura 6.4 – Curva força x flecha do protótipo MD55-P2 (comportamento frágil)

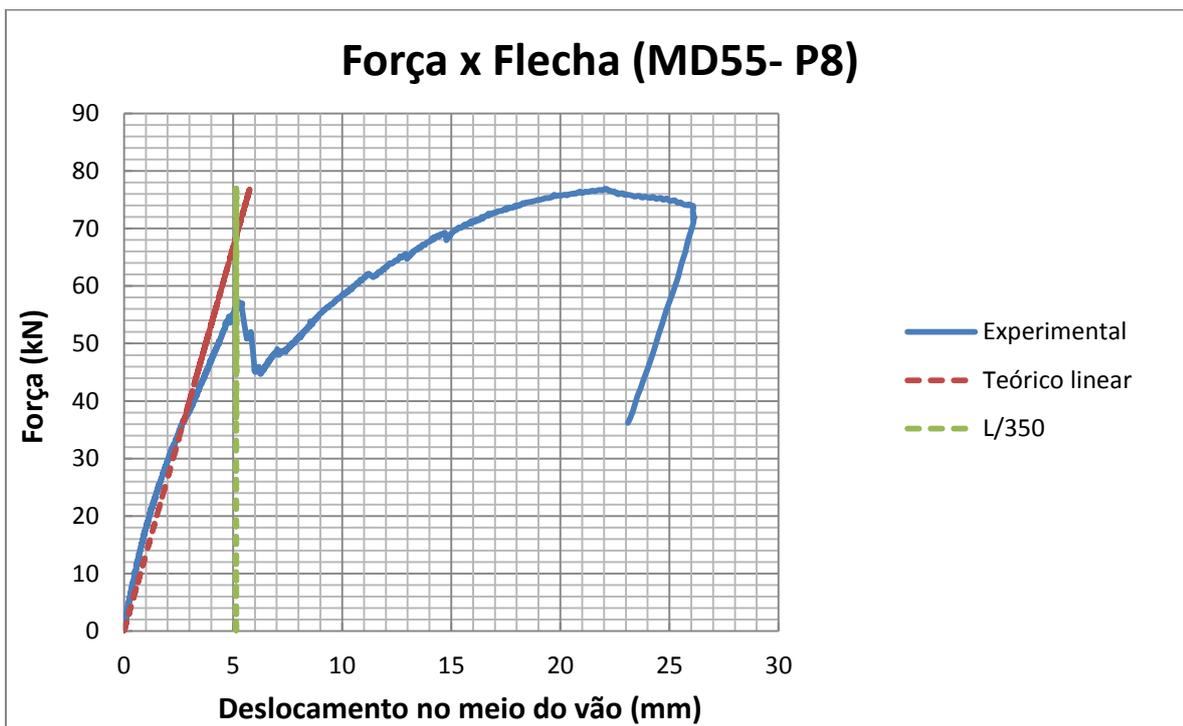


Figura 6.5 – Curva força x flecha do protótipo MD55-P8 (comportamento dúctil)

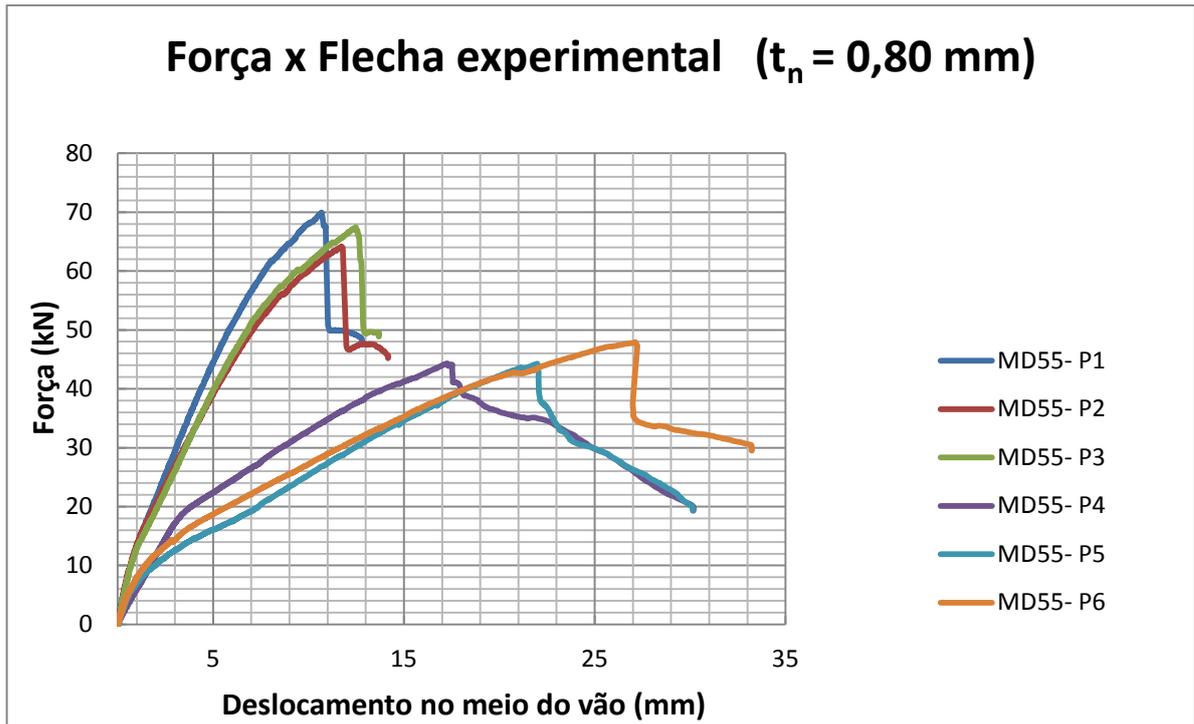


Figura 6.6 – Resultados dos ensaios dos protótipos com fôrma de espessura 0,80 mm
Força x deslocamento a meio vão (flecha)

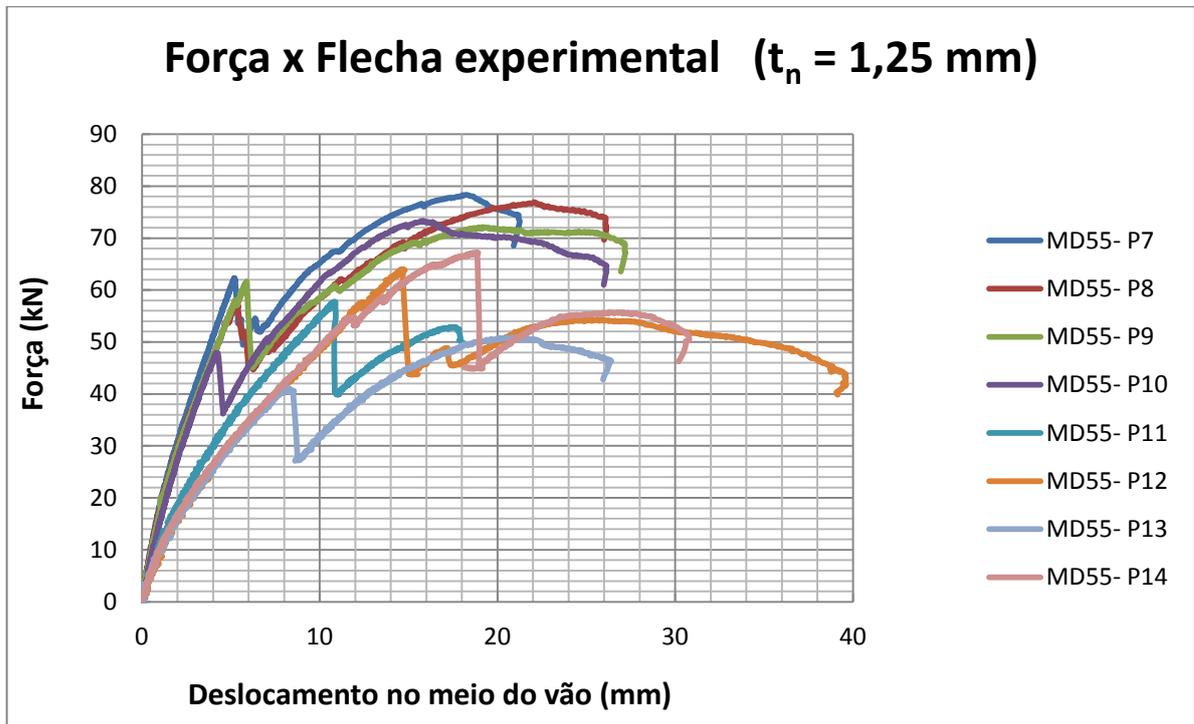


Figura 6.7 – Resultados dos ensaios dos protótipos com fôrma de espessura 1,25 mm
Força x deslocamento a meio vão (flecha)

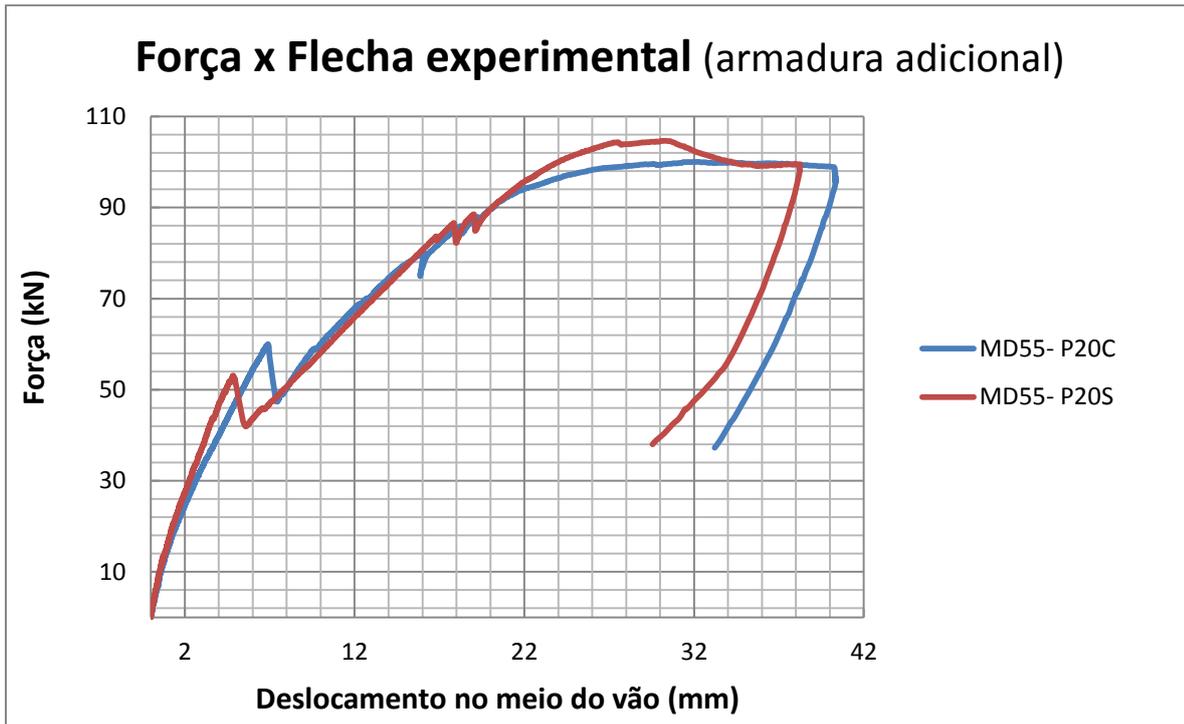


Figura 6.8 – Resultados dos ensaios dos protótipos com armadura adicional
Força x deslocamento a meio vão (flecha)

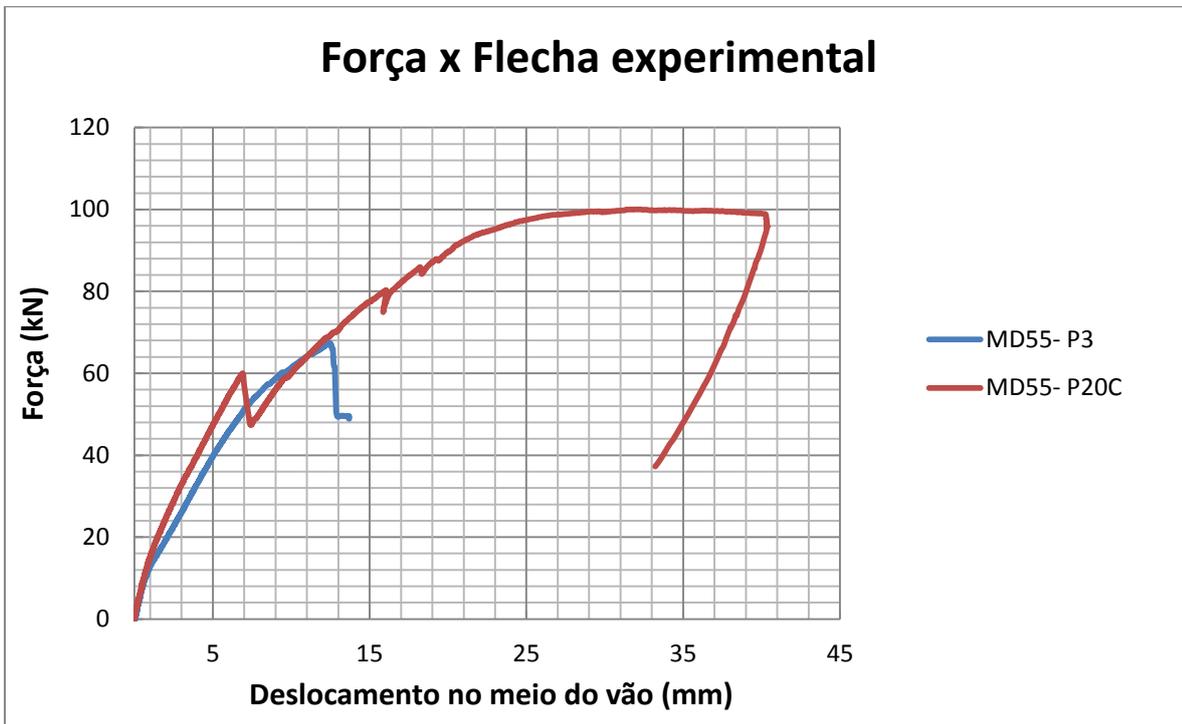


Figura 6.9 – Protótipos de mesmas dimensões sem e com armadura adicional
Força x deslocamento a meio vão (flecha)

Com base no método semiempírico $m-k$, cujos resultados da análise estão apresentados nas Tabela 5.4 e 5.5 resultam as expressões (22) e (23) para o dimensionamento das lajes mistas com base no cisalhamento longitudinal:

- lajes com fôrma de aço de espessura nominal $t_F = 0,80$ mm:

$$m = 164 \quad k = -0,008$$

$$V_{l,Rd} = \frac{bd_F}{\gamma_{sl}} \left[\frac{164A_{F,ef}}{bL_s} - 0,008 \right] \quad \gamma_{sl} = 1,25 \quad (22)$$

- lajes com fôrma de aço de espessura nominal $t_F = 1,25$ mm:

$$m = 161 \quad k = -0,066$$

$$V_{l,Rd} = \frac{bd_F}{\gamma_{sl}} \left[\frac{161A_{F,ef}}{bL_s} - 0,066 \right] \quad \gamma_{sl} = 1,25 \quad (23)$$

Na Tabela 5.6 é apresentada uma comparação entre os valores experimentais da força cortante (V_t) e os valores teóricos calculados pelas expressões (22) e (23) em termos de valores característicos, isto é, desconsiderando o coeficiente de ponderação da resistência γ_{sl} .

Na Tabela 5.7 é apresentada uma comparação entre o máximo momento fletor solicitante (M_{exp}) e o momento fletor resistente admitindo interação completa (M_R). Observa-se que, em todos os protótipos, M_{exp} não atingiu M_R uma vez que o estado-limite último dominante foi o cisalhamento longitudinal.

Tabela 6.6 – Análise comparativa entre os resultados experimentais e teóricos da força cortante calculados com base nas expressões obtidas via *método m-k*

Protótipo	Experimental	Teórico (<i>método m-k</i>)	Experimental / Teórico
	V_t (kN)	$V_{\ell,Rk}$ (kN)	
MD55-P1	30,04	26,97	1,11
MD55-P2	27,76	26,97	1,03
MD55-P3	29,04	26,97	1,08
MD55-P4	23,60	22,70	1,04
MD55-P5	23,56	22,70	1,04
MD55-P6	25,04	22,70	1,10
MD55-P7	41,75	37,74	1,11
MD55-P8	41,05	37,74	1,09
MD55-P9	38,70	37,74	1,03
MD55-P10	39,25	37,74	1,04
MD55-P11	29,00	27,85	1,04
MD55-P12	31,48	27,85	1,13
MD55-P13	32,75	27,85	1,18
^a MD55-P14	40,85	27,85	1,47

^a Desconsiderado no cálculo dos parâmetros *m* e *k*, pois apresenta desvio em relação à média superior a 15%

Tabela 6.7 – Momento fletor solicitante *versus* momento fletor resistente

Protótipo	M_{exp} (kN.cm) ^a	M_R (kN.cm) ^b	M_{exp} / M_R	
MD55-P1	1.690	2.167	0,78	
MD55-P2	1.561		0,72	
MD55-P3	1.633		0,75	
MD55-P4	2.655		0,69	
MD55-P5	2.651		3.871	0,69
MD55-P6	2.817		0,73	
MD55-P7	1.879	4.182	0,45	
MD55-P8	1.847		0,44	
MD55-P9	1.741		0,42	
MD55-P10	1.766		0,42	
MD55-P11	3.258		0,43	
MD55-P12	3.541		7.650	0,46
MD55-P13	2.947	0,39		
MD55-P14	3.676	0,48		
MD55-P20c	2.367	3.508 ^c	0,67	
MD55-P20s	2.473	3.527 ^c	0,70	

^a M_{exp} é o máximo valor do momento fletor solicitante, dado por $0,5F_{total} L_s$

^b M_R é o momento fletor resistente correspondente à interação completa, conforme eq:

$$M_{Rd} = A_{F,ef} f_{yFd} (d_F - 0,5a) + A_{st} f_{sd} (d_s - 0,5a) \cdot$$

^c Calculado com o valor nominal da resistência ao escoamento da armadura, $f_{ys} = 500$ MPa.

7 CONCLUSÕES

Análise teórica avaliou o comportamento da laje mista pelo ELU e ELS, determinado o máximo vão que perfil de aço pode ter durante sua fase construtiva. Pela análise experimental obteve-se a equação de dimensionamento pelo cisalhamento longitudinal, através do método *m-k*. O estudo realizado com a fôrma de aço MD55, estabeleceu os critérios para o dimensionamento e consequentemente a inserção do produto no mercado.

7.1 Conclusões da análise teórica da fôrma isolada

As especificações das fôrmas de aço MD55 com espessuras nominais de 0,8 mm e 1,25 mm atendem aos critérios avaliados na fase construtiva. A determinação do máximo vão para a fôrma de 0,8 mm restringiu-se pelo Estado Limite Último nas duas alturas verificadas das lajes, 110 mm e 170 mm. Para a fôrma com maior espessura, 1,25 mm, a restrição ficou associada, nas duas alturas, ao Estado Limite de Serviço.

A única restrição do uso da fôrma de aço na fase construtiva é o máximo vão livre entre apoios, que deve ser respeitado, garantindo a segurança e o cumprimento das normas estabelecidas. No caso biapoiado dos perfis estudados, as restrições dos vãos estão resumidas na Tabela 6.1.

Tabela 7.1 - Máximos vãos para as fôrmas isoladas

Especificações	Máximo vão
Espessura nominal da fôrma: 0,8 mm Altura da laje: 110 mm	2,8 m
Espessura nominal da fôrma: 0,8 mm Altura da laje: 170 mm	2,3 m
Espessura nominal da fôrma: 1,25 mm Altura da laje: 110 mm	3,34 m
Espessura nominal da fôrma: 1,25 mm Altura da laje: 170 mm	2,78m

7.2 Conclusões da análise experimental

Em todos os protótipos ocorreu um brusco deslizamento relativo entre o concreto e a fôrma de aço em uma das extremidades, precedido por fissuras iniciadas na região de aplicação de força (do lado em que foi observado o deslizamento). Ao ocorrer o deslizamento relativo (Figura 5.1), a força aplicada pelo atuador apresentou queda significativa e as fissuras foram prolongadas rapidamente até a posição da tela soldada (Figura 5.2). Nos protótipos com armadura adicional, a evolução das fissuras ocorreu mais lentamente.

Todos os protótipos com fôrma de espessura nominal 0,80 mm (sem armadura adicional) apresentaram comportamento frágil, uma vez que não mais foi possível atingir o nível de força aplicada antes do deslizamento. Com armadura adicional, o comportamento foi dúctil.

Dos protótipos com fôrma de espessura nominal 1,25 mm, apenas dois apresentaram comportamento frágil (MD55-P11 e MD55-P12). Os demais apresentaram comportamento dúctil, uma vez que após a ocorrência do deslizamento relativo em uma das extremidades, a estrutura continuou a suportar acréscimos de carregamento, atingindo força máxima superior à força de deslizamento ($1,14 \leq F_{\max} / F_{\text{des}} \leq 1,53$).

Com base no *método semiempírico m-k* foram determinadas expressões para o dimensionamento das lajes mistas com base no cisalhamento longitudinal, as quais são reproduzidas a seguir:

- lajes com fôrma de aço de espessura nominal $t_F = 0,80$ mm:

$$V_{\ell,Rd} = \frac{bd_F}{\gamma_{sl}} \left[\frac{164A_{F,ef}}{bL_s} - 0,008 \right] \quad \begin{aligned} \gamma_{sl} &= 1,25 \\ m &= 164 \\ k &= -0,008 \end{aligned}$$

- lajes com fôrma de aço de espessura nominal $t_F = 1,25$ mm:

$$V_{\ell,Rd} = \frac{bd_F}{\gamma_{sl}} \left[\frac{161A_{F,ef}}{bL_s} - 0,066 \right]$$
$$\gamma_{sl} = 1,25$$
$$m = 161$$
$$k = -0,066$$

A presença da armadura adicional propiciou um comportamento dúctil, aumentando a capacidade do sistema em torno de 50%. Uma vez que as barras da armadura não foram instrumentadas, não foi possível fazer uma análise mais detalhada da resposta estrutural do conjunto. Esse tema poderá ser melhor explorado em trabalhos futuros, variando-se as dimensões dos protótipos bem como a taxa de armadura adicional.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, G. S. **Análise do Comportamento e da Resistência de um Sistema de Lajes Mistas pelo Método da Interação Parcial**. 2008. 116p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 5739**: Concreto. Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7008**: Chapas e bobinas de aço revestidas com zinco ou liga zinco-ferro pelo processo contínuo de imersão a quente Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

BAIÃO FILHO, O. T. **Estudo comparativo de respostas estruturais antes da cura do concreto de fôrmas metálicas incorporadas às lajes**. 2003. 150 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

BELTRÃO, A. J. N. **Comportamento Estrutural de Lajes Mistas com Corrugações de Alma de Perfis de chapa Dobrada**. 2003. 125p. Dissertação de

Mestrado - Engenharia de Estruturas, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2007.

