

# **CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E MECÂNICA EXPERIMENTAL DE PAREDES PORTANTES DE ALVENARIA DE PEDRA**

**ANA LUÍSA ZEFERINO GOMES**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS**

---

Orientador: Professor Doutor António José Coelho Dias Arêde

---

Co-Orientador: Professor Doutor João Paulo Sousa Costa de Miranda  
Guedes

JUNHO DE 2012

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2011/2012**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2011/2012 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

A meus Pais e Hugo

*Conhecimento é Poder*

*Francis Bacon*



## **AGRADECIMENTOS**

A presente tese foi realizada no Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto e com a orientação do Professor Doutor António Arêde, a quem eu agradeço a disponibilidade, o profissionalismo, o acompanhamento e a partilha do conhecimento para a minha evolução profissional e pessoal, sem o qual não seria possível a realização deste trabalho.

Grata pela presença e partilha de conhecimento do Professor Doutor João Paulo Miranda Guedes.

Quero agradecer à Engenheira Celeste Almeida pela sua ajuda, disponibilidade e experiência com este tipo de materiais que permitiu a melhor compreensão do seu funcionamento.

Ao Engenheiro Alexandre Costa o meu obrigado pela sua ajuda e experiência para a realização dos ensaios.

Aos colaboradores do Laboratório de Engenharia Civil, em especial ao senhor Valdemar Luís e André Martins, o meu agradecimento pelo trabalho prestado que tornaram possível a realização de todos os ensaios.

Obrigada aos meus colegas pelo apoio.

Finalmente, à minha família a minha gratidão por tudo o que fazem por mim em especial aos meus pais e Hugo por todo o carinho.



## RESUMO

Esta dissertação integra-se num trabalho de investigação, desenvolvido no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, que pretende contribuir para uma melhor compreensão do comportamento mecânico das paredes de alvenaria de pedra e sua possível relação com as características geométricas das paredes.

Após uma fase de levantamento geométrico, relativo ao arranjo das pedras e espessura de juntas de paredes de alvenaria de pedra construídas no laboratório, procedeu-se à análise experimental do comportamento mecânico de doze painéis de parede recorrendo a ensaios planos de corte com compressão. Os painéis foram subdivididos em quatro grupos de regularidade geométrica, nomeadamente regulares, parcialmente regulares, irregulares e muito irregulares, e sujeitas a ensaios para três níveis de esforço axial de 150kN, 300kN e 450kN.

Realizou-se todo o acompanhamento dos ensaios, processamento e análise dos respetivos resultados de painéis de paredes de alvenaria de pedra já existentes no laboratório, permitindo conhecer o tipo de rotura exibida sob ações de corte com compressão no plano, nomeadamente de *rocking*, corte, escorregamento ou misto dos anteriores.

O trabalho realizado permitiu a determinação de parâmetros mecânicos para o aperfeiçoamento do conhecimento e caracterização deste tipo de paredes, destacando-se valores de forças e deslocamentos máximos atingidos, estimativas de rigidez inicial e ductilidade, bem como uma apreciação qualitativa da capacidade de dissipar energia. Através da comparação dos correspondentes resultados procurou-se extrair algumas conclusões sobre a influência da tipologia de parede e do nível de esforço axial nos valores daqueles parâmetros.

PALAVRAS-CHAVE: paredes de alvenaria de pedra, caracterização, mecânica, corte, compressão, ductilidade, regularidade.



## **ABSTRACT**

This thesis focused on part of an investigation work, developed at the Laboratory of Seismic and Structural Engineering (LESE) of the Civil Engineering Department of the Faculty of Engineering of the University of Porto, aiming at contributing to a better understanding on the geometrical characteristics and the behavior of mechanics of stone masonry.

After the survey geometry on the arrangement of the rocks and joints, the experimental analysis of the mechanical behavior of twelve wall panels was made by means of shear-compression tests. The analysis of the mechanical shear behavior was performed for four groups of geometric regularity, considered regular, partially regular, irregular and very irregular. These walls were subjected to distinct levels of axial load, such as 150kN, 300kN and 450kN.

The monitoring, processing and comparative analysis of the stone masonry wall panels, existing in lab and tested during the time period of this thesis work, turned it possible to know the mechanical shear response under cyclic lateral displacement, namely rocking, sliding and diagonal shear.

The objective of this study was the determination of the parameters to provide better knowledge of this kind of walls, namely concerning maximum horizontal force, energy dissipation and ductility. By comparing the corresponding results, some conclusions were drawn about the influence of wall type and level axial force.

**KEYWORDS:** stone masonry walls, geometric and mechanical characterization, regularity, shear, strength, ductility.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. ENQUADRAMENTO .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	2
<b>2. DESCRIÇÃO DO COMPORTAMENTO EM CORTE COM COMPRESSÃO E ENSAIOS EXPERIMENTAIS</b> .....	3
2.1. COMPORTAMENTO EM CORTE COM COMPRESSÃO .....	3
2.2. ENSAIOS EXPERIMENTAIS .....	4
<b>3. CAMPANHA EXPERIMENTAL</b> .....	9
3.1. INTRODUÇÃO E ENQUADRAMENTO .....	9
3.2. DESCRIÇÃO DOS MODELOS .....	12
3.3. ESQUEMA DE ENSAIO E METODOLOGIAS DE TRATAMENTO DE DADOS .....	12
<b>4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	19
4.1. TIPOS DE RESULTADOS, APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO .....	19
4.2. PAREDES TIPO R .....	21
4.2.1. ENSAIO R4 .....	21
4.2.2. ENSAIO R5 .....	27
4.2.3. ENSAIO R6 .....	33
4.3. PAREDES TIPO PR .....	40
4.3.1. ENSAIO PR4 .....	40
4.3.2. ENSAIO PR5 .....	46
4.3.3. ENSAIO PR6 .....	53
4.4. PAREDES TIPO IR .....	60
4.4.1. ENSAIO IR4 .....	60

4.4.2. ENSAIO IR5.....	67
4.4.3. ENSAIO IR6.....	74
<b>4.5. PAREDES TIPO IR++ .....</b>	<b>80</b>
4.5.1. ENSAIO IR4++ .....	80
4.5.2. ENSAIO IR5++ .....	87
4.5.3. ENSAIO IR6++ .....	93
<b>4.6. SÍNTESE DE RESULTADOS .....</b>	<b>99</b>
4.6.1. RESULTADOS GLOBAIS .....	99
4.6.2. RESULTADOS LOCAIS .....	106
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>109</b>
5.1. RESUMO DAS CONCLUSÕES PRINCIPAIS.....	109
5.2. PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	110
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>111</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>115</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 – Mecanismos de rotura de paredes de alvenaria de pedra .....	3
Fig. 2.2 – Padrão de deslocamentos de dentes-de-serra .....	4
Fig. 2.3 – Condições de apoio, Costa (2007) .....	5
Fig. 2.4 – Deformação tipo do sistema em consola, Costa (2007) .....	5
Fig. 2.5 – Deformação tipo do sistema duplamente encastrado, Costa (2007) .....	5
Fig. 2.6 – Diagramas tipo força/deslocamento, Vasconcelos (2005).....	6
Fig. 2.7 – Diagrama tipo força/deslocamento, envolvente e envolvente bilinear, Costa (2007) .....	6
Fig. 2.8 – Diagrama tipo da envolvente do comportamento cíclico e curva bilinear, Frumento (2009) ..	7
Fig. 2.9 – Esquema de forças.....	8
Fig. 3.1 – Parede de alvenaria de pedra regular (R), Almeida (2012) .....	9
Fig. 3.2 – Parede de alvenaria de pedra parcialmente regular (PR), Almeida (2012) .....	9
Fig. 3.3 – Parede de alvenaria de pedra irregular (IR), Almeida (2012) .....	10
Fig. 3.4 – Parede de alvenaria de pedra muito irregular (IR++), Almeida (2012) .....	10
Fig. 3.5 – Levantamento geométrico da parede de alvenaria de pedra.....	11
Fig. 3.6 – Esquema em 3D .....	11
Fig. 3.7 – Parede de alvenaria de pedra com juntas preenchidas, Almeida (2012) .....	11
Fig. 3.8 – Modelos das paredes ensaiadas, Almeida (2012) .....	12
Fig. 3.9 – Macaco hidráulico vertical, superfície de deslizamento e célula de carga.....	13
Fig. 3.10 – Estrutura de ensaio e atuador vertical aplicado na maioria dos ensaios .....	13
Fig. 3.11 – Esquema representativo da instrumentação na parede R4, Almeida (2012) .....	14
Fig. 3.12 – Desvio vertical, $d_v$ .....	15
Fig. 3.13 – Desvio horizontal, $d_h$ .....	15
Fig. 3.14 – Diagrama força/deslocamento LVDT60 e LVDT60 corrigido .....	16
Fig. 3.15 – Gráfico da diferença entre LVDT60 e 34 ao longo do tempo.....	17
Fig. 3.16 – Diagrama força/deslocamento LVDT34 e 60 corrigido e média .....	17
Fig. 4.1 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (R4) .....	21
Fig. 4.2 – Resposta das juntas horizontais laterais (R4).....	23
Fig. 4.3 – Deformadas laterais e correspondentes <i>drifts</i> (R4).....	24
Fig. 4.4 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (R5) .....	27
Fig. 4.5 – Resposta das juntas horizontais laterais (R5).....	29
Fig. 4.6 – Deformadas laterais e correspondentes <i>drifts</i> (R5).....	30

Fig. 4.7 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (R6) .....	33
Fig. 4.8 – Resposta das juntas horizontais laterais (R6) .....	35
Fig. 4.9 – Deformadas laterias e correspondentes <i>drifts</i> (R6) .....	36
Fig. 4.10 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (PR4) .....	40
Fig. 4.11 – Resposta das juntas horizontais laterais (PR4) .....	42
Fig. 4.12 – Deformadas laterias e correspondentes <i>drifts</i> (PR4) .....	43
Fig. 4.13 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (PR5) .....	46
Fig. 4.14 – Resposta das juntas horizontais laterais (PR5) .....	48
Fig. 4.15 – Deformadas laterias e correspondentes <i>drifts</i> (PR5) .....	49
Fig. 4.16 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (PR6) .....	53
Fig. 4.17 – Resposta das juntas horizontais laterais (PR6) .....	55
Fig. 4.18 – Deformadas laterias e correspondentes <i>drifts</i> (PR6) .....	56
Fig. 4.19 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (IR4) .....	60
Fig. 4.20 – Resposta das juntas horizontais laterais (IR4) .....	62
Fig. 4.21 – Deformadas laterias e correspondentes <i>drifts</i> (IR4) .....	63
Fig. 4.22 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (IR5) .....	67
Fig. 4.23 – Resposta das juntas horizontais laterais (IR5) .....	69
Fig. 4.24 – Deformadas laterias e correspondentes <i>drifts</i> (IR5) .....	70
Fig. 4.25 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (IR6) .....	74
Fig. 4.26 – Resposta das juntas horizontais laterais (IR6) .....	76
Fig. 4.27 – Deformadas laterias e correspondentes <i>drifts</i> (IR6) .....	77
Fig. 4.28 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (IR4++) .....	80
Fig. 4.29 – Resposta das juntas horizontais laterais (IR4++) .....	82
Fig. 4.30 – Deformadas laterias e correspondentes <i>drifts</i> (IR4++) .....	83
Fig. 4.31 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (IR5++) .....	87
Fig. 4.32 – Resposta das juntas horizontais laterais (IR5++) .....	89
Fig. 4.33 – Deformadas laterias e correspondentes <i>drifts</i> (IR5++) .....	90
Fig. 4.34 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (IR6++) .....	93
Fig. 4.35 – Resposta das juntas horizontais laterais (IR6++) .....	95
Fig. 4.36 – Deformadas laterias e correspondentes <i>drifts</i> (IR6++) .....	96
Fig. 4.37 – Envoltentes dos ciclos histeréticos para os diferentes níveis de esforço axial, por tipo de parede .....	99
Fig. 4.38 – Rigidez elástica .....	100
Fig. 4.39 – Variação da força horizontal máxima .....	101

Fig. 4.40 – Variação da ductilidade máxima.....	102
Fig. 4.41 – Valores originais e corrigidos da ductilidade máxima .....	103
Fig. 4.42 – Envolventes dos ciclos histeréticos por nível de esforço axial.....	104
Fig. 4.43 – Variação da força horizontal atingida para níveis semelhantes de deslocamentos .....	105
Fig. 4.44 – Variação da ductilidade para níveis semelhantes de deslocamentos.....	106
Fig. 4.45 – Variação da abertura máxima de juntas.....	107