BRENDOLAN, G. **Análise do Comportamento e da Resistência de um Sistema de Lajes com Fôrma de Aço Incorporada**. 2007. 149 p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

BRITISH STANDARD. **Structural Use of Steelwork in Building, Part 4, Code of Practice for Design Floor with Profiled Steel Sheeting**, British Standards Institution, 1994.

CAMPOS, P. C. **Efeito da Continuidade no Comportamento e na Resistência de Lajes Mistas com Fôrma de Aço Incorporada**. 2001. 136 p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2001.

CANADIAN SHEET STEEL BUILDING. **Criteria for the Testing of Composite**, CSSBI S2, Willodale, Ontario, Canada, revised October, 2008.

CARVALHO, F. S. **Fôrma Metálica Profunda, com Alma Corrugada, para Incorporação a Lajes de Concreto – Comportamento na Fase Antes da Cura do Concreto**. 2005. 113p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

CRISNEL, M. MARIMON, F. **A new simplified method for the design of composite slabs**. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol 60, p. 481-491, 2004.

DANIELS, B. J. CRISNEL, M. **Composite Slab Behaviour and Strength Analysis**. *Journal of Structural Engineering - ASCE*, January. Part I: Calculation Procedure. vol. 119, no. 1, p. 16-35, 1993.

EUROCODE 4. **Design of Composite Steel and Structures**. European Prestandard, 2005.

GOMES, L. C. **Estudo do Sistema de Lajes Mistas com Fôrma de Aço Incorporado empregando Concreto Estrutural Leve**. 2001. 165 p. Dissertação do Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

HEDAOO N. A. GUPTA, L. M. RONGHE, G. N. **Design of composite slabs with profiled steel decking: a comparison between experimental and analytical studies**. International Journal of Advanced Structural Engineering. 15 p. 2012.

JOHNSON, R. P. **Composite structures of Steel and Concrete - Volume 1: beams, slabs, columns, and frames for buildings**. 2. ed. Blackwell Scientific Publications, 1994.

LAKSHMIKANDHAN, K. N. SIVAKUMAR, P. RAVICHANDRAN, R. JAYACHANDRAN, S. A. **Investigations on Efficiently Interfaced Steel Concrete Composite Deck Slabs**. Journal of Structures. vol 2013, 10 p, 2013.

Li, Z., Schafer, B.W (2010) “ Buckling analysis of cold-formed steel members with general boundary conditions using **CUFSM**: conventional and constrained finite strip methods.” Proceedings of the 20th Int;1. Spec. Conf. on Cold- Formed Steel Structures, St. Louis, MO. November, 2010.

MALITE, M. (2014). **Análise experimental de lajes com fôrma de aço incorporada – Steel Deck Modular MD55**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – USP. Relatório Técnico.

MELO, C. B. F. de. **Análise do comportamento e da resistência do sistema de lajes mistas**. 1999. 142p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.

METFORM. **Catálogo Técnico**. Disponível em:< <http://www.metform.com.br/telha-forma-catalogo-tecnico.php> >. Acesso em: 30 Set. 2013.

PATRICK, M. **Design of continuous composite slabs – The issue of ductility**. In: Steel Construction, Journal of the Australian Institute of Steel Construction, Vol. 23, No. 3, p. 2-10, August 1989.

QUEIROZ, G. PIMENTA, R. J. DA MATA, L. A. C. **Elementos das estruturas mistas aço-concreto**. Belo Horizonte: Editora O Lutador, 336p. il, 2001.

QUEIROZ, G. PIMENTA, R. J. MARTINS, A G. Manual de construção em aço – Estruturas Mistas- Vol. 1. 2. ed. Instituto Aço Brasil. Centro Brasileiro Da Construção Em Aço. Rio de Janeiro, 2012.

RODRIGUES F. C. & LAVALL A. C. C. **Estudo do comportamento estrutural do sistema de laje mista DECK 60** – USIMINAS. Relatório técnico, 2005.

SCHUSTER, R.M. **Strength and Behavior of Cold-Rolled Steel-Deck Reinforced Concrete Floor Slabs**. 1970. Phd Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa, 1970.

SILVA, H. J. F. **Análise do Sistema de Laje Mista com Fôrma de Aço Incorporada aplicado a Estruturas Prediais em Concreto Armado**. 1999. 139 p. Dissertação do Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.

SOUZA NETO, A.S. **Análise do Comportamento e da Resistência de um Sistema de Lajes Mistas com ancoragem de extremidade com considerações sobre a fôrma de aço isolada e o atrito nos apoios**. 2001. 211 p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

TAKEY, T. H. **Sistema de Laje Mista para Edificações com uso de Perfis de Chapa Metálicas**. 2001. 208p. Dissertação de Mestrado - Engenharia de Estruturas, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2001.

TUPER S.A. **Lajes nervuradas. Manual do produto.** [2013?], São Bento do Sul. Disponível em:<fttp:// <http://www.tuper.com.br/lajes/>>. Acesso em: 13 abr. 2015.

VIANNA, J. C. **Sistema de Laje Mista para Edificações Residenciais com o uso de Perfis Embossados de Chapa Dobrada.** 2005. 189p. Dissertação de Mestrado - Engenharia de Estruturas, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2005.

VIEIRA, D. J. **Estudo Teórico- Experimental do Comportamento de Lajes Mistas com Perfis Incorporados de Aço.** 2003. 122p. Dissertação de Mestrado - Engenharia de Estruturas, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2003.

Yu, WEI-Wen. **Cold formed steel design.** 3. ed. John Willey & Sons, Inc, 2000.

ANEXO A
FOTOGRAFIAS



Foto A.1 – Protótipos preparados para concretagem



Foto A.2 – Concretagem dos protótipos

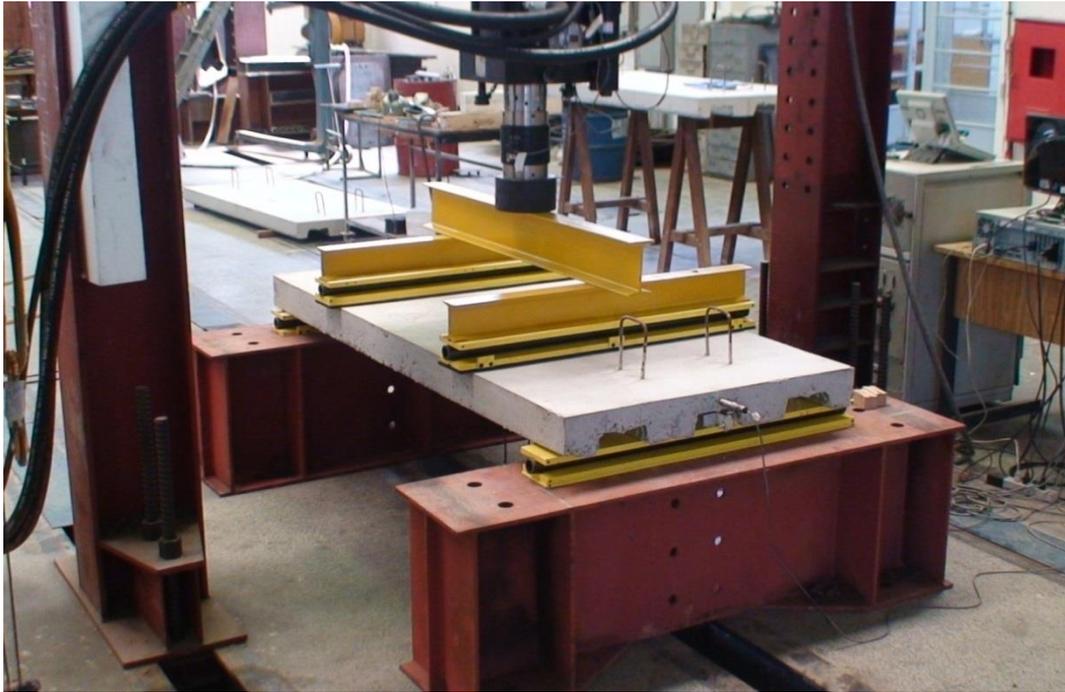


Foto A.3 – Vista geral do ensaio: protótipo com vão teórico de 1.800 mm

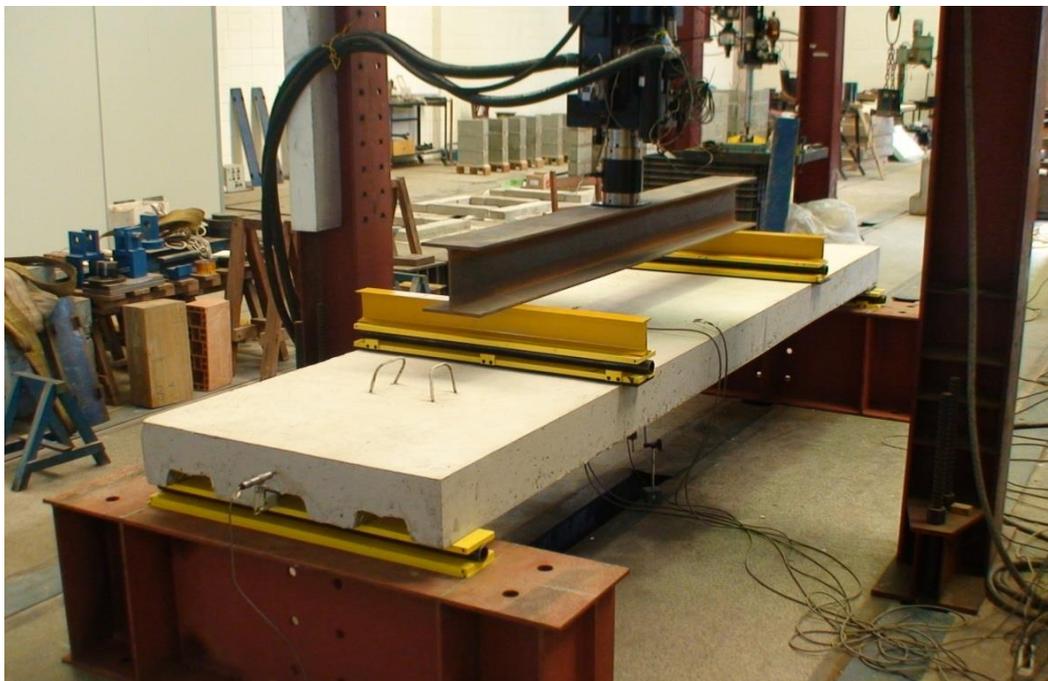


Foto A.4 – Vista geral do ensaio: protótipo com vão teórico de 3.600 mm

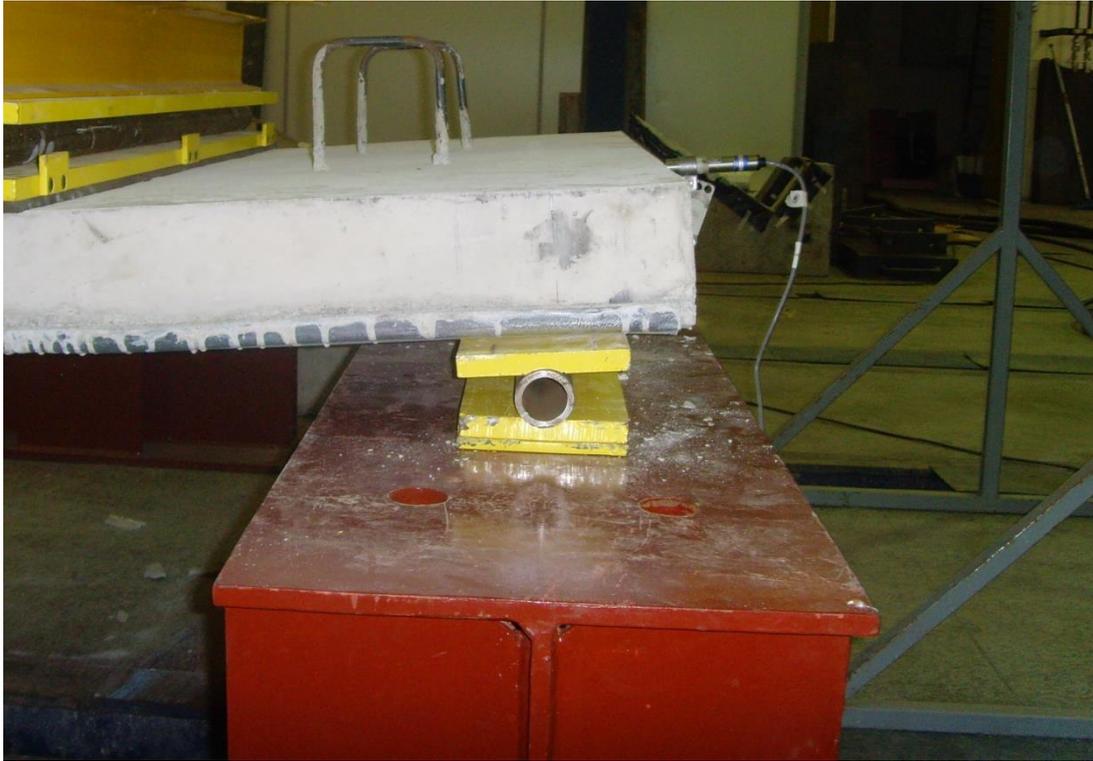


Foto A.5 – Detalhe do apoio fixo



Foto A.6 – Detalhe do apoio móvel



Foto A.7 – Transdutor para medição do deslizamento relativo na extremidade



Foto A.8 – Transdutor para medição do deslocamento vertical a meio vão (flecha)

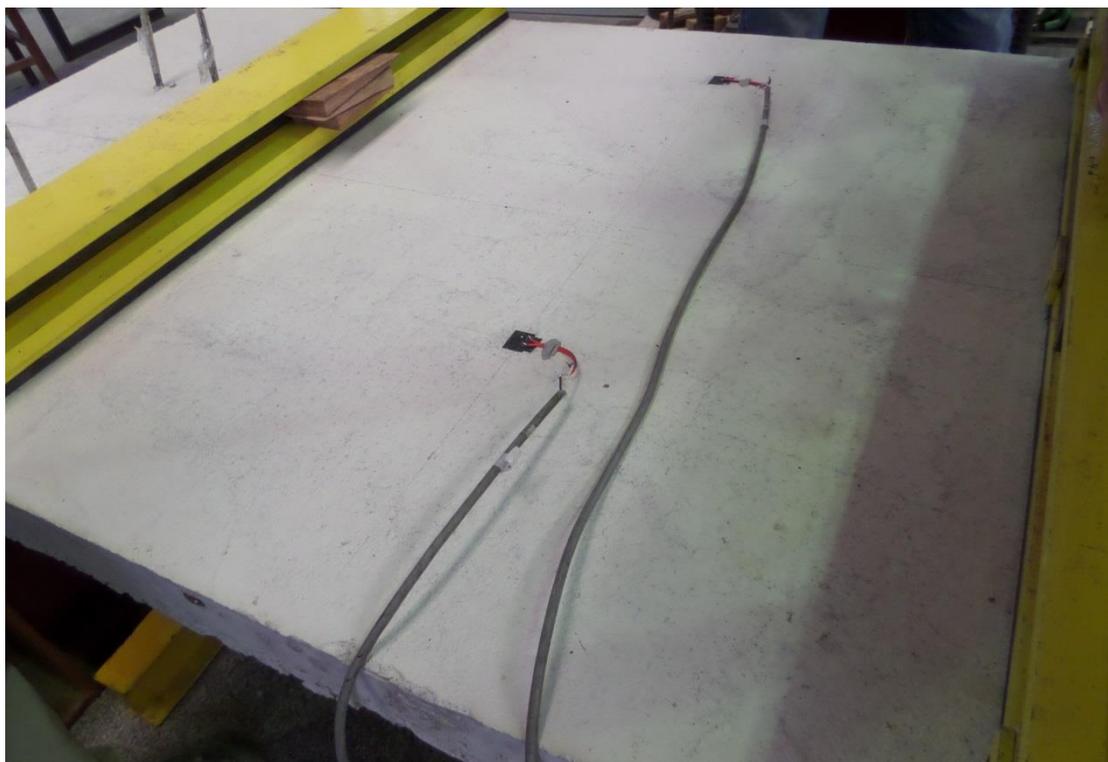


Foto A.9 – Extensômetros elétricos na face superior da laje

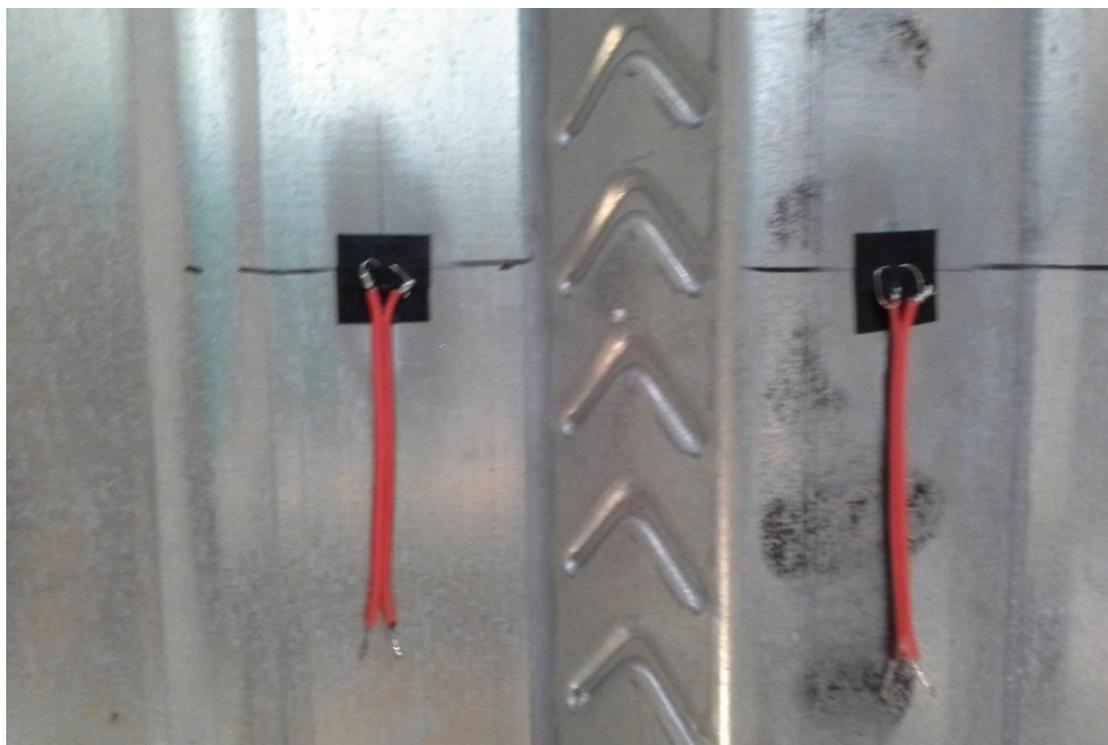


Foto A.10 – Extensômetros elétricos na fôrma de aço (onda alta e onda baixa)



Foto A.11 – Aspecto típico da fissura na região da força aplicada, após o deslizamento



Foto A.12 – Deslizamento relativo entre o concreto e a fôrma de aço na extremidade

ANEXO B

RESULTADOS DOS ENSAIOS

Nota: os resultados teóricos apresentados nos gráficos foram obtidos desconsiderando-se o concreto na região tracionada (modelo fissurado).

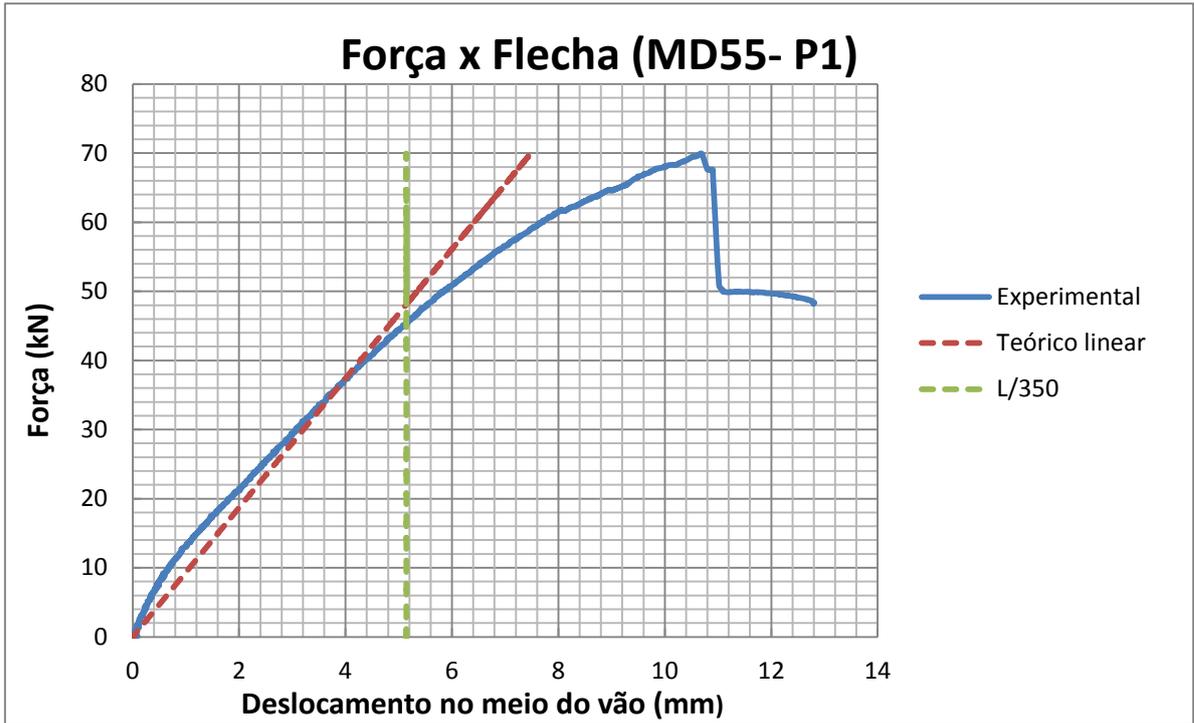


Figura B.1a – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P1
Força x deslocamento a meio vão (flecha)