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Desvios vertical e horizontal.....	16
Tabela 3.2 – Deslocamentos.....	16
Tabela 3.3 – Deslocamentos à mesma altura.....	17
Tabela 4.1 – Parâmetros obtidos da envolvente (R4).....	21
Tabela 4.2 – Parâmetros obtidos da envolvente (R5).....	27
Tabela 4.3 – Parâmetros obtidos da envolvente (R6).....	33
Tabela 4.4 – Parâmetros obtidos da envolvente (PR4).....	40
Tabela 4.5 – Parâmetros obtidos da envolvente (PR5).....	46
Tabela 4.6 – Parâmetros obtidos da envolvente (PR6).....	53
Tabela 4.7 – Parâmetros obtidos da envolvente (IR4).....	60
Tabela 4.8 – Parâmetros obtidos da envolvente (IR5).....	67
Tabela 4.9 – Parâmetros obtidos da envolvente (IR6).....	74
Tabela 4.10 – Parâmetros obtidos da envolvente (IR4++).....	80
Tabela 4.11 – Parâmetros obtidos da envolvente (IR5++).....	87
Tabela 4.12 – Parâmetros obtidos da envolvente (IR6++).....	93



## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

LESE – Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural

R – Regulares

PR – Parcialmente Regulares

IR – Irregulares

IR++ - Muito Irregulares

LVDTs – Transdutores de deslocamento

d – deslocamento em mm

$\mu$  - ductilidade

$\delta_u$  – deslocamento último

$\delta_y$  – deslocamento de cedência

$M_e$  – momento estabilizador

N – esforço axial

L – largura

h – altura

H – força horizontal

$M_d$  – momento derrubador

dv – desvio vertical

dh – desvio horizontal

dn – deslocamento norte

ds – deslocamento sul

b – distância do centro da parede à face

$\theta$  – rotação

$d_{35}$  – deslocamento LVDT35

$d_{36}$  – deslocamento LVDT36

$L_{35,36}$  – distância entre LVDT35 e 36

N – Norte

S – Sul

$K_e$  – rigidez elástica



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

Com a crescente preocupação na preservação da história e do património, a reconstrução do património edificado assume um papel cada vez mais importante na construção civil.

A pedra é o material mais antigo usado na construção e tem vindo a ser substituído pelo betão e aço em que as suas características e propriedades são bastante conhecidas. Muitos dos edifícios foram construídos recorrendo a paredes de alvenaria de pedra e, como as suas características mecânicas não são muito conhecidas e dependem da sua forma construtiva, é importante aprofundar o seu estudo e assim adequar técnicas de intervenção por forma a desenvolver um projeto de um edifício de forma segura.

A presente tese enquadra-se neste contexto, tendo sido desenvolvida no seio de um grupo de investigação que há vários anos se dedica a este tema, não só na vertente de estruturas de edifícios, como também de outro tipo de construções de alvenaria de pedra como sejam pontes, Costa (2002), Costa (2007), Costa (2009), igrejas, Costa (2005), Arêde (2008), Arêde *et al.* (2012), castelos, Costa (2009), monumentos, Costa (2009), etc.

Esta atividade de investigação tem procurado abarcar diversos temas, tais como a caracterização geométrica, física e mecânica dos materiais e elementos constituintes, bem como das estruturas no seu todo, Almeida *et al.* (2010), Almeida *et al.* (2010), Almeida *et al.* (2011), a identificação e classificação de patologias estruturais (e não só) através de inspeções a uma grande diversidade de casos de estudo, o desenvolvimento e aplicação de técnicas de reabilitação e reforço, Costa *et al.* (2006), Arêde *et al.* (2008), Costa *et al.* (2010), Costa *et al.* (2011), estudos numéricos com modelos apropriados aos diversos casos estudados. Toda esta atividade inclui trabalhos numéricos e experimentais de diversos graus de sofisticação e complexidade e vem sendo complementada com várias ações de divulgação, Costa *et al.* (2010), Almeida *et al.* (2010).

Numa vertente mais específica, têm sido desenvolvidos diversos trabalhos relativos ao comportamento sísmico de estruturas de alvenaria de pedra, Almeida (2000), Neves (2004), Lopes (2009), Neves (2012), Costa (2012), devido à particularidade deste tipo de construções quanto à sua resistência à ação dos sismos enquadrando um forte interação de componente experimental, Arêde *et al.* (2008), Costa *et al.* (2009), Costa *et al.* (2012), e/ou numérica, Costa *et al.* (2010), Silva *et al.* (2012), Costa *et al.* (2012).

No âmbito dos estudos já realizados, a pedra usada é o granito que se encontra em grande parte das construções de edifícios com paredes de alvenaria de pedra, principalmente a norte de Portugal e em

particular na cidade do Porto, onde predominam as paredes de folha simples que é o tipo de parede aqui estudado.

Uma parede de alvenaria de pedra é um elemento estrutural heterogéneo, constituído na maior parte de pedras e argamassa com ligações e interações complexas, afirmado em Almeida (2011).

## **1.2. OBJETIVOS**

Este estudo teve como objetivo principal o acompanhamento, processamento e análise de ensaios de compressão e corte com compressão realizados em laboratório.

No âmbito da caracterização mecânica para ensaios de compressão houve a necessidade de construção de novos painéis de parede de alvenaria de pedra, que permitiu o acompanhamento e o levantamento geométrico, para assim se poder relacionar as características geométricas com a mecânica destas paredes. Face às disponibilidades do laboratório a concretização dos ensaios de compressão não foi possível mas permitiu aprendizagem sobre as várias técnicas de construção, com argamassas de cal com dosagens controladas, para no futuro distinguir qual seria uma melhor técnica de intervenção e mesmo de construção deste tipo de paredes.

O estudo acabou por incidir nos ensaios de corte com compressão que foi fundamental para perceber o funcionamento das paredes de alvenaria de pedra, já existentes no laboratório, e o tipo de rotura que lhes está associada.

Esta dissertação vem ajudar à melhor compreensão do comportamento das paredes de alvenaria de pedra e da necessidade deste tipo de ensaios, porque a influência do tipo de geometria de parede é importante relativamente aos resultados que se obtêm, permitindo um maior conhecimento em relação às características esperadas e seus comportamentos.

## **1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos.

Neste primeiro capítulo consta o enquadramento e os objetivos propostos para o desenvolvimento deste estudo.

O objetivo desta investigação teve por base um estudo experimental a decorrer no laboratório que é o objeto de estudo dos restantes capítulos. Estando a descrição dos ensaios de corte com compressão e a descrição do comportamento mecânico tipo esperado presentes no segundo capítulo.

No terceiro capítulo é apresentada uma introdução e enquadramento do estudo experimental, uma descrição dos modelos, do tipo de ensaio e metodologias usadas.

A análise, discussão dos resultados e comparação dos mesmos são apresentados no capítulo quatro.

O capítulo cinco contém a síntese das conclusões finais e propostas de desenvolvimento futuro.

## 2

## DESCRIÇÃO DO COMPORTAMENTO EM CORTE COM COMPRESSÃO E ENSAIOS EXPERIMENTAIS

### 2.1. COMPORTAMENTO EM CORTE COM COMPRESSÃO

As paredes de alvenaria de pedra são adequadas para suportar cargas de compressão, no entanto têm baixa resistência ao corte, Tomazevic (2008).

As paredes de alvenaria quando sujeitas a cargas verticais e horizontais têm comportamentos característicos, tais como o deslizamento por corte, abertura de fendas nas diagonais principais e flexão ou rotação (*rocking*) da parede.

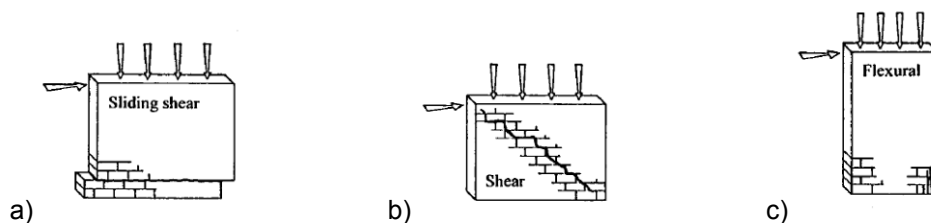


Fig. 2.1 – Mecanismos de rotura de paredes de alvenaria, a) deslizamento por corte, b) rotura diagonal por corte, c) flexão, Tomazevic (1999).

A rotura por deslizamento ocorre essencialmente quando a carga vertical é menor e para uma argamassa de fraca qualidade, caracteriza-se pela formação de uma fenda horizontal ao longo da junta em que há perda de atrito. Neste mesmo tipo de condições também se pode vir a verificar *rocking*, pois a resistência à tração da argamassa é reduzida, Tomazevic (2008).

Quando há abertura de fendas na parede, orientadas segundo uma ou duas diagonais, quer dizer que a resistência ao corte não é suficiente para resistir à carga imposta. Este tipo de rotura é causado por tensões principais diagonais que são desenvolvidas quando sujeitas a uma combinação de esforços, vertical e lateral.

Uma combinação destes comportamentos é possível em alguns ensaios, como por exemplo *rocking* e deslizamento. No início de cada ensaio é compreensivo que aconteça *rocking* mas ao desenvolver fissuras diagonais na parte central da parede e a resistência diminuir até haver rotura por corte, podemos afirmar que foi uma rotura por corte e não por *rocking*.

## 2.2. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Ensaio experimentais realizados em laboratório são importantes para o estudo dos materiais, pois são efetuados em ambientes controlados e seguros. É possível percebermos as suas características e comportamentos quando sujeitos a esforços e assim melhorar e adequar novas técnicas de intervenção e de construção. Os ensaios de corte com compressão aplicados às paredes de alvenaria de pedra consistem em ensaios quase-estáticos no plano e são destrutivos. O carregamento pode ser controlado por controlo da força, do deslocamento e misto força/deslocamento, pré-definindo um padrão de deslocamentos ou forças.

O método por controlo da força lida da célula de carga do atuador hidráulico é normalmente usado quando se pretende ter uma força constante, neste caso utilizada para a aplicação do esforço axial, ou ainda uma força variável, mas nestes casos deverá ser realizado com redobrada precaução, por razões de segurança em de ser mais difícil controlar a velocidade do ensaio sobre modelos em fase de rotura frágil. De facto, com controlo da força, a rotura pode ocorrer rapidamente depois de atingir o valor máximo, não permitindo manter a estrutura numa posição segura porque o atuador irá tentar chegar à força que lhe foi imposta, sem encontrar a devida reação, e assim colocar pessoas e bens em perigo.

O controlo por deslocamento é o mais aconselhado porque permite acompanhar a evolução da força sem que haja preocupação do decréscimo desta ou mesmo da rigidez e ainda impor uma velocidade variável ao longo do tempo, por exemplo, adotar uma velocidade nos deslocamentos iniciais e aumentá-la para deslocamentos maiores, conseguindo assim levar a estrutura ao limite dentro de um tempo de ensaio aceitável; porém, com o sistema de controlo adotado não é possível alterar a velocidade durante o ensaio. O deslocamento é controlado por transdutores associados aos macacos hidráulicos e também o pode ser por transdutores externos embora tal não esteja ainda contemplado no sistema de controlo.

O sistema por força/deslocamento é usado nas situações em que é necessário controlar vários atuadores em simultâneo e tanto a força como o deslocamento têm de ser devidamente controlados.

A imposição de uma lei de deslocamento com evolução linear crescente permite obter a curva de comportamento monotónico da parede, enquanto um padrão de deslocamento do tipo dentes-de-serra (figura 2.2) permite o estudo da sua resposta cíclica e da sua histerese, Costa (2007).

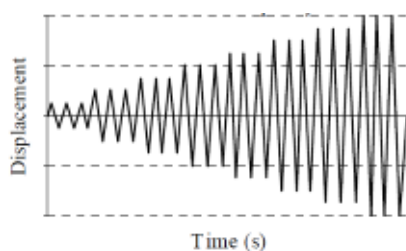


Fig. 2.2 – Padrão de deslocamentos de dentes-de-serra.

Quando o objetivo é estudar um sistema flexível, as condições de apoio deverão ser em consola, simulando pavimentos flexíveis apoiados nas paredes; quando os pavimentos são rígidos, como por exemplo de betão armado (aligeirado ou não), estes impõe alguma limitação de rotação e é mais razoável admitir condições de restrição correspondentes a um elemento duplamente encastrado (figura 2.3).

Nestes casos, a deformação esperada para um sistema em consola seria o da figura 2.4, caso fosse possível materializar um encastramento perfeito em laboratório a sua deformação seria o da figura 2.5.

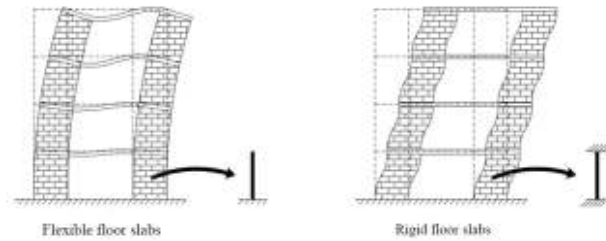


Fig. 2.3 – Condições de apoio, Costa (2007).

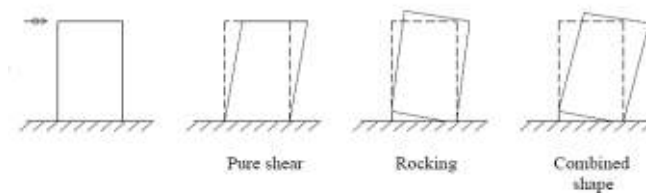


Fig. 2.4 – Deformação tipo do sistema em consola, Costa (2007).