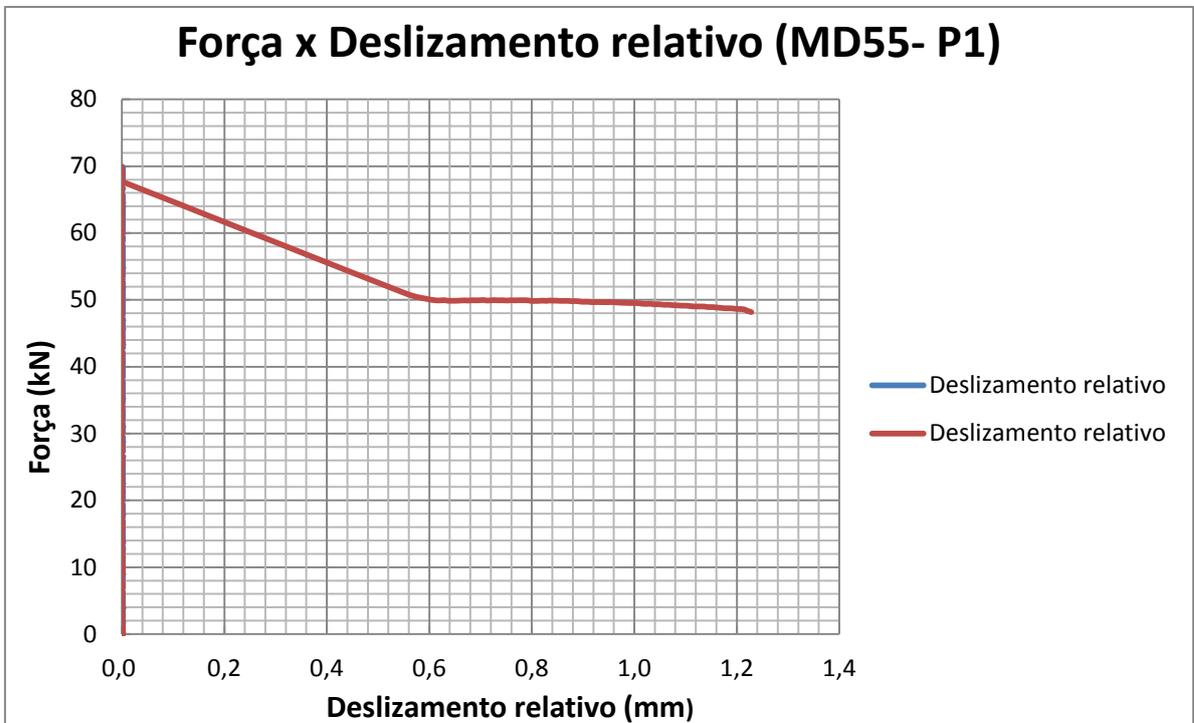


Figura B.1b – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P1
Força x deslizamento relativo

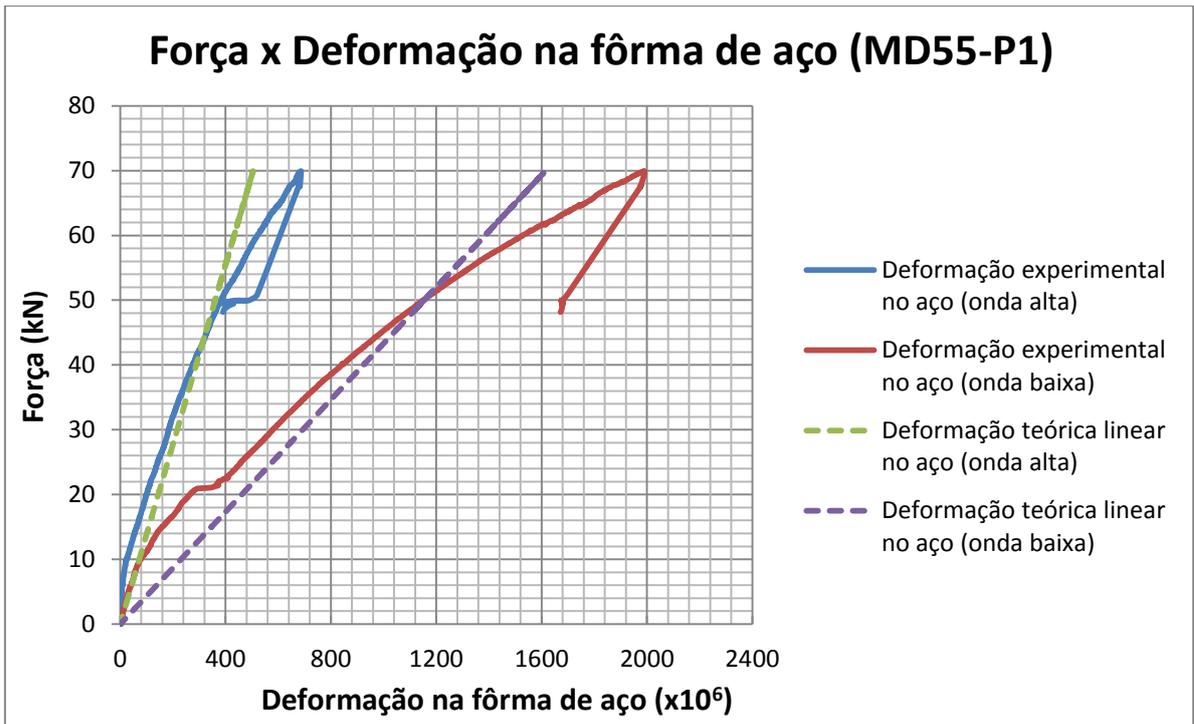


Figura B.1c – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P1
Força x deformação na fôrma de aço

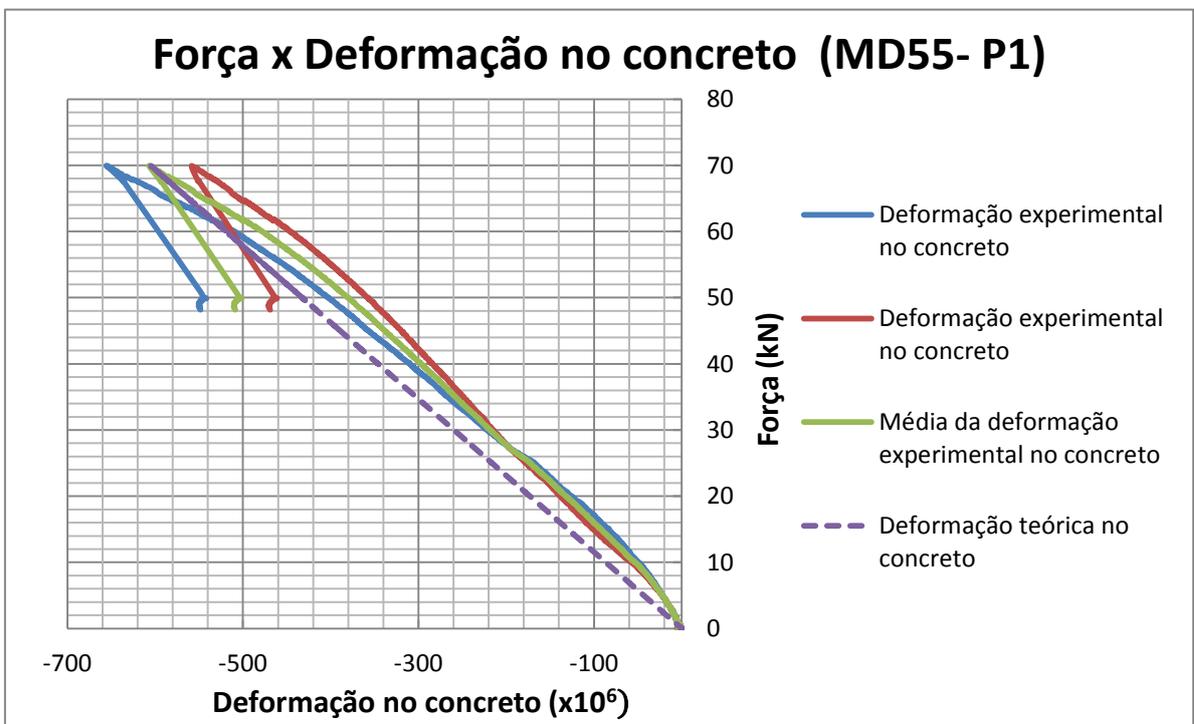


Figura B.1d – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P1
Força x deformação no concreto

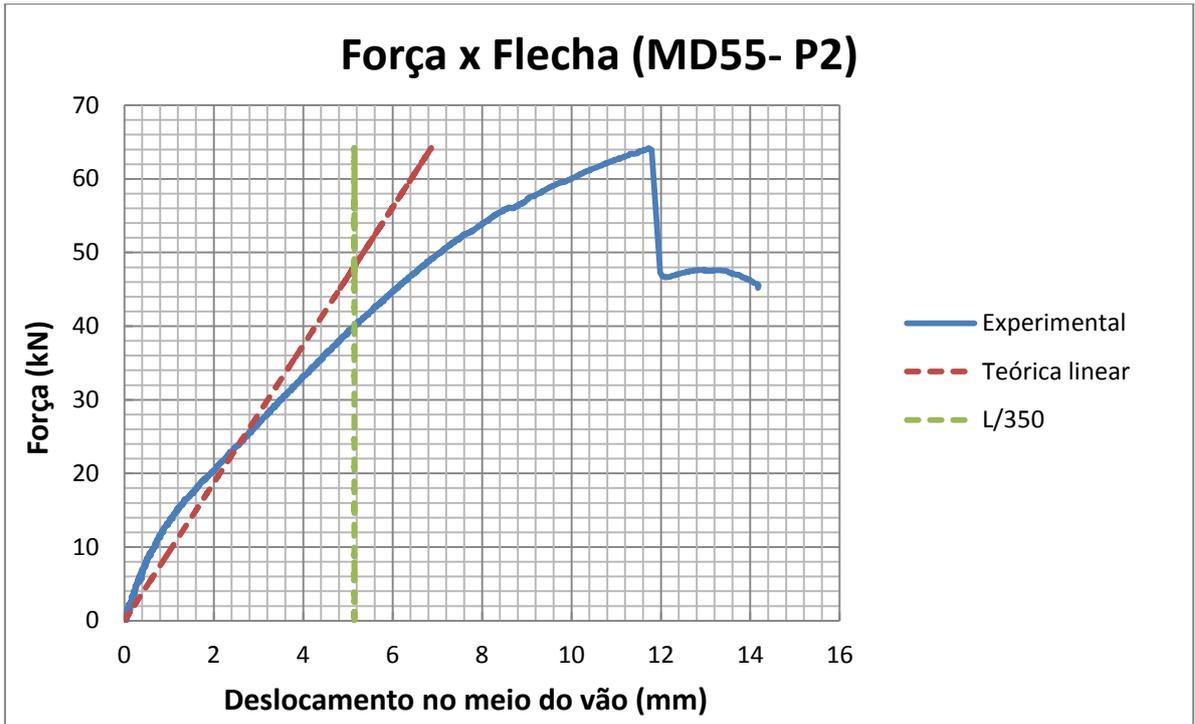


Figura B.2a – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P2
Força x deslocamento a meio vão (flecha)

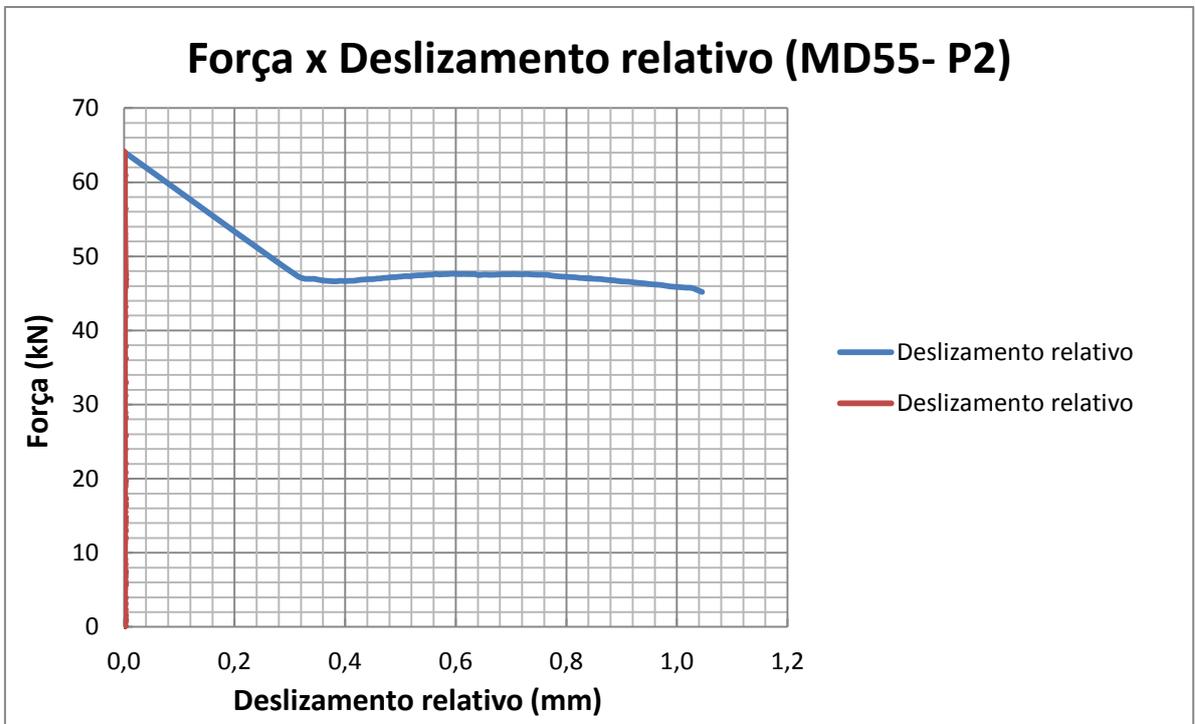


Figura B.2b – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P2
Força x deslizamento relativo

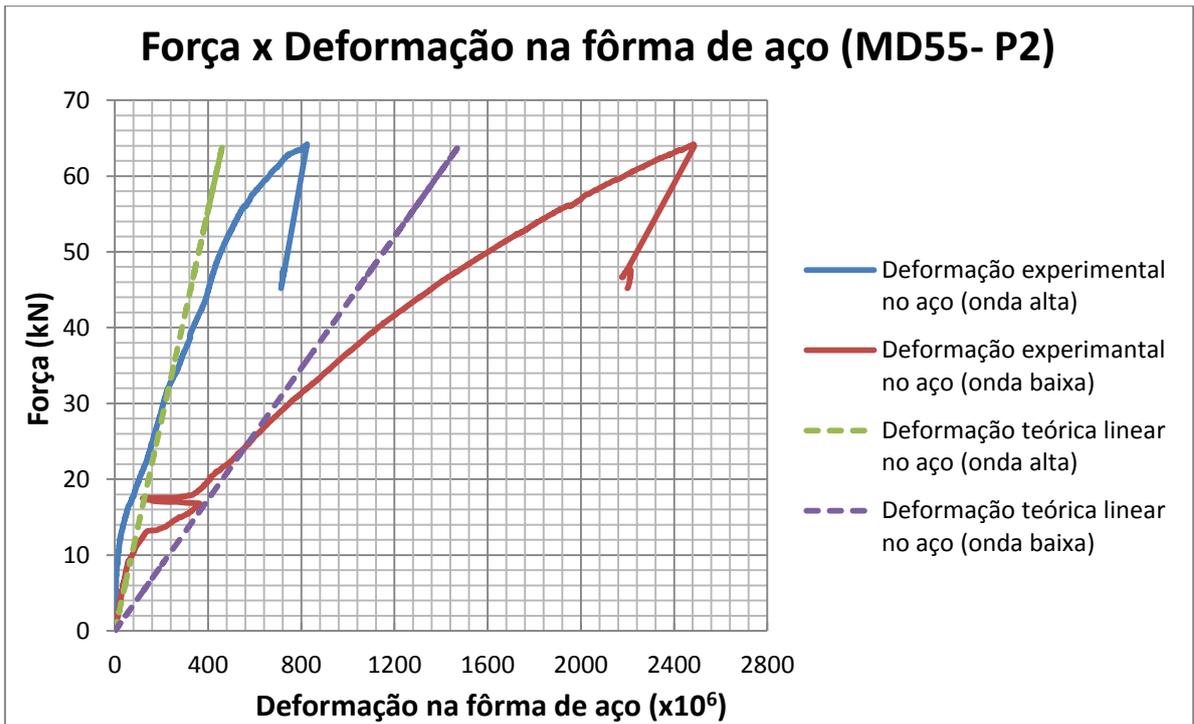


Figura B.2c – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P2
Força x deformação na fôrma de aço

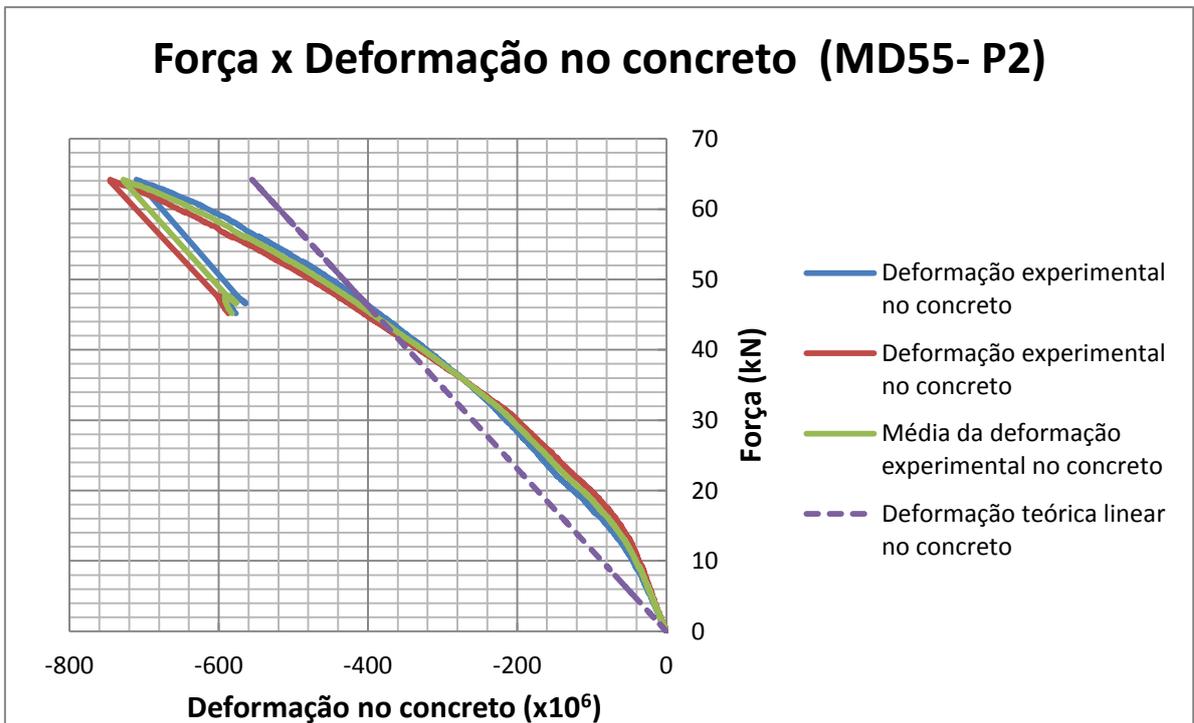


Figura B.2d – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P2
Força x deformação no concreto

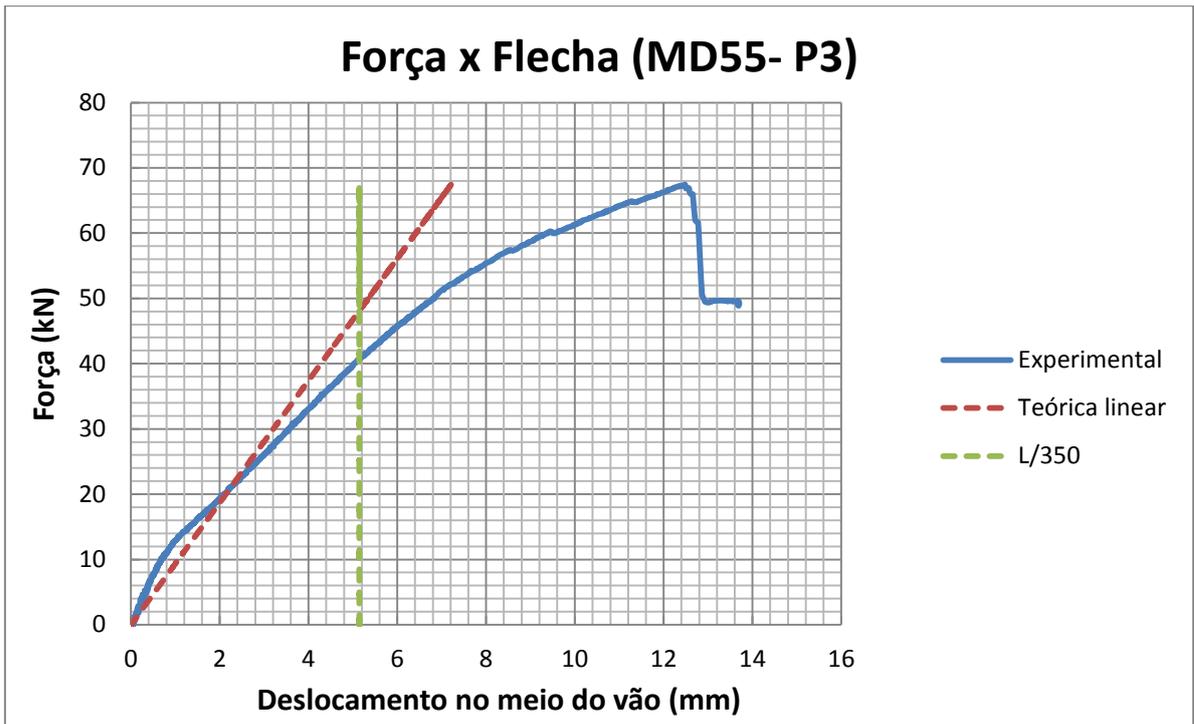


Figura B.3a – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P3
Força x deslocamento a meio vão (flecha)

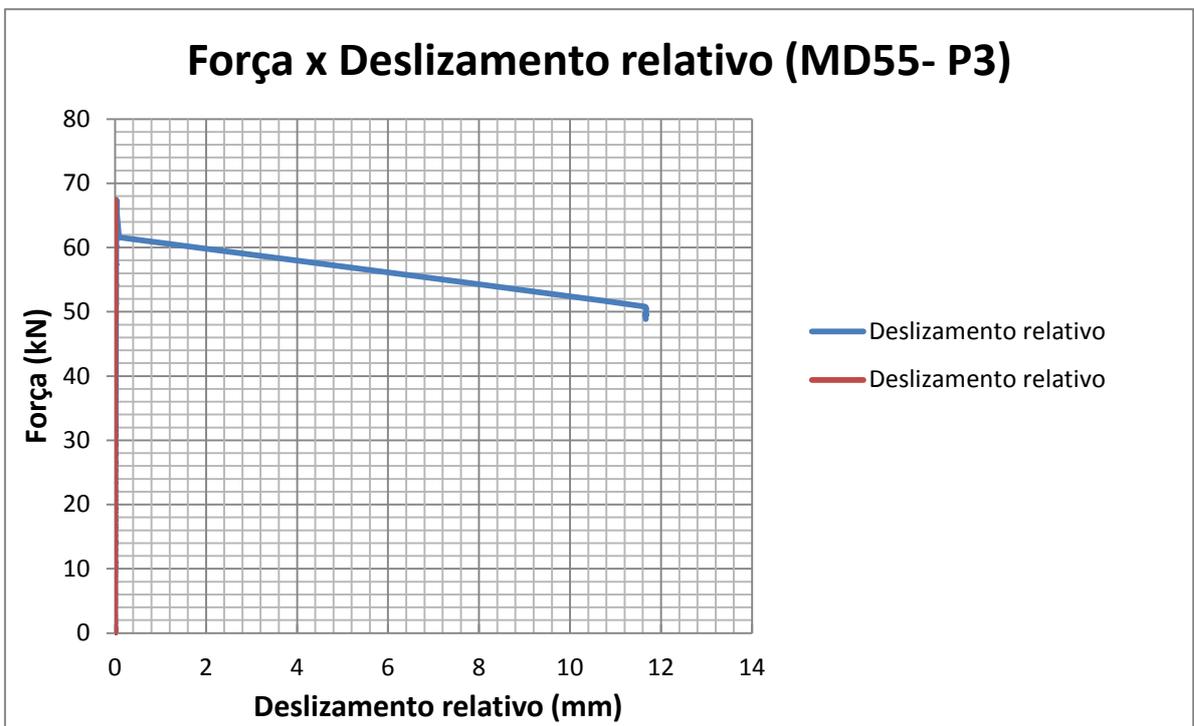


Figura B.3b – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P3
Força x deslizamento relativo

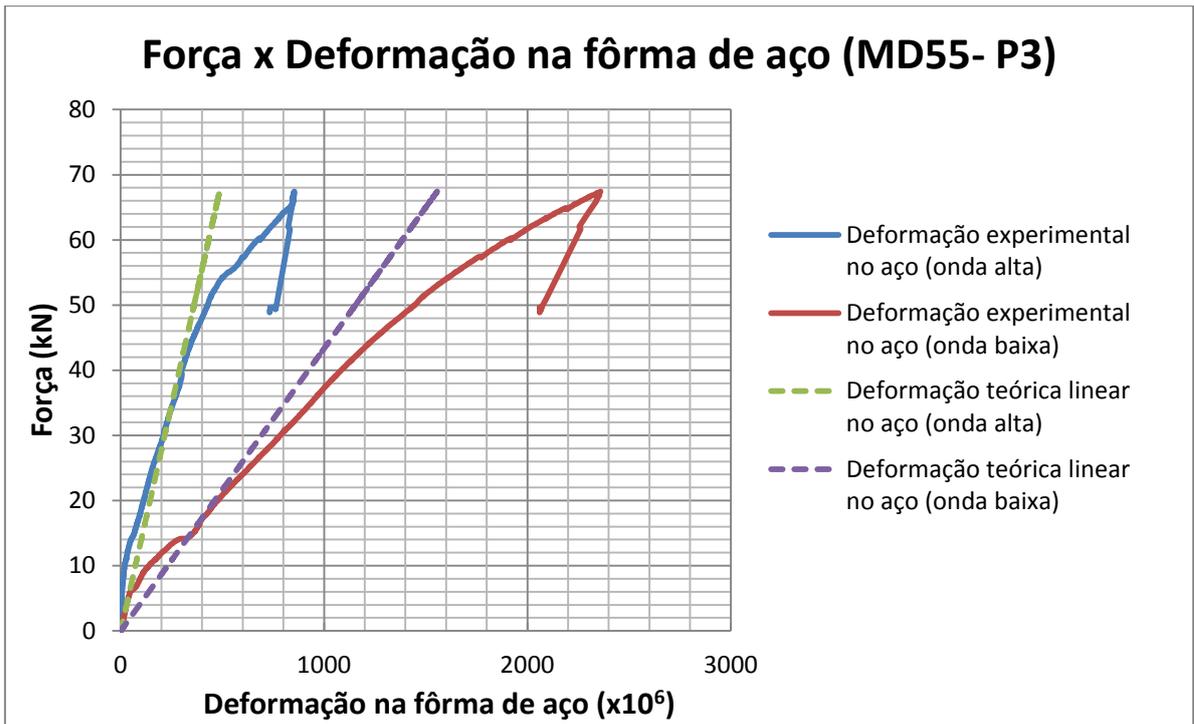


Figura B.3c – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P3
Força x deformação na fôrma de aço

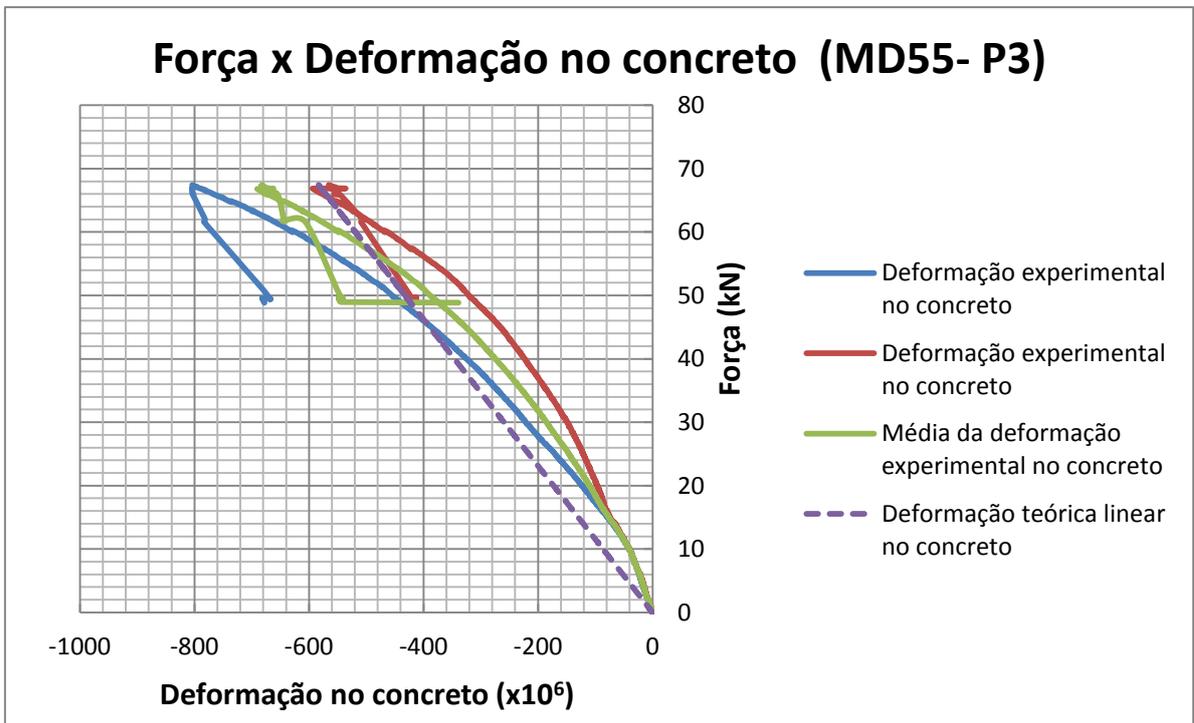


Figura B.3d – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P3
Força x deformação no concreto

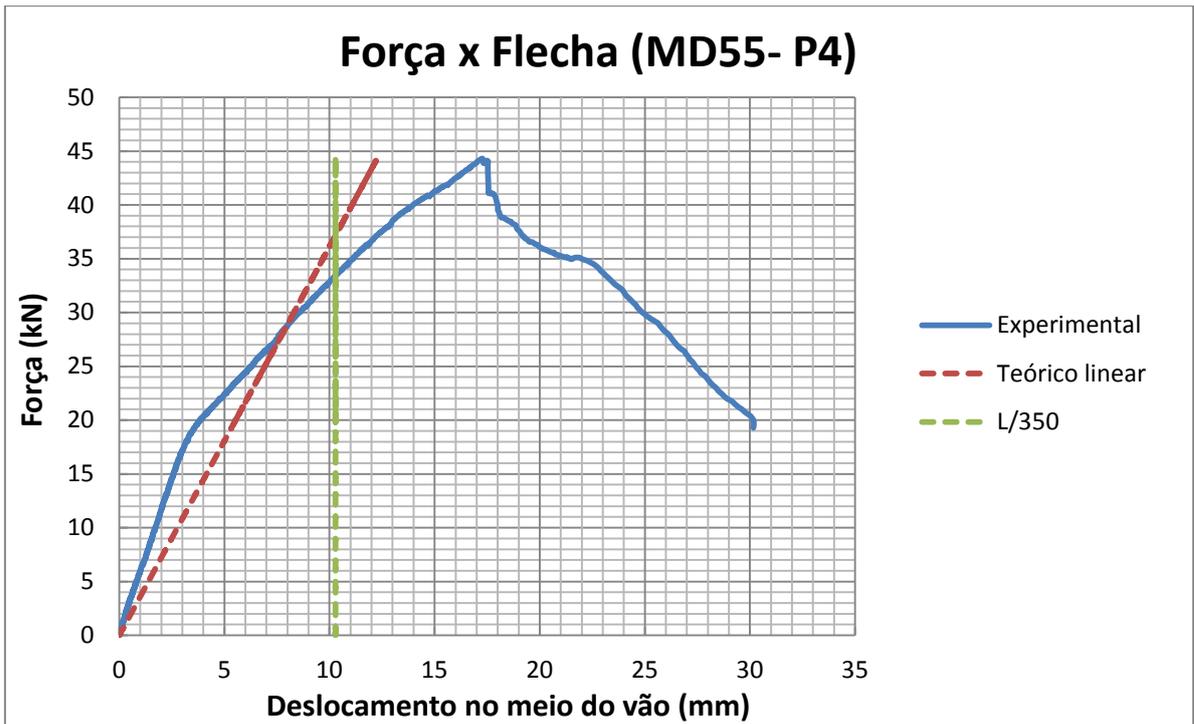


Figura B.4a – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P4
Força x deslocamento a meio vão (flecha)

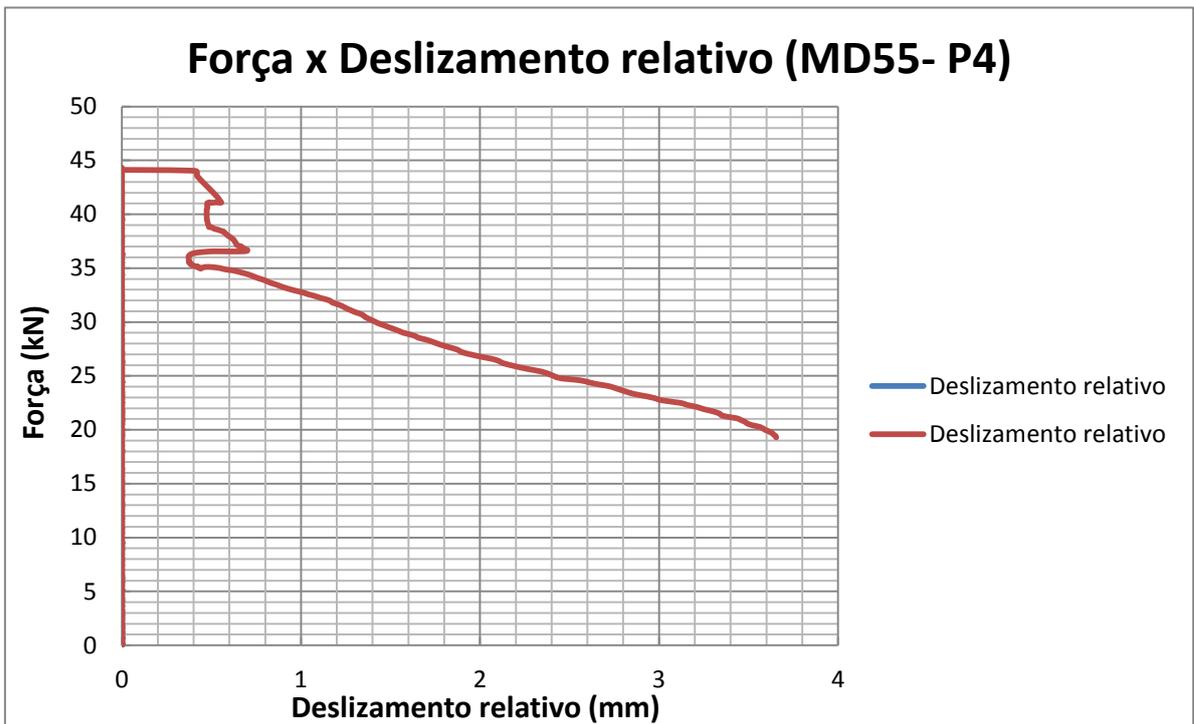


Figura B.4b – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P4
Força x deslizamento relativo

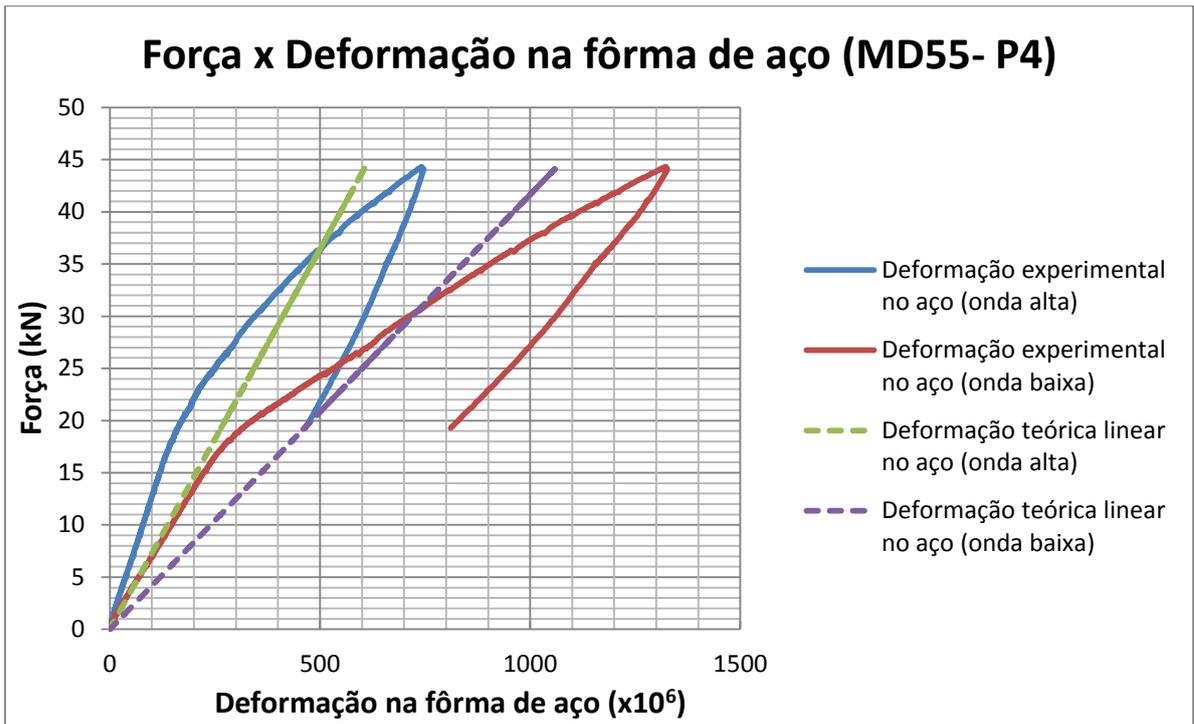


Figura B.4c – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P4
Força x deformação na fôrma de aço

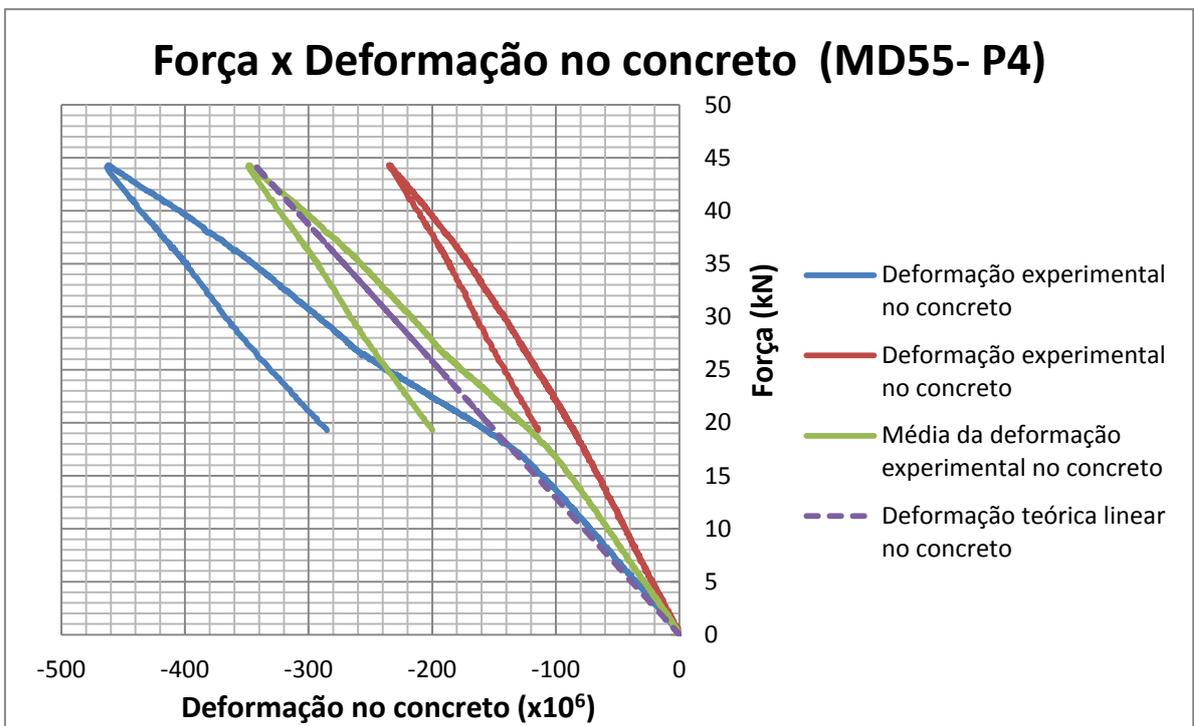


Figura B.4d – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P4
Força x deformação no concreto

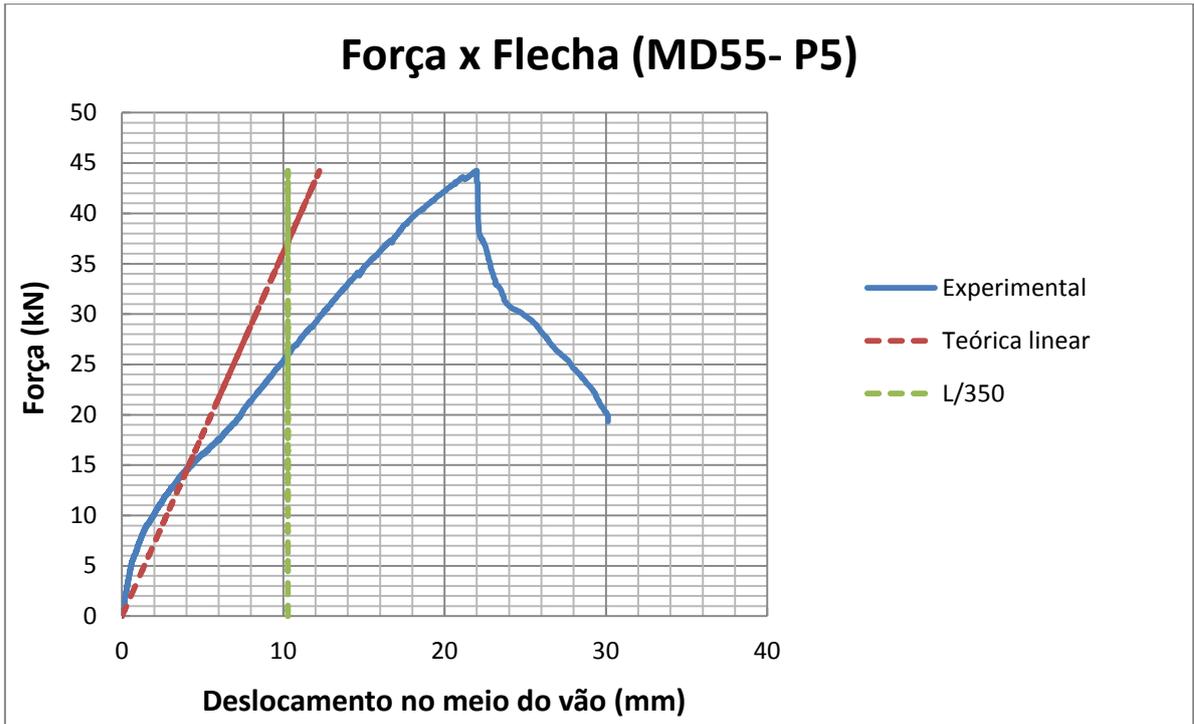


Figura B.5a – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P5
Força x deslocamento a meio vão (flecha)

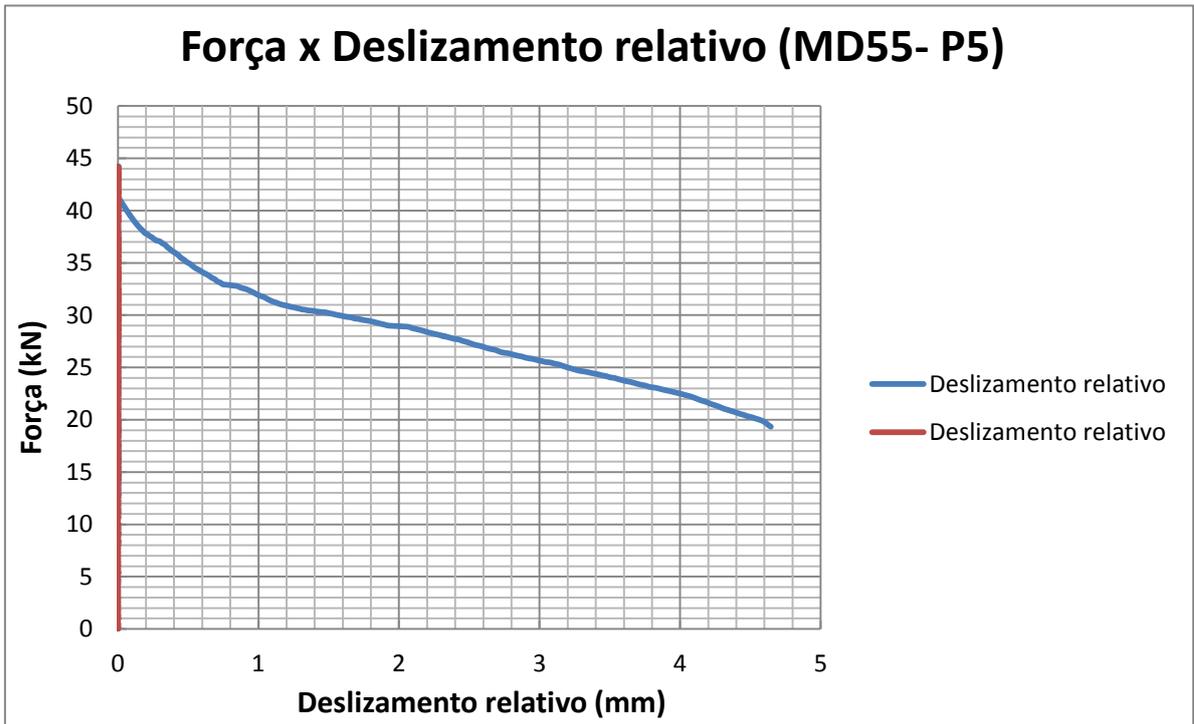


Figura B.5b – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P5
Força x deslizamento relativo