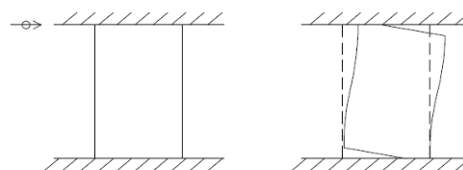


Fig. 2.5 – Deformação tipo do sistema duplamente encastrado, Costa (2007).

Nos ensaios realizados neste estudo adotou-se o esquema em consola porque a situação típica das paredes de alvenaria de pedra nos edifícios antigos a preservar baseiam-se em pavimentos flexíveis.

Por outro lado, outros estudos anteriores (Almeida *et al.* (2011), Vasconcelos (2005)) foram realizados segundo o esquema em consola (portanto rotação livre no topo), conduzindo a respostas em que se nota um comportamento predominante de flexão e outros mistos, pelo que, a fim de proporcionar termos de comparação optou-se por adotar também este esquema de ensaio.

A resposta no plano dos ensaios de paredes de alvenaria de pedra é tipicamente descrita pelos diagramas histeréticos força/deslocamento da figura 2.6 a) e b). Observa-se uma forma marcada em S que representa um mecanismo de flexão, habitualmente designado de *rocking* por se assemelhar a um movimento de corpo rígido, que caracteriza a deformação deste tipo de paredes sob a ação de carga cíclica e sob um nível baixo de compressão. As paredes exibem uma resposta não-linear significativa sem perda de força ou degradação da rigidez, que confirma que não ocorreram roturas nas pedras, conforme se observa por exemplo em ensaios realizados por Vasconcelos (2005). Embora uma grande parte dos deslocamentos laterais vá sendo recuperada, as paredes exibem deslocamentos plásticos que se acumulam durante a inversão de carga. Apesar dos grandes deslocamentos laterais, está associada a

estas paredes uma baixa capacidade de dissipar energia. Paredes de alvenaria irregular mostram significativamente maior histerese, e assim maior dissipação de energia, sendo que deformações residuais no nível zero da força horizontal indicam aberturas de fendas diagonais.

Quando os níveis de compressão são maiores, a forma do diagrama difere, mesmo para deformações moderadas, e os ciclos de histerese indicam maior dissipação de energia, que se torna mais significativa após a carga de pico ser alcançada (figura 2.6 b)), Vasconcelos (2005).

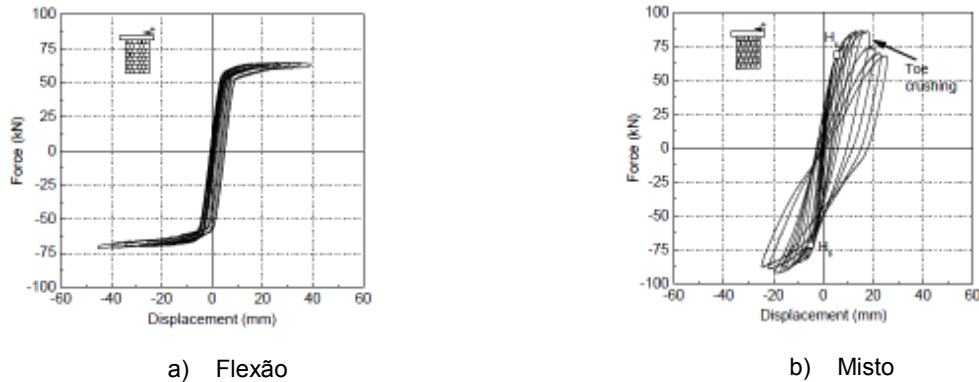


Fig. 2.6 – Diagramas tipo força/deslocamento, Vasconcelos (2005).

Apesar de se referirem a alvenaria de tijolo, ensaios realizados no âmbito de outros trabalhos (Costa (2007)) evidenciam comportamento do mesmo género, conforme se pode observar no diagrama de resposta cíclica ilustrada na figura 2.7 a), onde se inclui também a definição da respetiva envolvente que constitui uma aproximação da curva de comportamento monotónico. Na figura 2.7 b) está representada a envolvente bilinear proposta pelo autor.

O comportamento que se observa no diagrama é maioritariamente de flexão e a energia dissipada durante os ciclos é pequena, embora ao longo de todo o ensaio a energia total dissipada já assuma valores consideráveis.

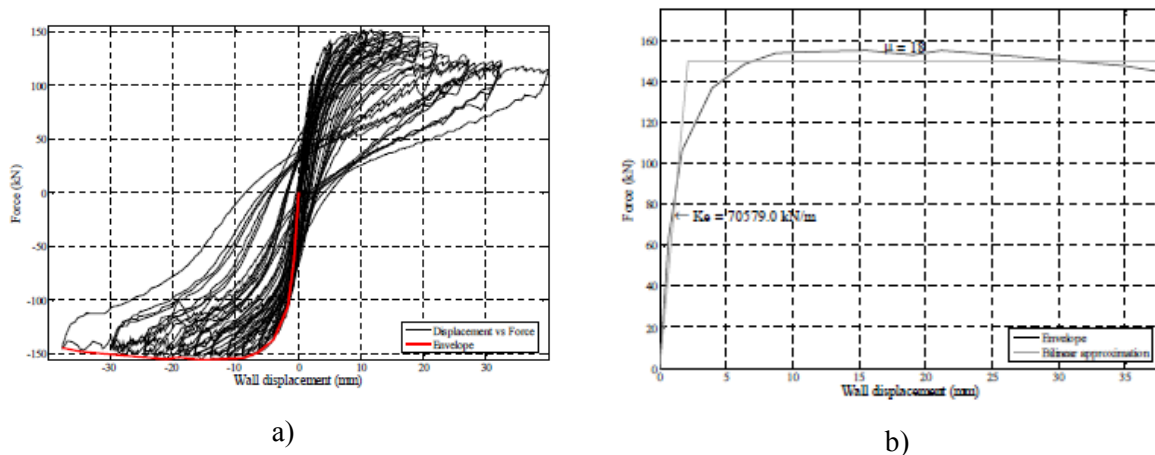


Fig. 2.7 – a) Diagrama tipo força/deslocamento e envolvente e b) Envolvente bilinear, Costa (2007).

A envolvente bilinear, relativa ao mesmo ensaio (figura 2.7 b)) realizado por Costa (2007), foi uma má aproximação, apesar de esta reproduzir bem o comportamento pós-pico e a força máxima, mas

sobrestima a rigidez elástica, provocando uma ductilidade errada. Podem ser considerados responsáveis por estes resultados três grandes problemas: a rigidez elevada associada ao comportamento da fase inicial do ensaio, conduzindo a uma ductilidade errada; o cálculo da envolvente, pois considera o ponto de força máxima atingida no deslocamento máximo em cada fase (apenas pontos individuais); e ter sido considerado uma redução máxima da força de 60%, Costa (2007).

Também de acordo com Frumento (2009), uma curva bilinear representa uma aproximação possível da envolvente do comportamento cíclico das paredes e pode ser obtida pela igualdade de áreas, isto é, a área delimitada pela envolvente do ciclo é igual à área da curva bilinear que, na proposta referida, envolve um ramo linear ascendente seguido de um patamar “plástico”.

Como mostra a figura 2.8, depois de se ter atingido a força máxima num ensaio real, é considerado deslocamento último aquele para o qual se atinge (em fase de perda de resistência) uma força 20% inferior à força máxima registada no ensaio. O valor da força  $V_{cr}$  considerada como a força de primeira fissuração (ou abertura de junta), é assumida igual a 70% da força máxima encontrando-se o respetivo ponto na primeira reta da curva bilinear e permitindo determinar desta forma a rigidez elástica ( $k_e$ ). A segunda reta é elaborada de forma a igualar as áreas e, com a interseção das duas retas, é possível o cálculo do deslocamento de cedência ( $\delta_e$  ou  $\delta_y$ ).

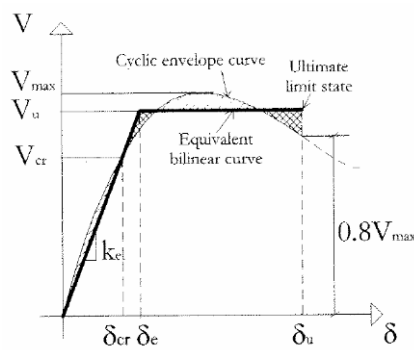


Fig. 2.8 – Diagrama tipo da envolvente do comportamento cíclico e curva bilinear, Frumento (2009).

A partir do diagrama obtido para a força horizontal/deslocamento, da respetiva envolvente aproximação bilinear, é possível também estimar valores da ductilidade (expressão 2.1), que consiste na relação entre o deslocamento último ou máximo ( $\delta_u$ ) e o deslocamento de cedência ( $\delta_y$ ), parâmetros importantes da resposta cíclica em corte e necessários para a comparação de resultados.

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (2.1.)$$

Com a comparação dos estudos já realizados, verifica-se serem semelhantes o comportamento das paredes ensaiadas e as dificuldades para estimar os parâmetros.

Ao considerar o comportamento de *rocking* para baixos níveis de esforço axial é possível, por equilíbrio do sistema, estimar um valor limite superior da resistência horizontal da parede com base no esquema evidenciado na figura 2.9. De fato, considerando que, para haver equilíbrio, o momento

estabilizador ( $M_e$ ), expressão 2.2, deve ser igual ao momento derrubador ( $M_d$ ), expressão 2.3, então a força ( $H$ ) é calculável pela igualdade das expressões, em que  $h$  é a altura da parede,  $L$  a largura da parede e  $N$  é o esforço axial imposto, que se admite equilibrado por uma reação vertical concentrada no canto inferior da parede (e sem contar o peso próprio da parede).

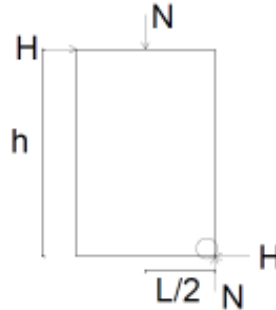


Fig. 2.9 – Esquema de forças

$$M_e = N \times L/2 \quad (2.2)$$

$$M_d = H \times h \quad (2.3)$$

No caso do comportamento de corte e/ou deslizamento, a previsão de resistência lateral da parede já não é tão simples por ser mais dependente das características resistentes, ao corte e de atrito, do material alvenaria.

De igual forma, a capacidade de deformação, a histerese e a perda de rigidez não são fáceis de estimar, porque dependem muito da tipologia da parede. De facto, apesar de haver semelhanças no andamento global da resposta das paredes, não é fácil prever o comportamento durante o carregamento, devido a este depender muito do arranjo e dimensões das pedras que constituem a parede. Torna-se assim evidente a necessidade de prosseguir com o estudo deste tipo de alvenaria para um maior conhecimento dos parâmetros e comportamentos, de forma a tornar este tipo de construção, um método seguro e inquestionável para aqueles que trabalham e irão trabalhar com este tipo de paredes.

# 3

## ESTUDO EXPERIMENTAL

### 3.1. INTRODUÇÃO E ENQUADRAMENTO

Esta investigação enquadra-se num estudo mais vasto que tem como um dos objetivos investigar relações entre as características mecânicas de paredes e a sua regularidade geométrica. No âmbito de uma tese de Doutoramento Almeida (2012), este tipo de análise pretende “catalogar as paredes em diferentes tipologias, com base na percentagem de pedras, argamassa e vazios, associando-os a características mecânicas”, Mota (2009).

No contexto da referida tese de Doutoramento, os ensaios foram realizados com painéis de paredes construídas em laboratório e já caracterizadas geometricamente, apresentadas de seguida quanto à sua regularidade.



Fig. 3.1 – Parede de alvenaria de pedra regular (R), Almeida (2012).



Fig. 3.2 – Parede de alvenaria de pedra parcialmente regular (PR), Almeida (2012).



Fig. 3.3 – Parede de alvenaria de pedra irregular (IR), Almeida (2012).



Fig. 3.4 – Parede de alvenaria de pedra muito irregular (IR++), Almeida (2012).

Na sequência e âmbito dos trabalhos acima referidos, procurou-se também contribuir para completar a caracterização de tipologias construtivas de paredes de folha simples. Assim, no início deste trabalho foi possível acompanhar a construção de mais dois novos painéis de alvenaria de pedra, destinados também a ensaios de compressão simples e corte com compressão, parte dos quais se previa poderem ser também aqui brevemente analisados e reportados. Porém, devido a atrasos nos trabalhos de construção e à vasta quantidade de ensaios entretanto realizados no laboratório, esse objetivo acabou por não ser possível.

Não obstante, o acompanhamento da construção desses novos painéis constituiu uma fonte de aprendizagem importante neste domínio e permitiu contribuir para a sua caracterização geométrica.