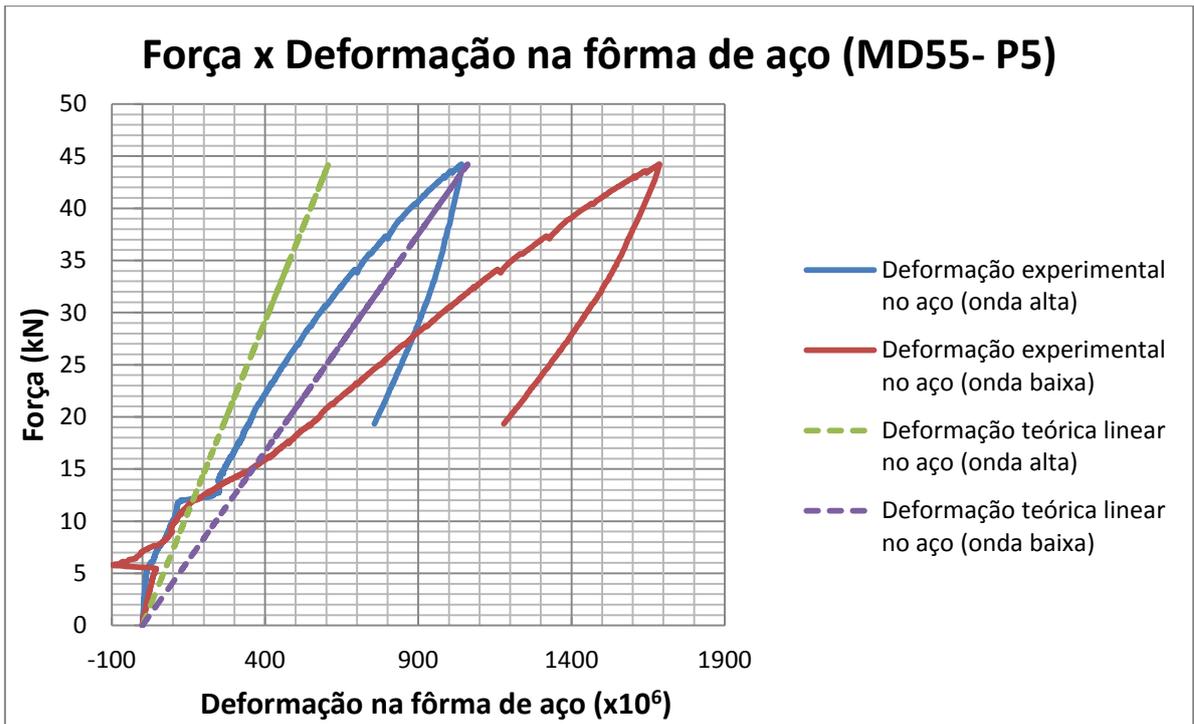


Figura B.5c – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P5
Força x deformação na fôrma de aço

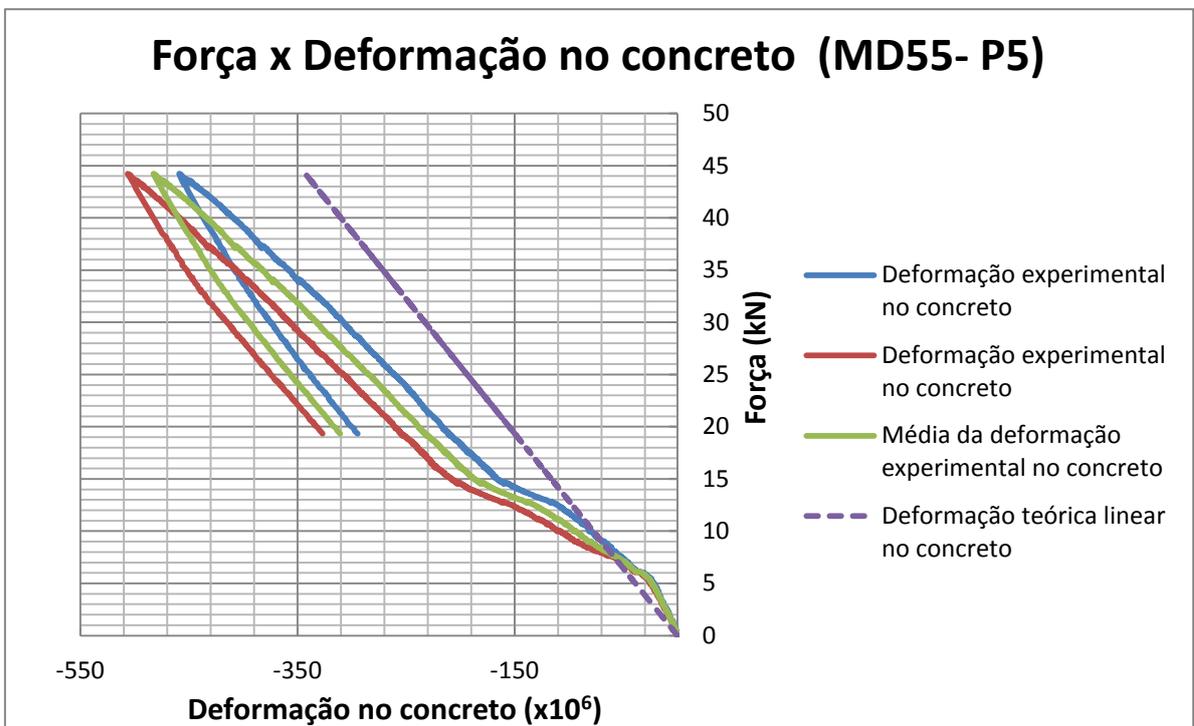


Figura B.5d – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P5
Força x deformação no concreto

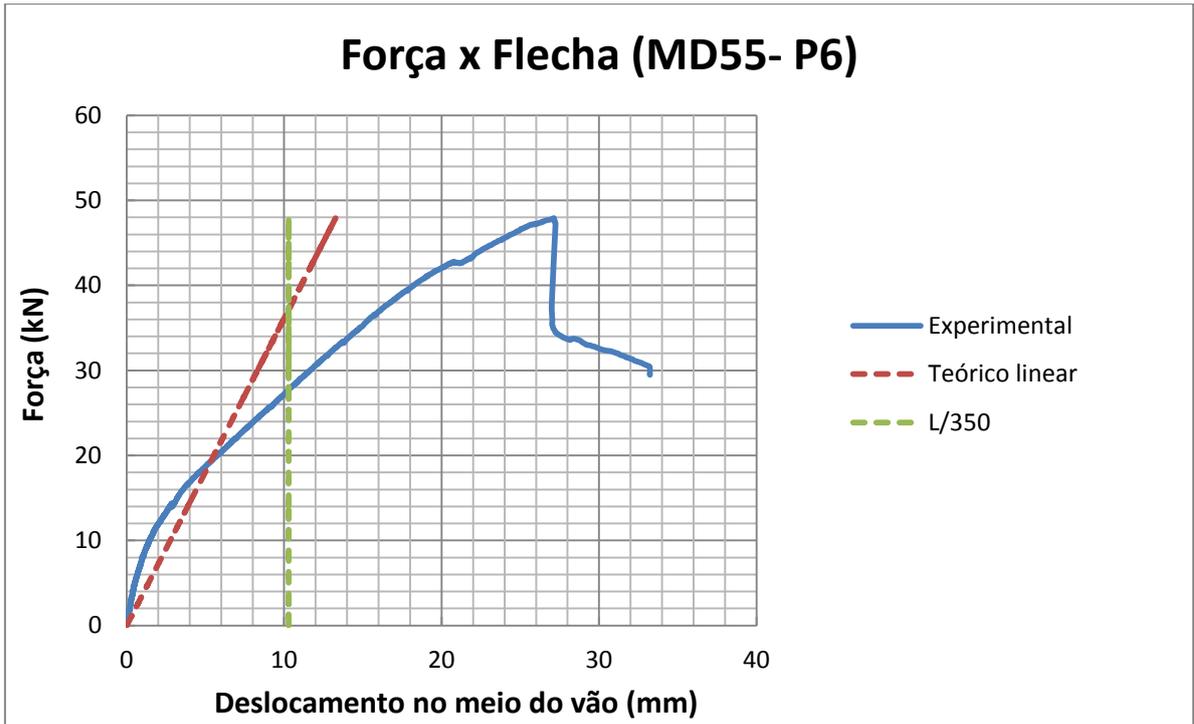


Figura B.6a – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P6
Força x deslocamento a meio vão (flecha)

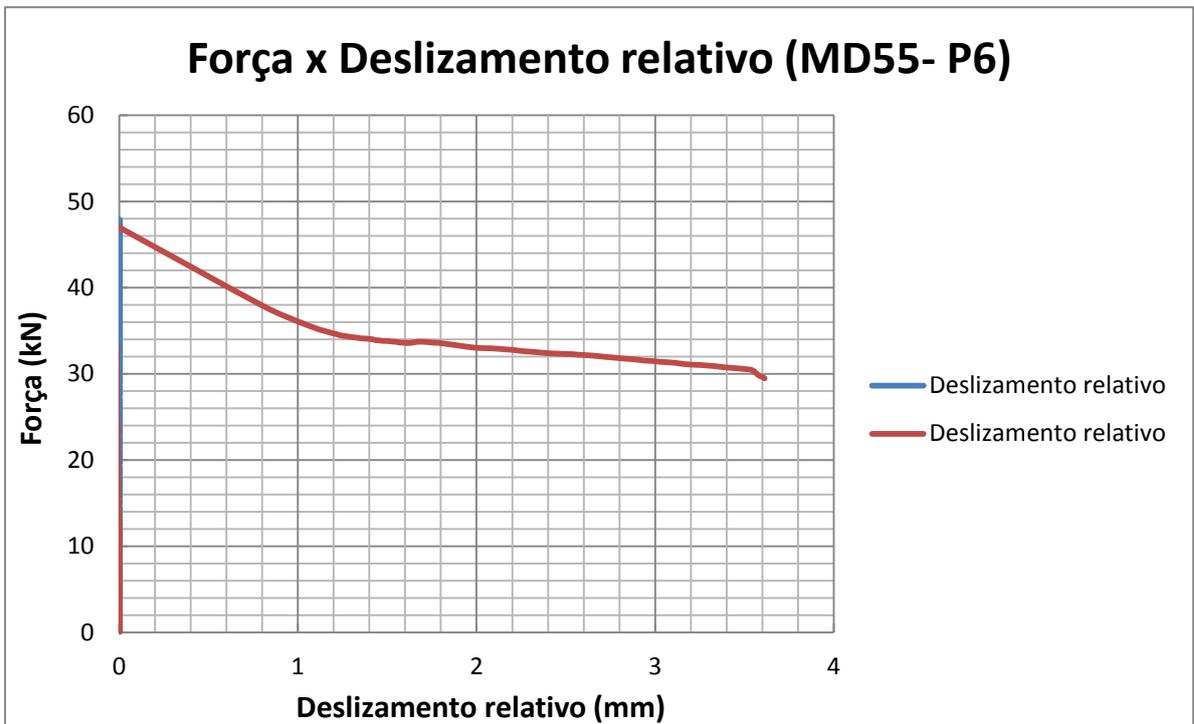


Figura B.6b – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P6
Força x deslizamento relativo

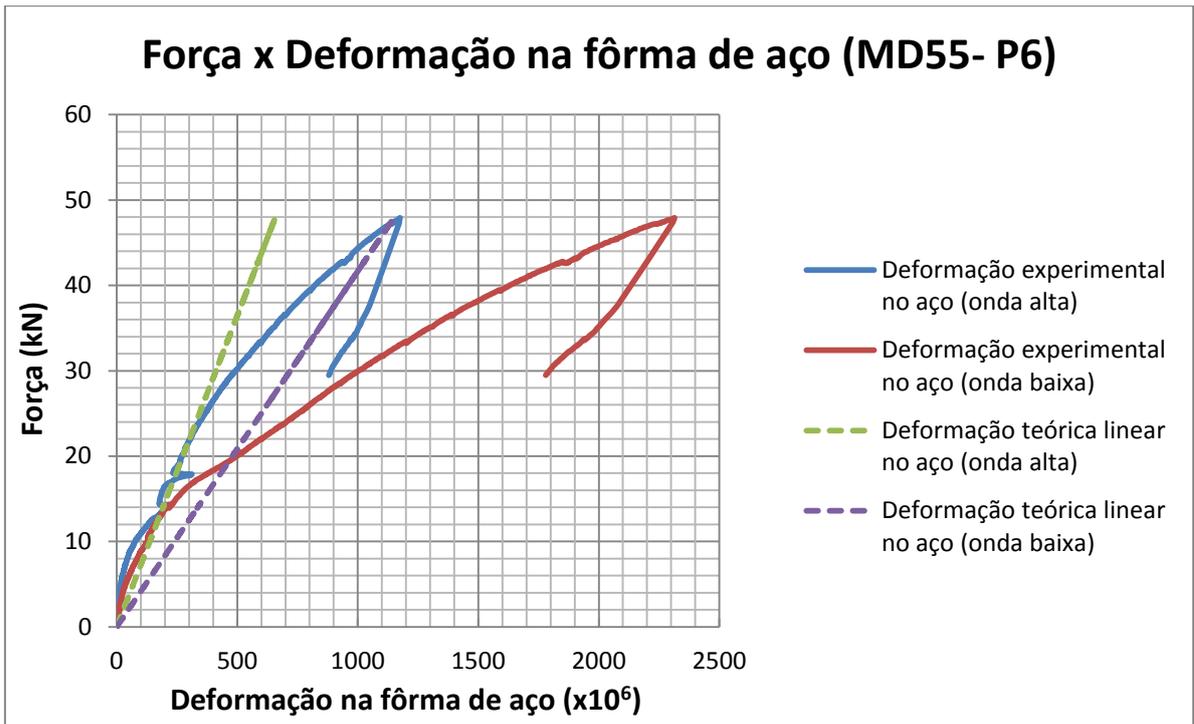


Figura B.6c – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P6
Força x deformação na fôrma de aço

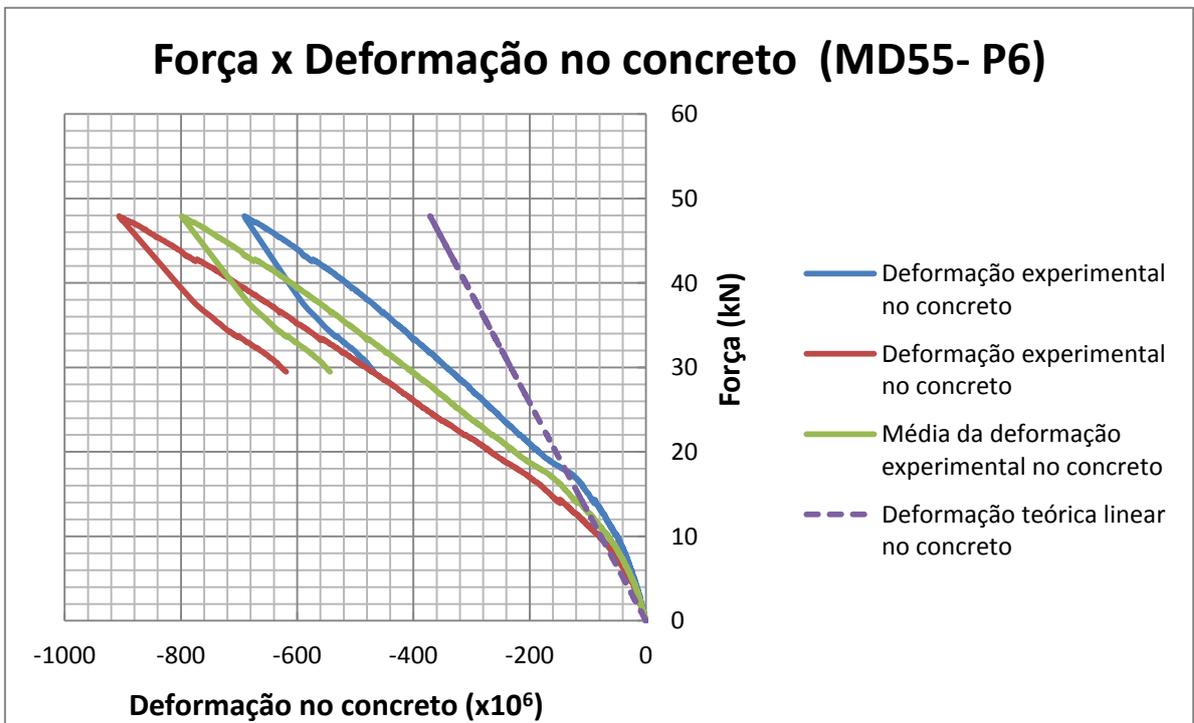


Figura B.6d – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P6
Força x deformação no concreto

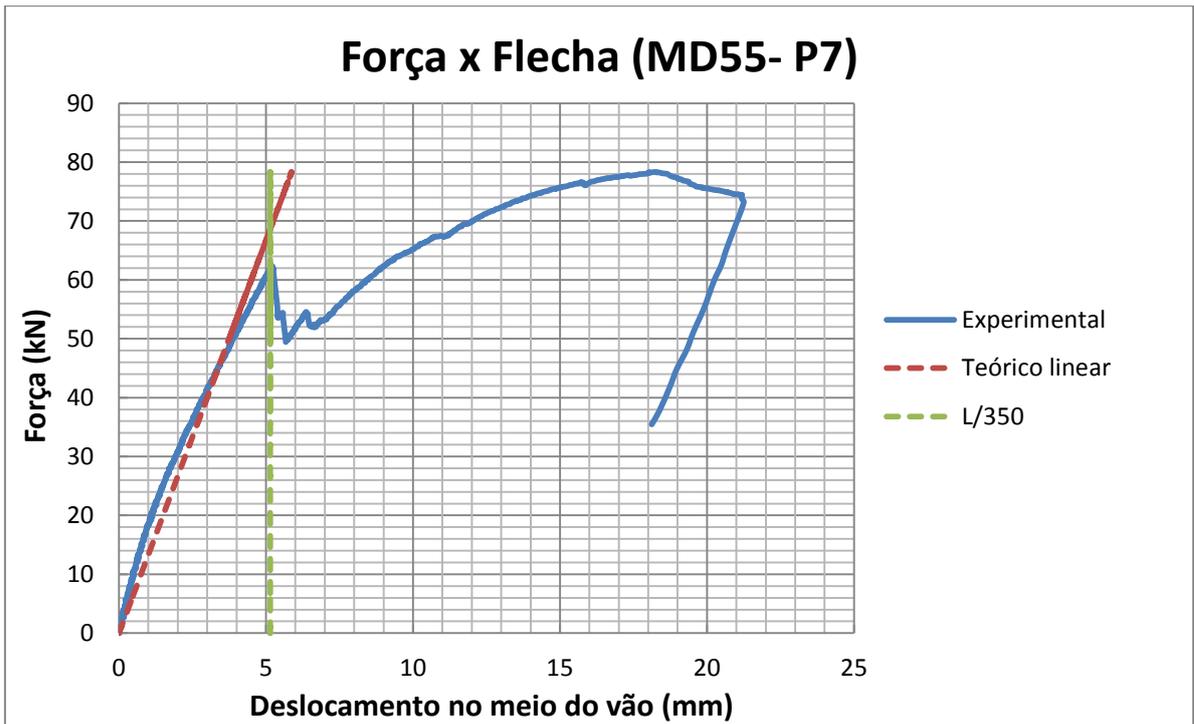


Figura B.7a – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P7
Força x deslocamento a meio vão (flecha)

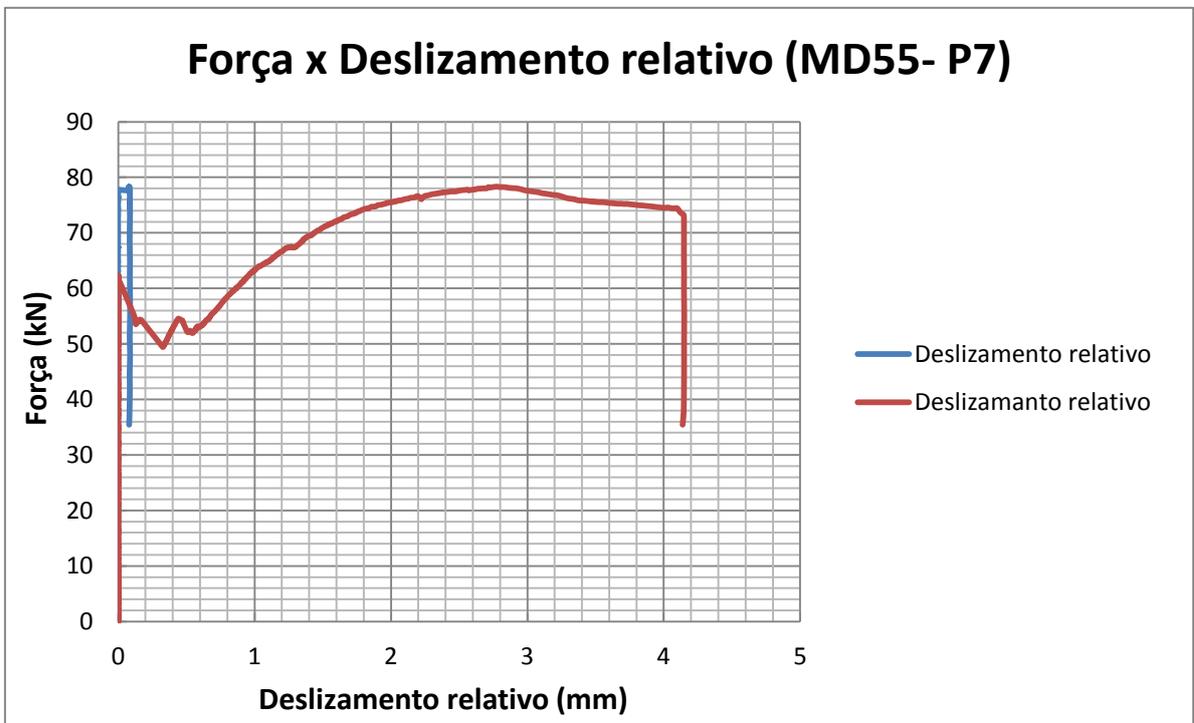


Figura B.7b – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P7
Força x deslizamento relativo

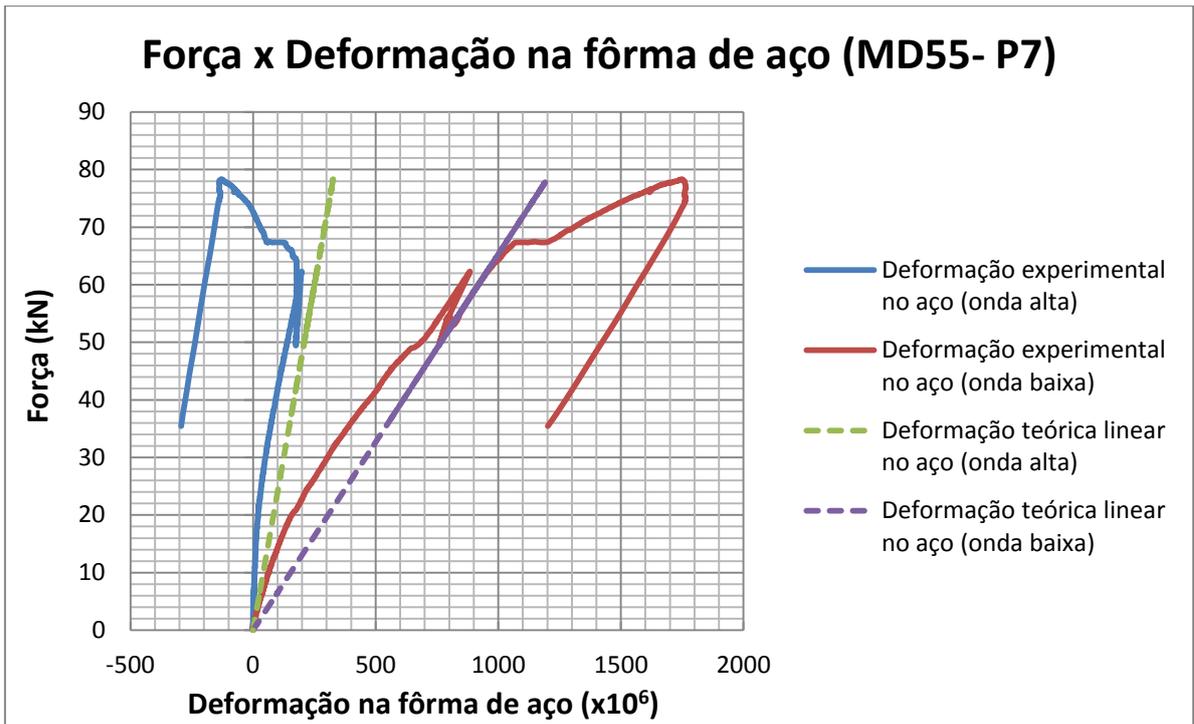


Figura B.7c – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P7
Força x deformação na fôrma de aço

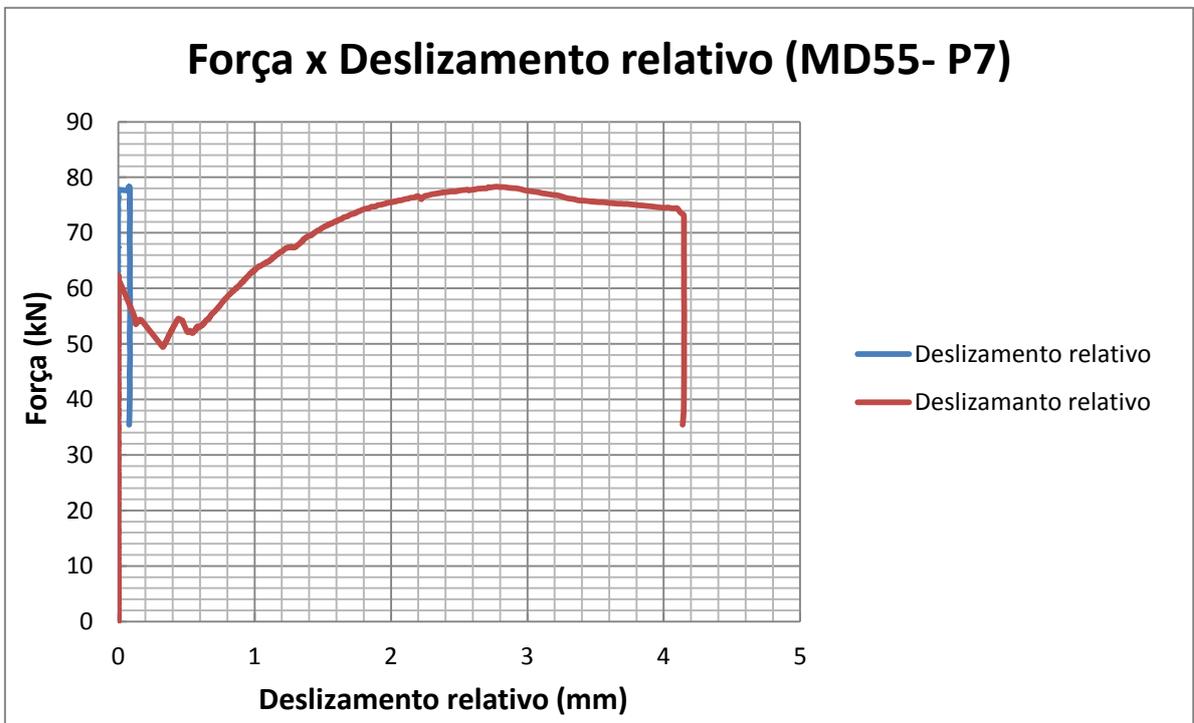


Figura B.7d – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P7
Força x deformação no concreto

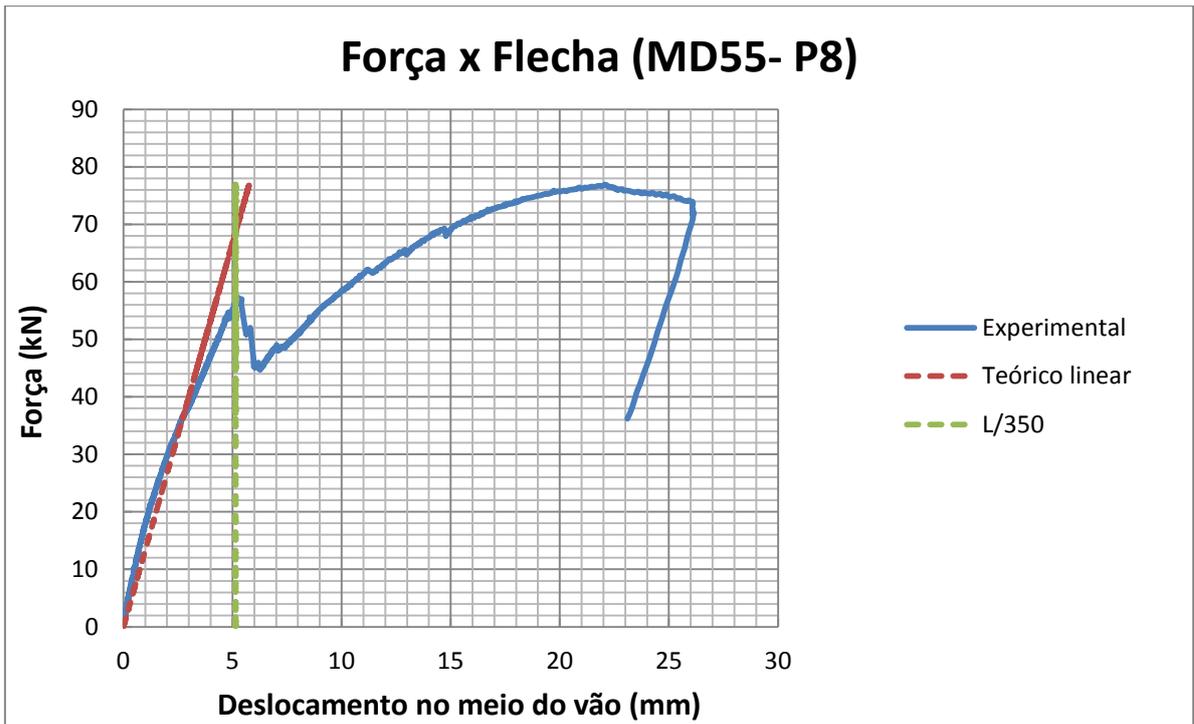


Figura B.8a – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P8
Força x deslocamento a meio vão (flecha)

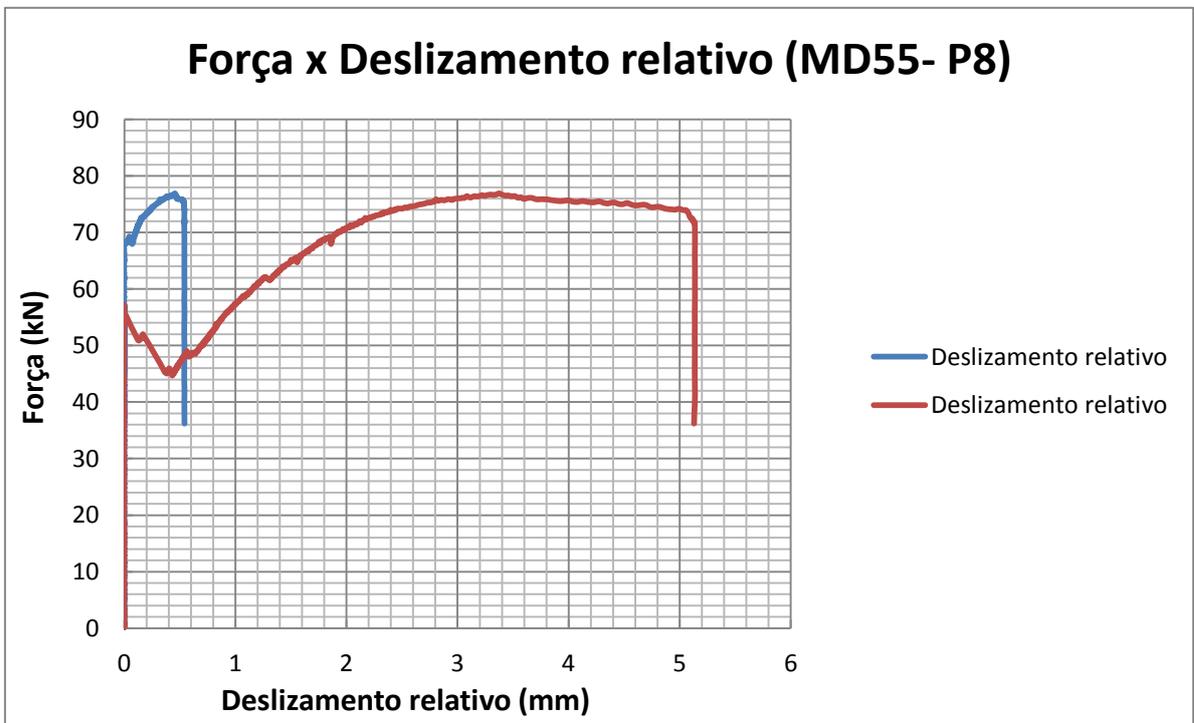


Figura B.8b – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P8
Força x deslizamento relativo

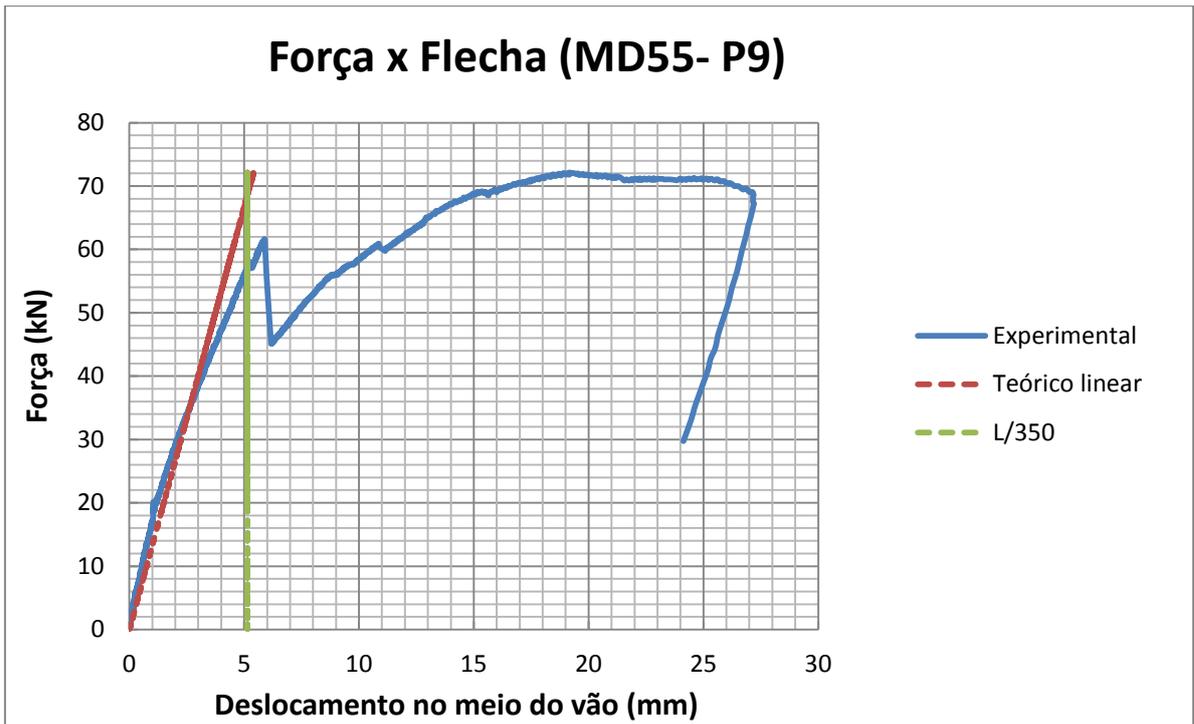


Figura B.9a – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P9
Força x deslocamento a meio vão (flecha)

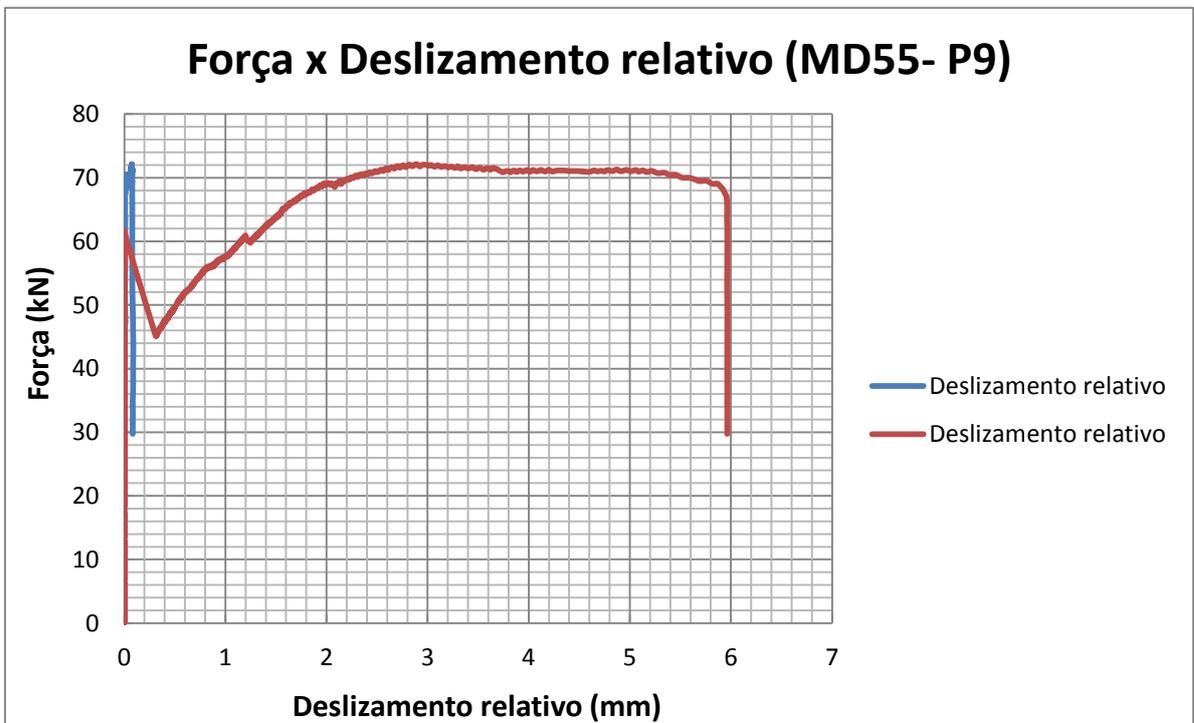


Figura B.9b – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P9
Força x deslizamento relativo

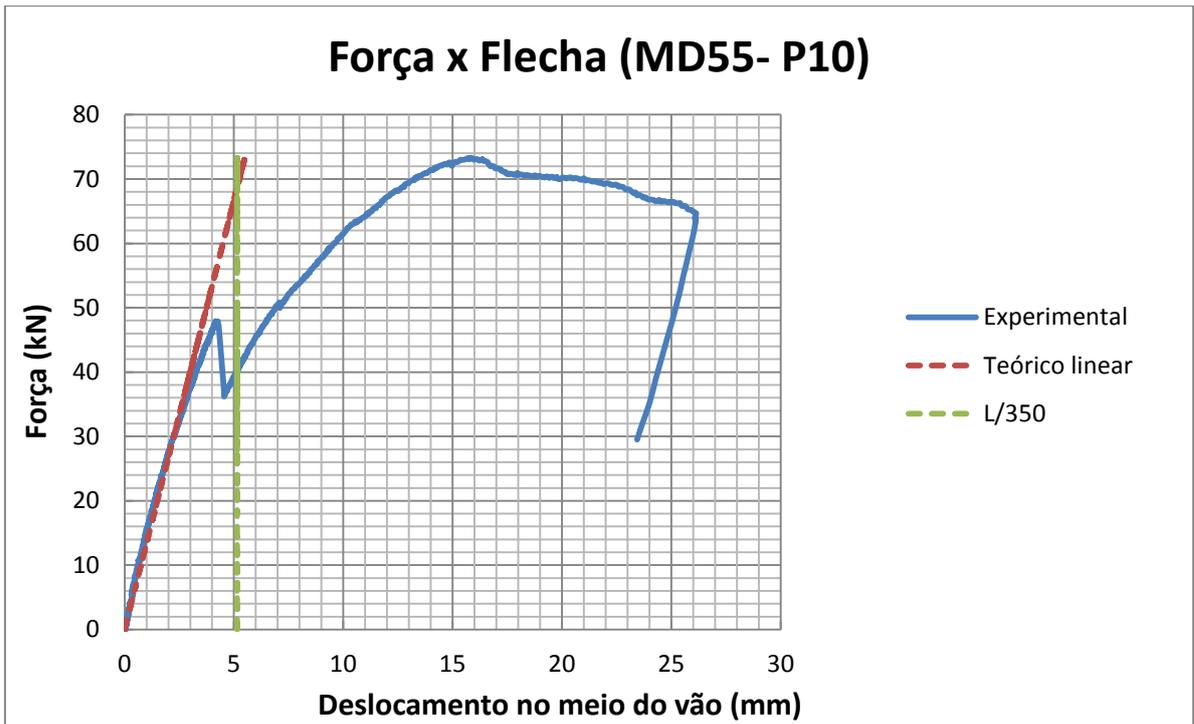


Figura B.10a – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P10
Força x deslocamento a meio vão (flecha)

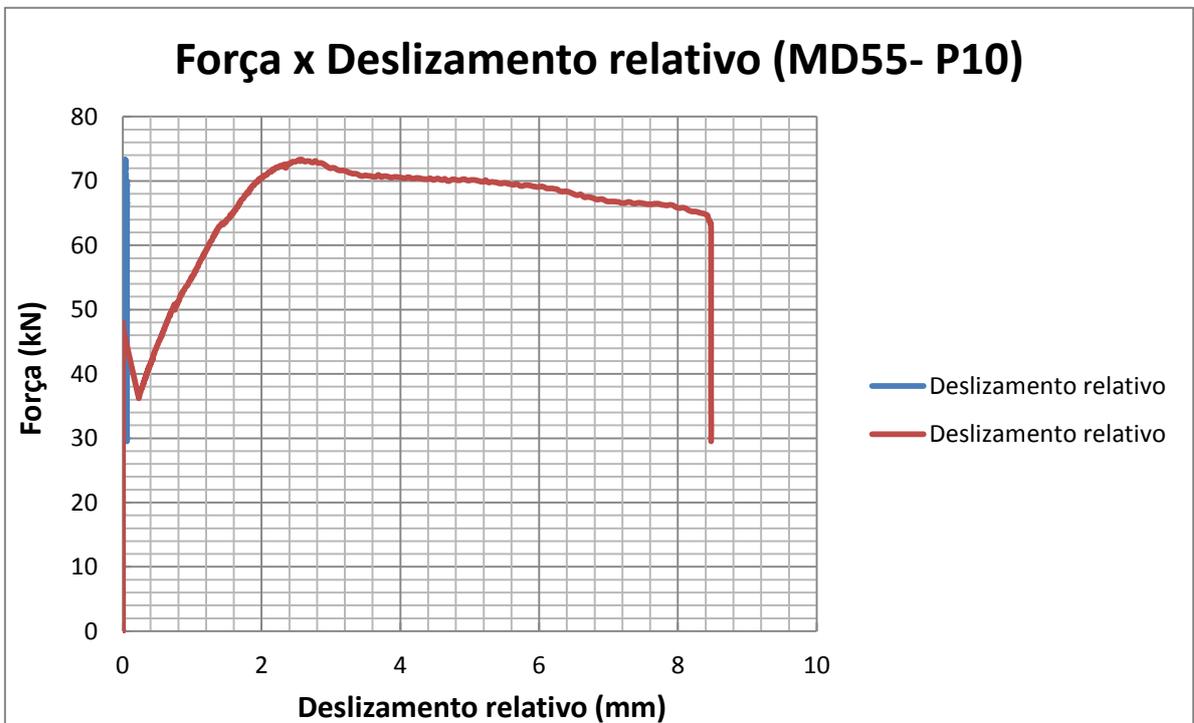


Figura B.10b – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P10
Força x deslizamento relativo