Com o levantamento geométrico poder-se-ão encontrar parâmetros que permitem definir classes de regularidade da forma geométrica das pedras. No entanto este estudo foi desenvolvido no âmbito da referida tese de Doutoramento, Almeida (2012), e também abordado numa dissertação de Mestrado de Engenharia Civil, Sousa (2010), não constando portanto nos objetivos de estudo da presente dissertação. Com esta caracterização geométrica pretende-se relacionar a geometria da parede e das pedras que a constituem com os parâmetros obtidos pela análise dos resultados dos ensaios experimentais.

O levantamento geométrico consistiu na medição das pedras de granito que constituíam a parede de alvenaria de pedra que se destina a ensaios de compressão e corte com compressão. A medição foi realizada com recurso a uma fita métrica, medindo a linha média na horizontal e vertical de cada pedra, para aproximação a um retângulo. Mediram-se também as juntas permitindo assim saber com maior exatidão a real distância entre pedras uma vez que estas na proximidade das juntas ficarão parcialmente cobertas de argamassa de cal quando finalizada a construção da parede.

As pedras usadas na construção da parede são maioritariamente de grande dimensão e de geometria regular.

Com o auxílio a fotografias, as medições serviram para fazer o esquema da parede no programa de AutoCAD, como mostra a figura 3.5, como também o seu aspecto em 3D (figura 3.6). As linhas verticais visíveis na imagem são a linha por onde se vai cortar por forma a dividir a parede em seis painéis.



Fig. 3.5 – Levantamento geométrico da parede de alvenaria de pedra.

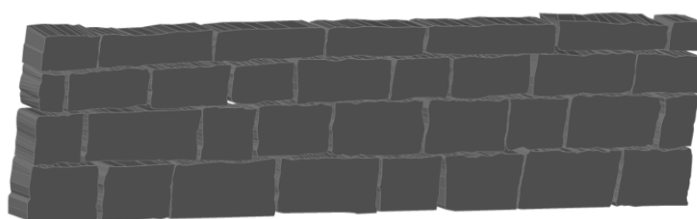


Fig. 3.6 – Esquema em 3D.

A construção desta parede consistiu na colocação de pedras por camadas com interposição de calços de granito. As juntas foram depois fechadas com argamassa, de modo semelhante ao mais comum na construção de paredes de alvenaria; posteriormente foi injetada argamassa comercial de cal pré-doseada, ficando assim uma parede constituída por blocos e calços de pedra e juntas preenchidas por injeção da argamassa de cal, Almeida (2012).



Fig. 3.7 – Pared de alvenaria de pedra com juntas preenchidas, Almeida (2012).

Também foi possível o acompanhamento da construção de uma outra parede, onde foi adotado outro método construtivo, com recurso a calços de madeira, por forma a manter o alinhamento das pedras e, quando finalizada esta fase, foi realizado o preenchimento das juntas com uma argamassa comercial pré-doseada à base de cal e inertes. No final, após apropriado tempo de cura, foram retirados os calços de madeira e preenchidos os pequenos vazios daí resultantes, Almeida (2012).

Por último refere-se que, após a construção, estas paredes são seccionadas em painéis com vista à realização de ensaios experimentais semelhantes aos já referidos e aos aqui descritos, para assim poder comparar os resultados de métodos construtivos diferentes e adequar as técnicas de intervenção neste tipo de paredes.

Além do presente enquadramento, neste capítulo são ainda apresentados os modelos de paredes ensaiadas e a descrição do tipo de ensaio realizado, bem como os resultados globais em termos de diagramas de deslocamento imposto vs força resistente medida com vista a uma apreciação genérica inicial do comportamento obtido.

### 3.2. DESCRIÇÃO DOS MODELOS

Foram realizados doze ensaios experimentais de corte com compressão em paredes de alvenaria de pedra de granito de folha simples, das quais três de cada tipo R, PR, IR e IR++ (Almeida (2012)), como mostra a figura 3.8. Na designação de painel, os dígitos 4, 5 e 6 representam os níveis de esforço axial aplicado no ensaio, 150 kN, 300 kN e 450 kN, respetivamente, a que correspondem tensões verticais de 0.4 MPa, 0.8 MPa e 1.2 MPa.

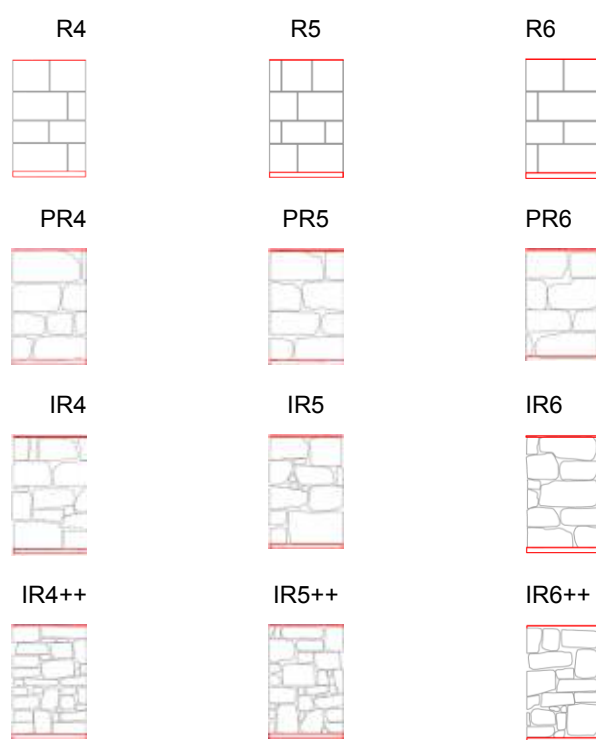


Fig. 3.8 – Modelos das paredes ensaiadas, Almeida (2012).

Os modelos de paredes utilizados tinham 1,20 metros de largura, 1,80 metros de altura e 0,30 metros de espessura. As juntas foram preenchidas com argamassa de cal e saibro.

### 3.3. ESQUEMA DE ENSAIO E METODOLOGIAS DE TRATAMENTO DE DADOS

Os ensaios de corte com compressão baseiam-se num carregamento de um esforço vertical constante distribuído e uma aplicação de deslocamentos cíclicos laterais, previamente definidos, no topo da parede através de atuadores hidráulicos.

O ensaio quase-estático de corte com compressão utilizado neste estudo possibilita a visualização do comportamento da parede ao longo deste e dos modos de rotura. Tal como já referido, as condições de apoio são do tipo consola.

O carregamento imposto, considerando um sistema de controlo por deslocamentos, tem um padrão de deslocamentos de dentes-de-serra de forma a ser possível estudar a resposta histerética da parede, bem como a dissipação de energia.

Para a realização dos ensaios é necessária uma estrutura de reação para resistir aos esforços a que as paredes vão estar sujeitas.