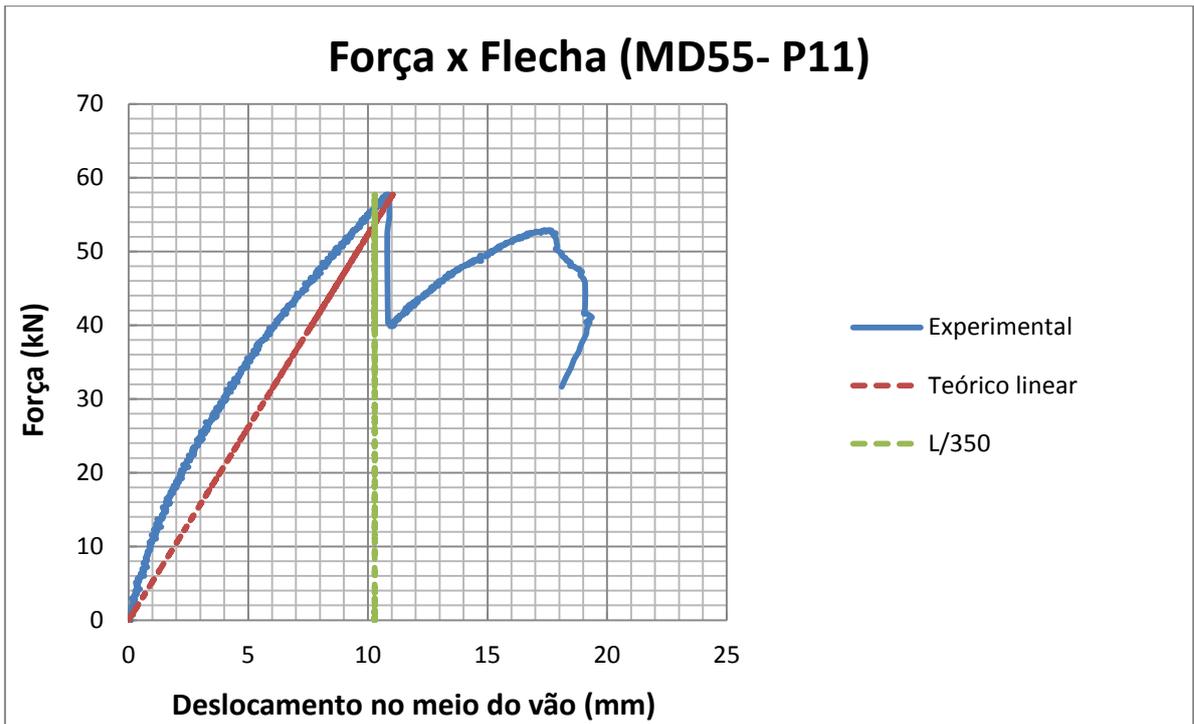


Figura B.11a – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P11
Força x deslocamento a meio vão (flecha)

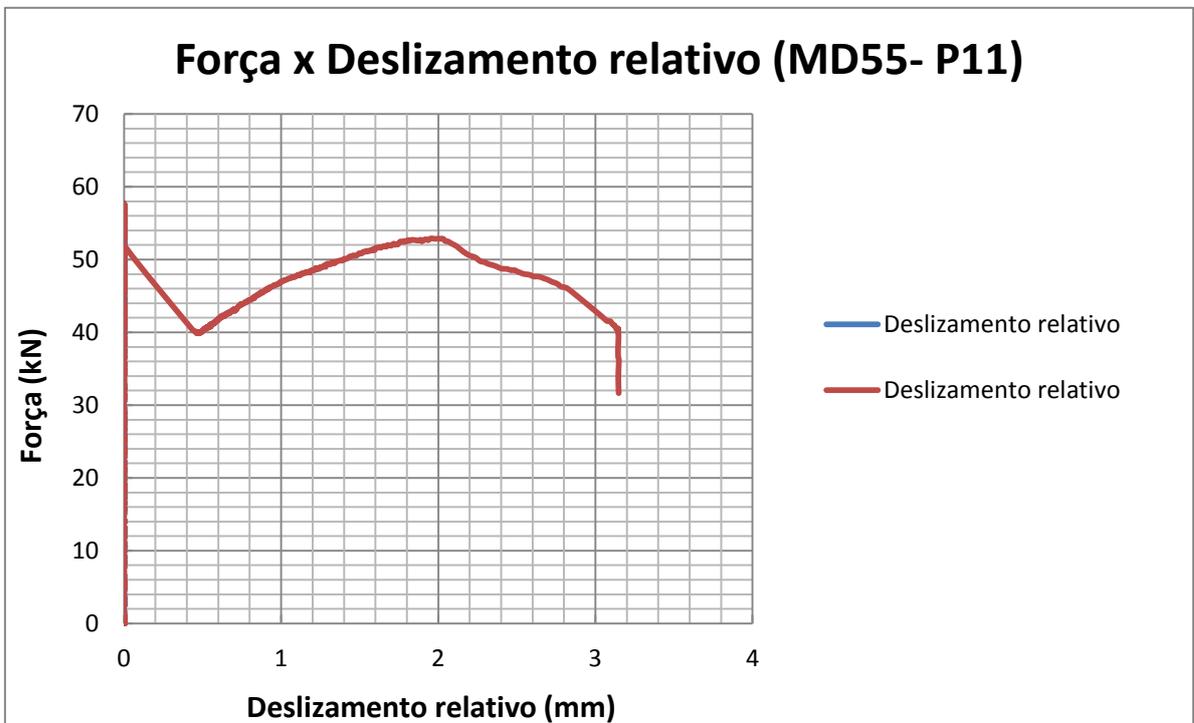


Figura B.11b – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P11
Força x deslizamento relativo

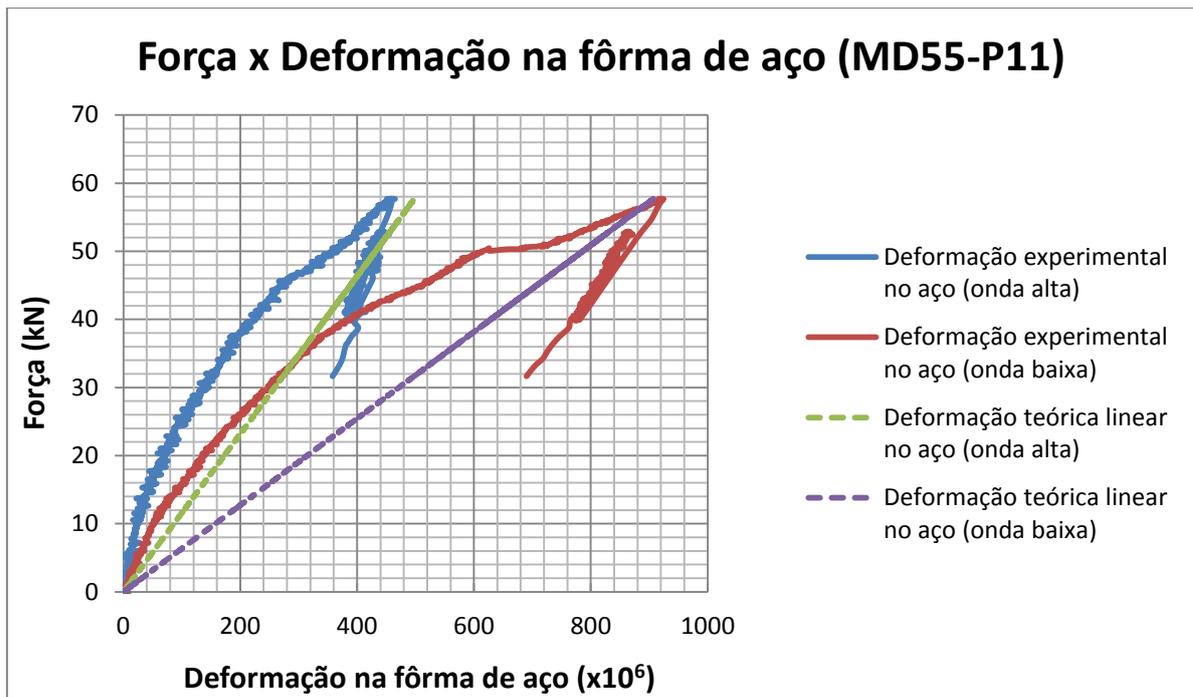


Figura B.11c – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P11
Força x deformação na fôrma de aço

Nota: gráfico *força x deformação no concreto* para o protótipo MD55-P11 não apresentado, devido à falha na instrumentação.

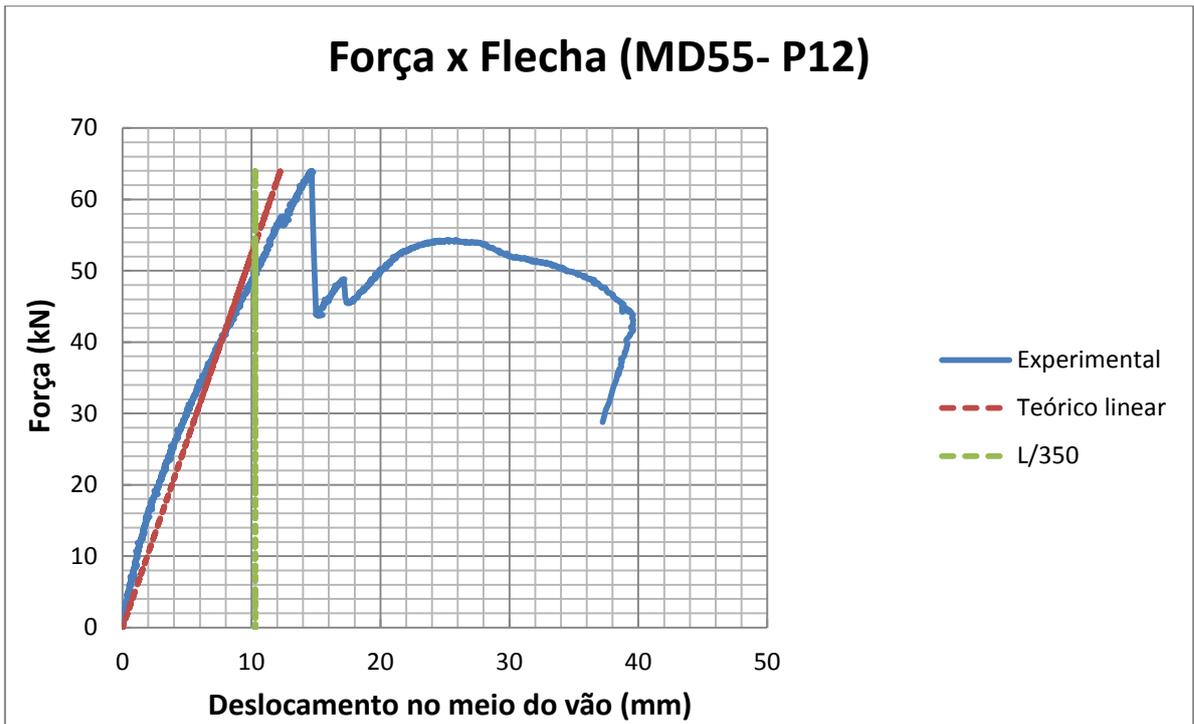


Figura B.12a – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P12
Força x deslocamento a meio vão (flecha)

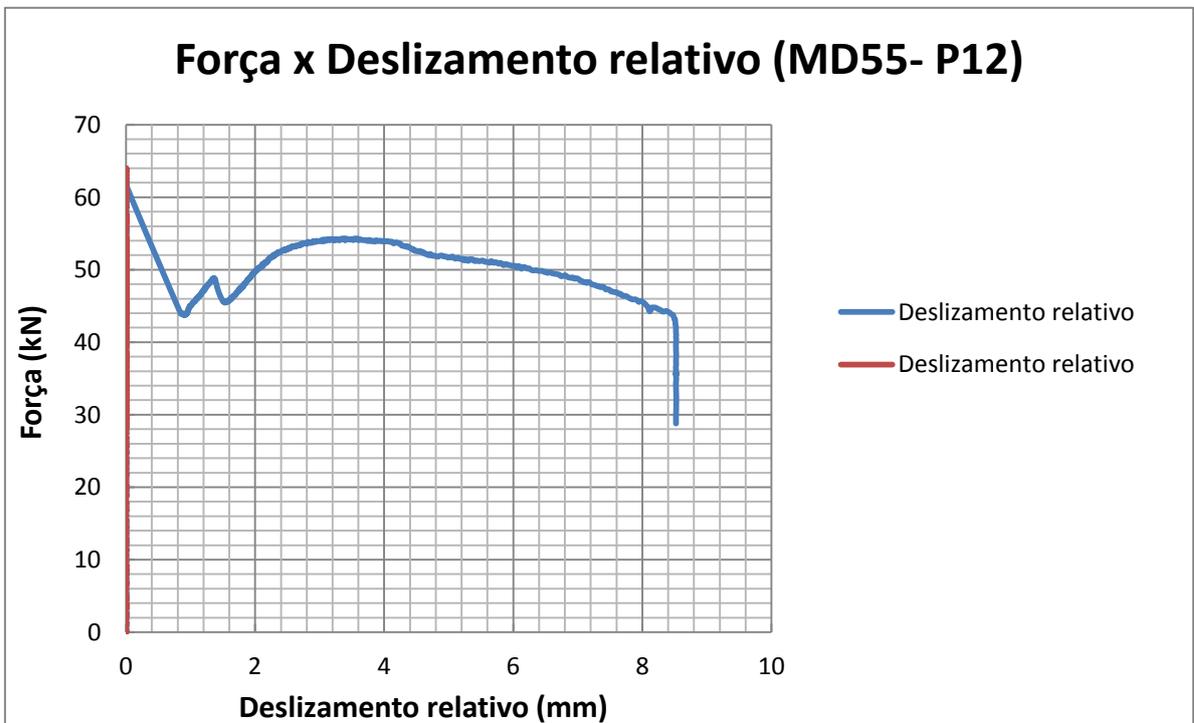


Figura B.12b – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P12
Força x deslizamento relativo

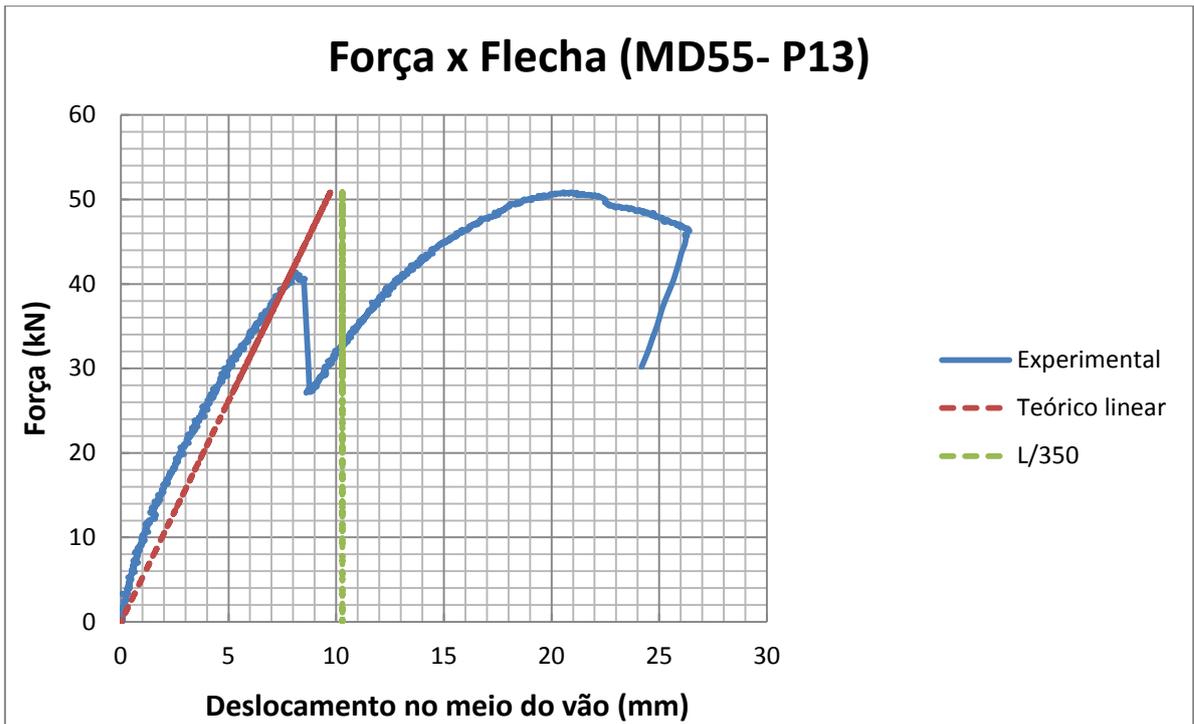


Figura B.13a – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P13
Força x deslocamento a meio vão (flecha)

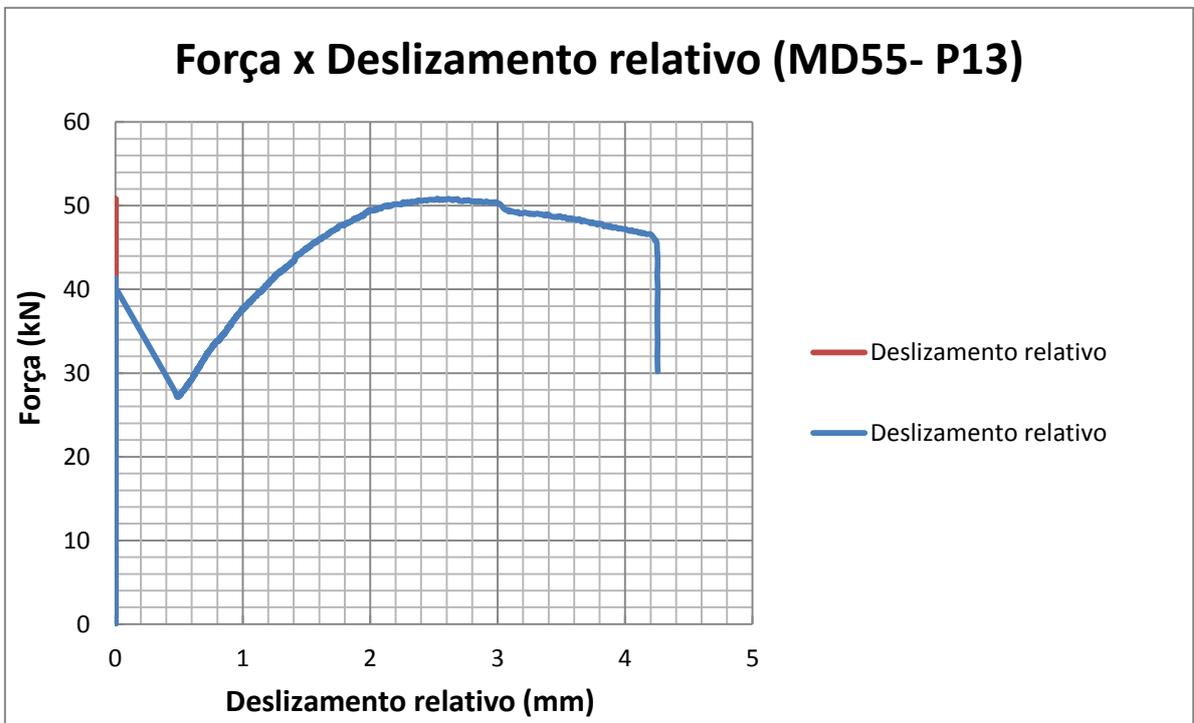


Figura B.13b – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P13
Força x deslizamento relativo

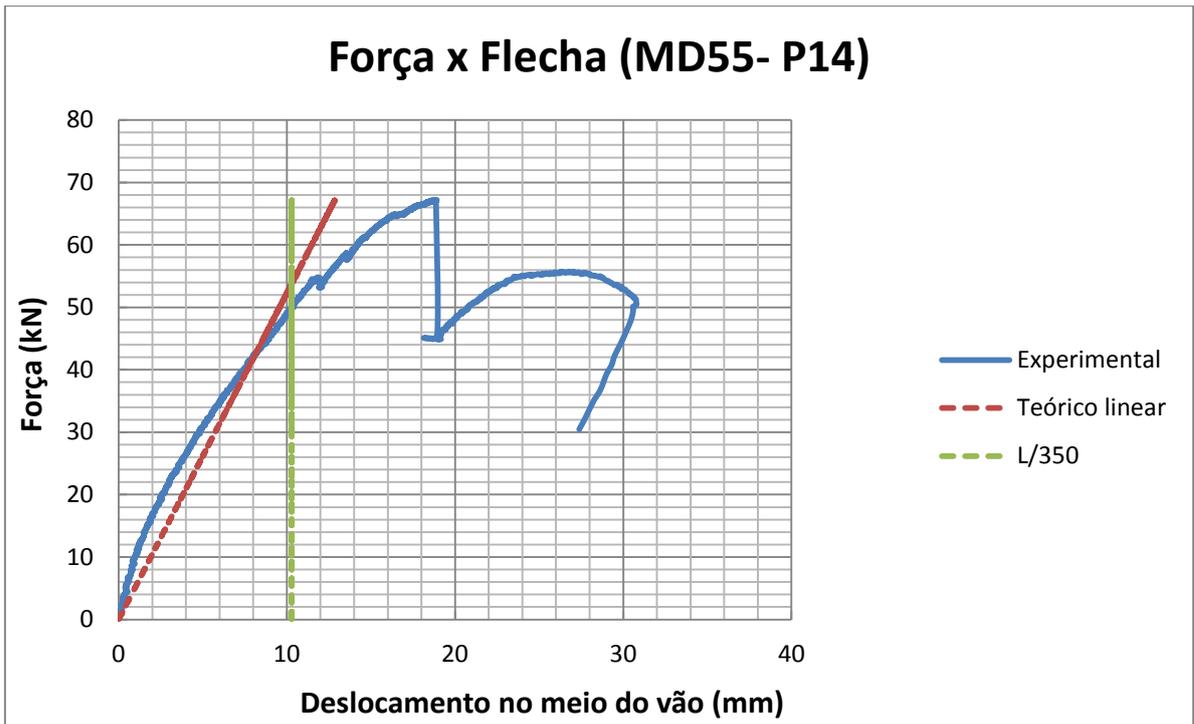


Figura B.14a – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P14
Força x deslocamento a meio vão (flecha)

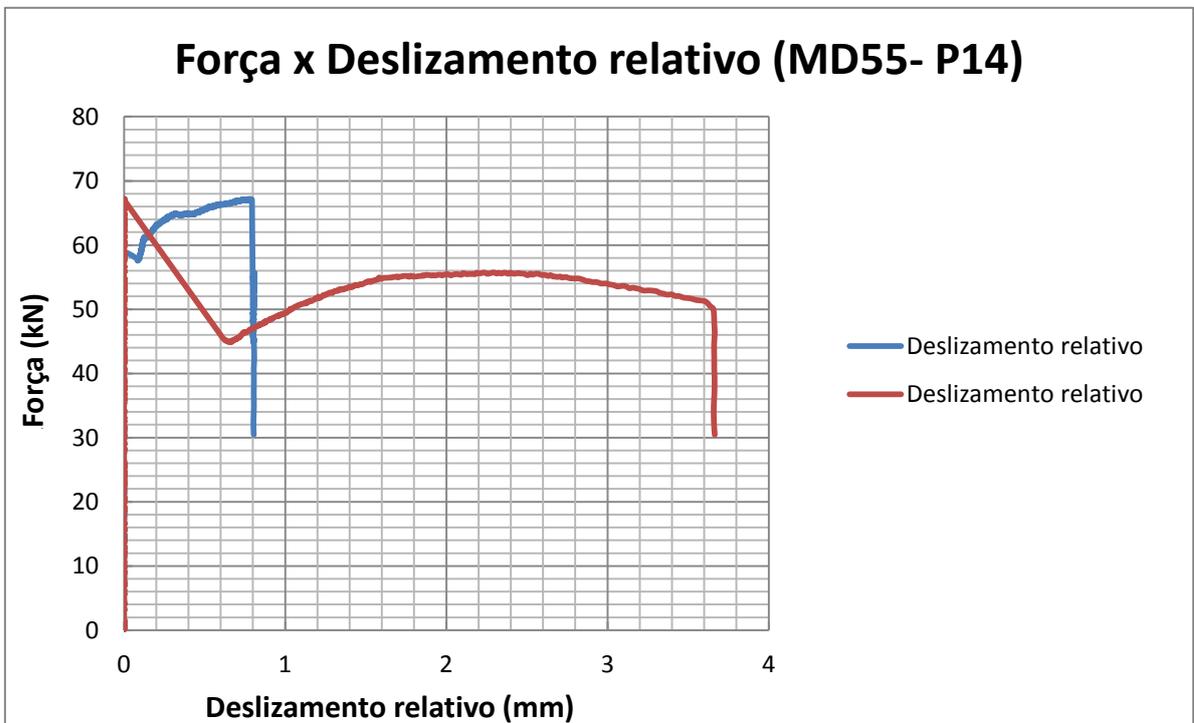


Figura B.14b – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P14
Força x deslizamento relativo

PROTÓTIPOS COM ARMADURA ADICIONAL

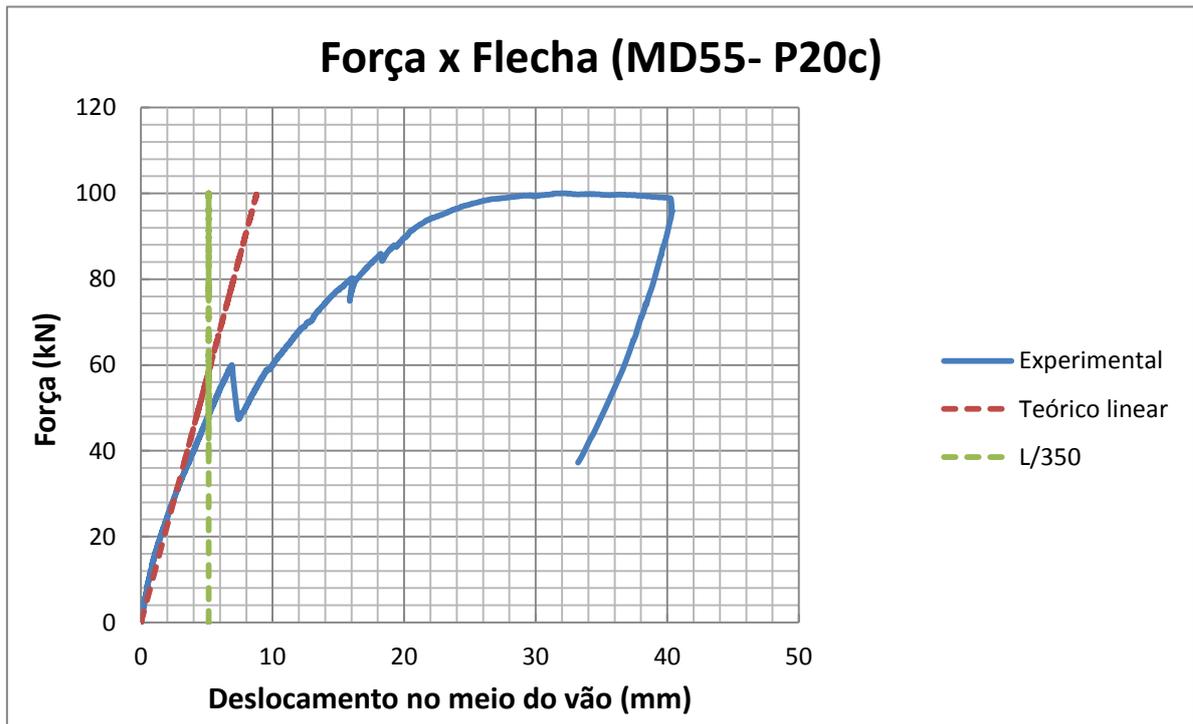


Figura B.15a – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P20c
Força x deslocamento a meio vão (flecha)

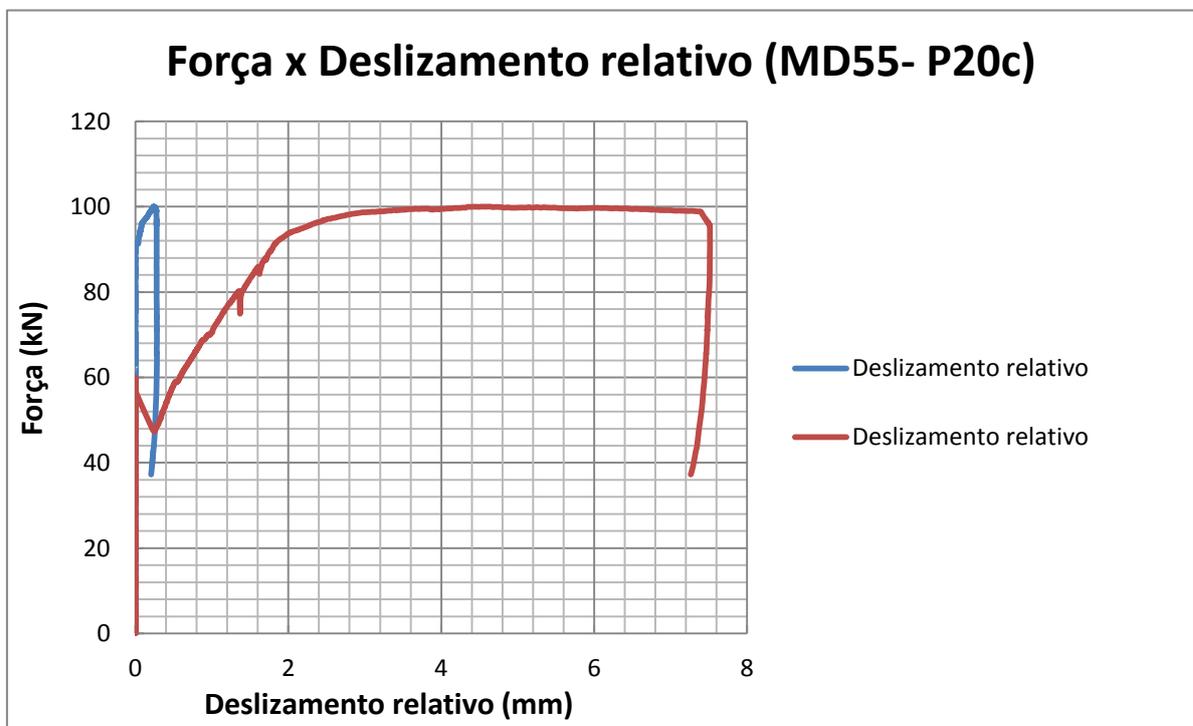


Figura B.15b – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P20c
Força x deslizamento relativo

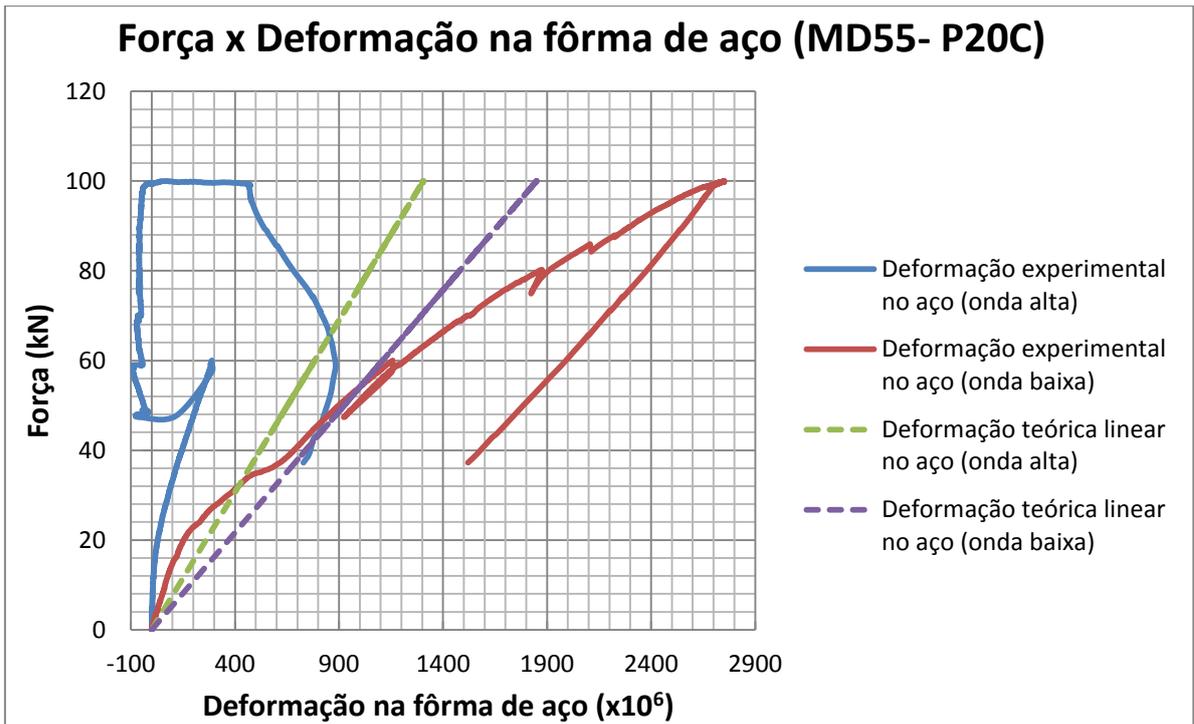


Figura B.15c – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P20c
Força x deformação na fôrma de aço

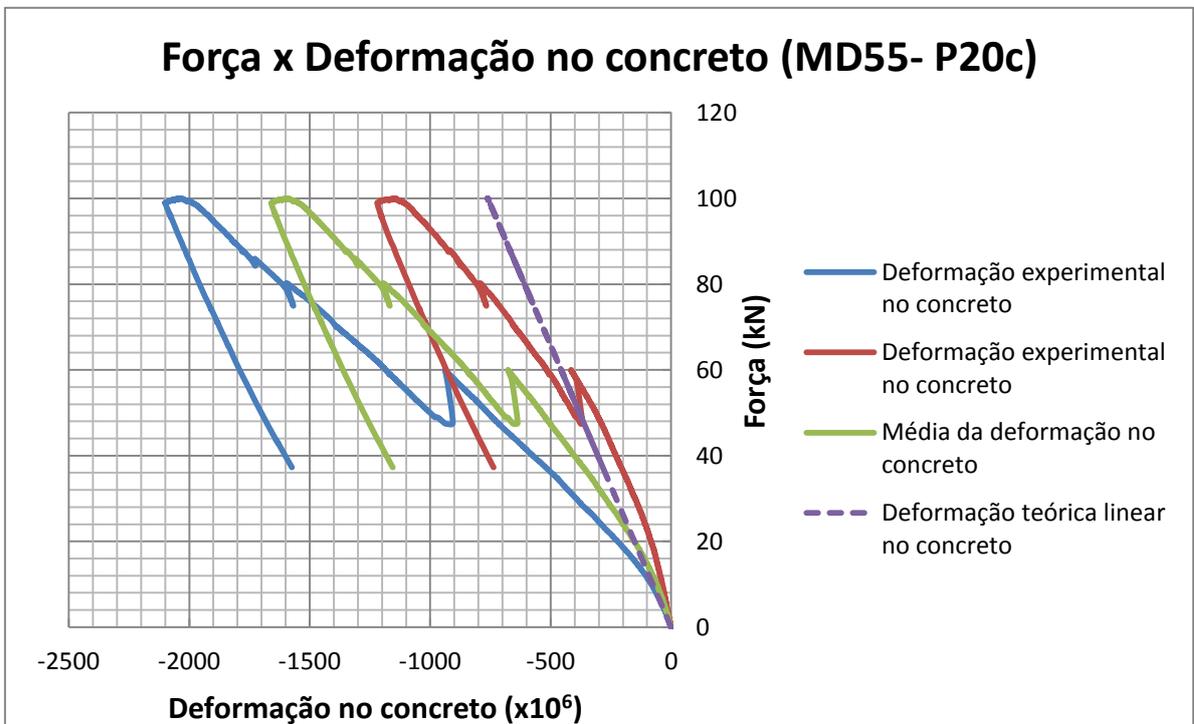


Figura B.15d – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P20c
Força x deformação no concreto

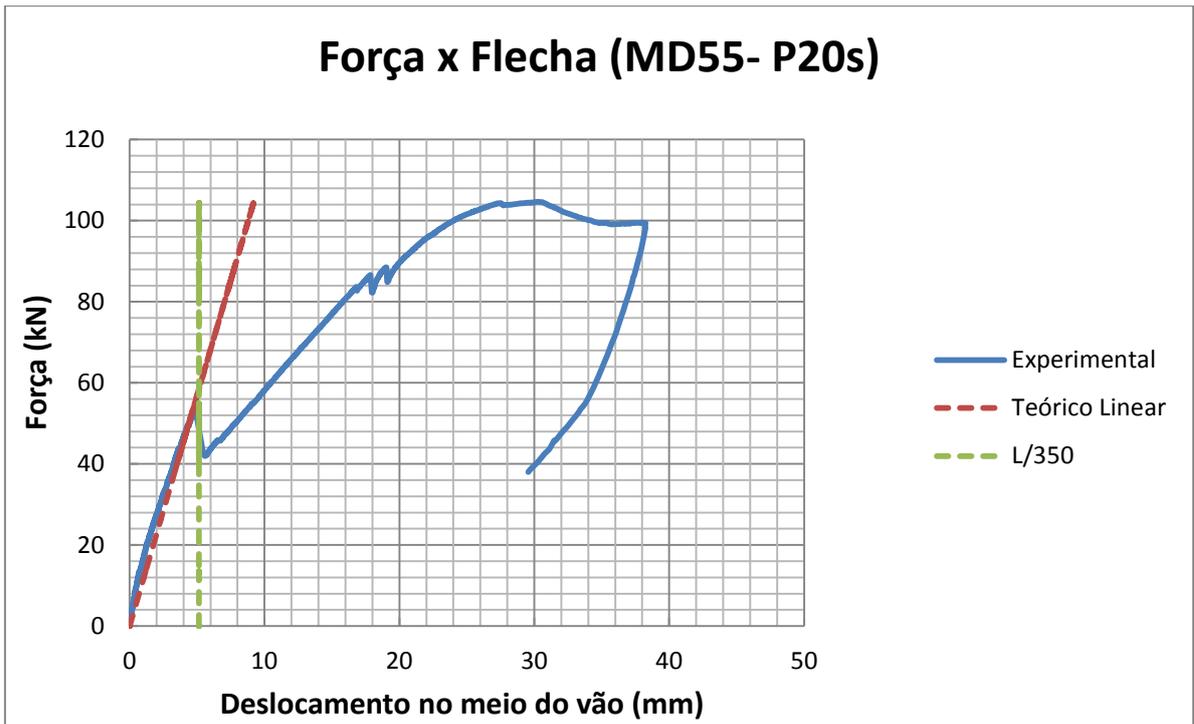


Figura B.16a – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P20s
Força x deslocamento a meio vão (flecha)

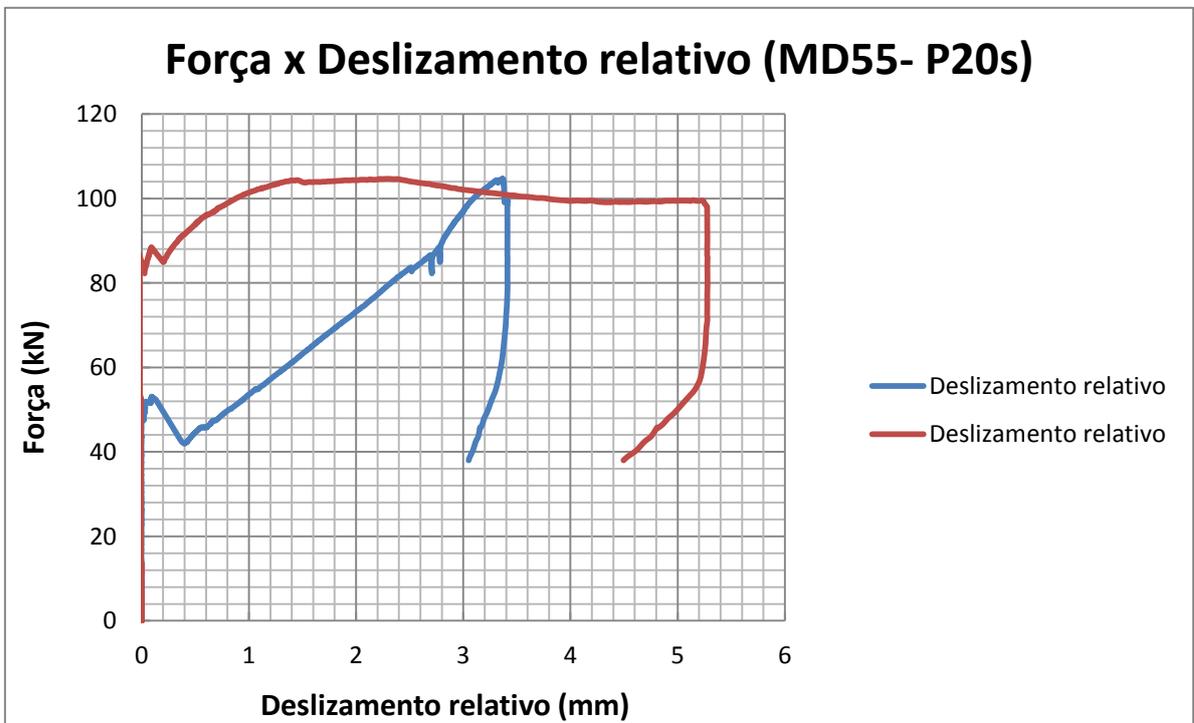


Figura B.16b – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P20s
Força x deslizamento relativo

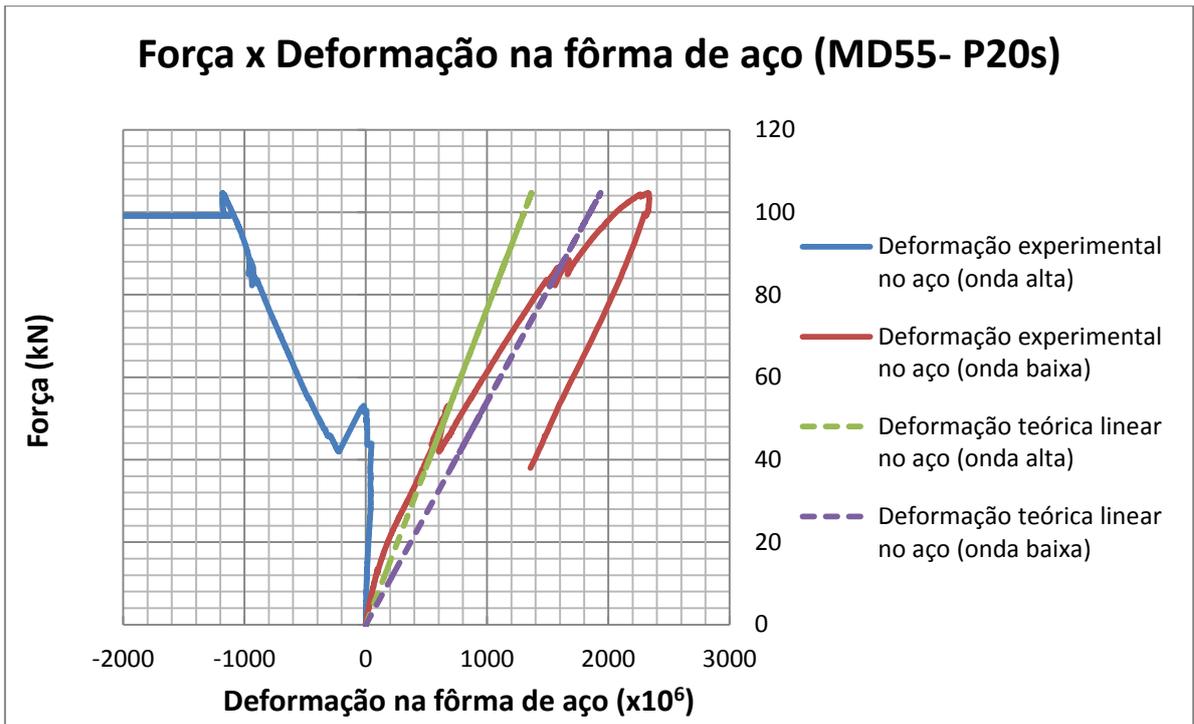


Figura B.16c – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P20s
Força x deformação na fôrma de aço

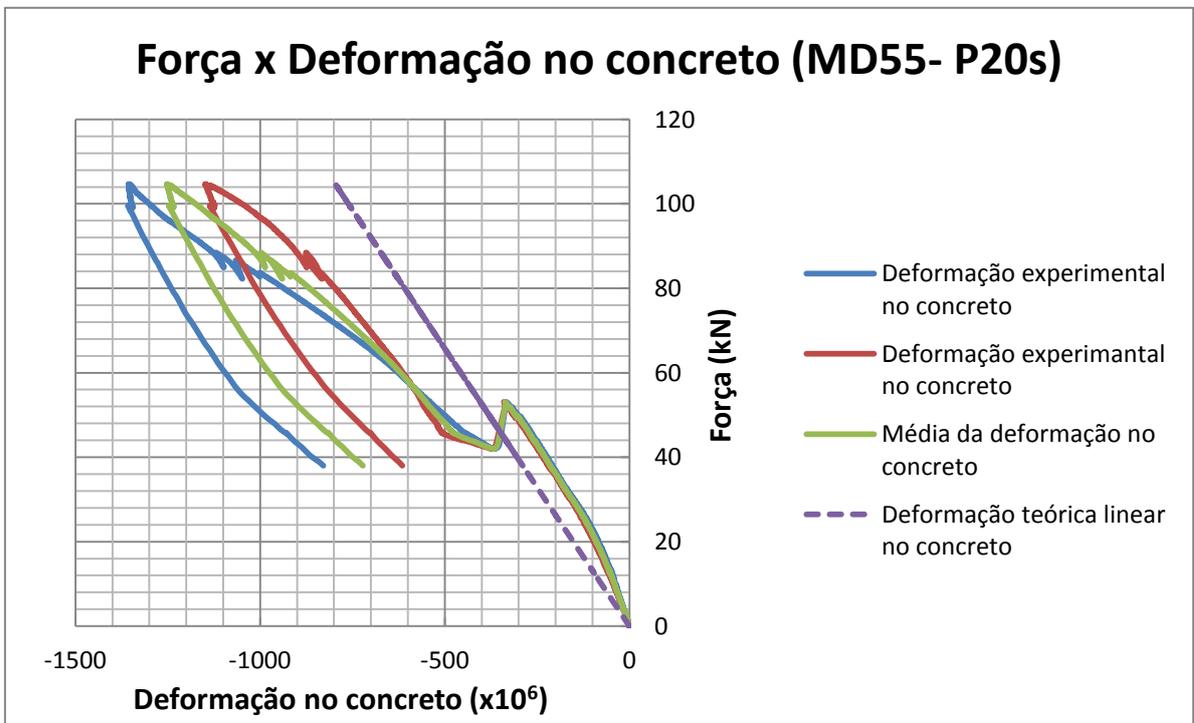


Figura B.16d – Resultados dos ensaios do protótipo MD55-P20s
Força x deformação no concreto