A força vertical foi aplicada através de um atuador hidráulico que, no primeiro ensaio estava suportado no pórtico metálico de reação e atuava sobre uma placa de deslizamento onde existia uma célula de carga para medir a força de atrito. A força horizontal, associada ao deslocamento imposto e aplicada através de um atuador hidráulico, foi registada por meio da respetiva célula de carga; no processamento dos dados a força horizontal final aplicada à parede corresponde à do atuador horizontal reduzida da força de atrito medida na placa de deslizamento.



Fig. 3.9 – Macaco hidráulico vertical, superfície de deslizamento e célula de carga.

Pela análise dos resultados deste primeiro ensaio, optou-se nos restantes ensaios por aplicar a força vertical através de um atuador colocado no topo da parede fazendo reação contra um perfil metálico sobre ele colocado. Este perfil foi amarrado por dois varões de alta resistência do tipo Dywidag, um de cada lado da parede, e ligados ao pórtico através de rótulas que por sua vez estavam aparafusadas a chapas soldadas ao pórtico, como se pode ver na figura 3.10. O atuador vertical empurrava o perfil metálico de reação e assim, pelo equilíbrio de forças, cada varão suportava metade da força imposta à parede que foi registada através de extensómetros instalados nos varões.



Fig. 3.10 – Estrutura de ensaio e atuador vertical aplicado na maioria dos ensaios.

Os dados de deslocamentos obtidos durante os ensaios foram registados e lidos através de transdutores de deslocamento de vareta do tipo LVDTs (Linear Variable Displacement Transducer) e também de fio (do tipo potenciómetro elétrico), colocados em todas as faces das paredes como mostra a figura 3.11.

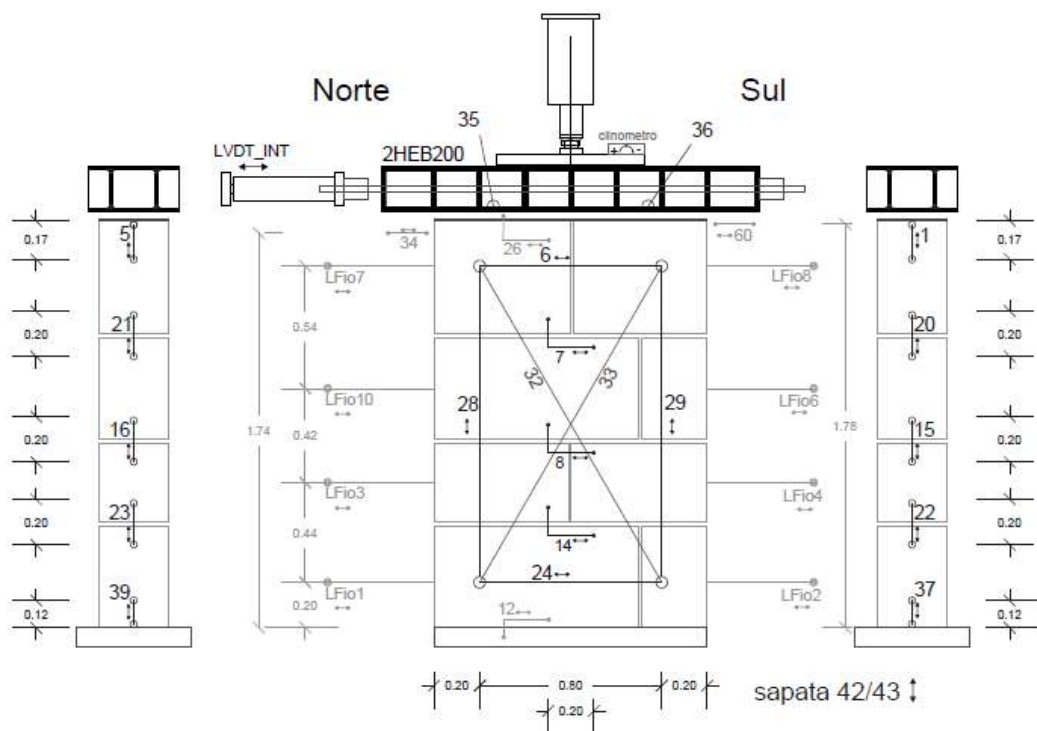


Fig. 3.11 – Esquema representativo da instrumentação na parede R4, Almeida (2012).

Os transdutores do lado norte e sul das paredes servem para perceber qual o comportamento das paredes; por exemplo, quando em ciclo de sentido positivo (deslocamento positivo para sul) os LVDTs do lado norte dão a informação do seu valor com sinal positivo, isto é, os sensores estão a abrir, e o contrário se passa para os do lado sul. Este comportamento poderia significar, por exemplo, que a parede está em flexão, podendo correlacionar esta informação com as leituras de deslocamentos de juntas de modo a poder identificar qual a junta que está a abrir, isto é, onde a parede está a fazer *rocking*.

Também existem sensores no pórtico e na sapata das paredes para controlar se ocorrem movimentos nestes e assim poder corrigir qualquer anomalia.

Antes de se proceder ao tratamento dos resultados com vista à análise da resposta global e local dos doze painéis ensaiados, a resposta temporal de todos os sensores foi traçada e cuidadosamente submetida a uma análise prévia por forma a detetar eventuais problemas que pudessem ter ocorrido. Os gráficos de resposta temporal de todos os sensores encontram-se no Anexo A1.

Dessa análise prévia, face à instrumentação usada e às deformações experimentadas por cada ponto instrumentado, verificou-se ser necessário realizar correções geométricas através de relações de ângulos, para determinar qual o valor real do deslocamento horizontal no plano da parede e assim definir diagramas histórias de deslocamentos realmente experimentadas pelas paredes durante cada ensaio.

De facto, o deslocamento que foi verdadeiramente atingido não foi o medido pelos LVDTs, mas sim a distância na horizontal, entre o ponto de suporte dos sensores e a parede. Isto ficou a dever-se à existência de desvios verticais ( $dv$ ) nos pontos da parede ligados aos sensores, em resultado do deslocamento imposto nos ensaios que produz uma rotação no plano da parede ( $\Theta$ ) medida por um clinómetro colocado no topo da mesma. Esses desvios foram calculados pela expressão 3.1, em que os

deslocamentos medidos na face norte são designados por  $d_n$  e os de sul por  $d_s$ , sendo  $b$  a distância do centro da parede até à respetiva face.

$$dv = \sum dn \text{ ou } ds \pm b \times \theta \quad (3.1.)$$

Nesta equação o sinal usado no cálculo é definido pela condição da localização do sensor, isto é, quando o LVDT é do lado sul então o sinal usado é positivo e se for do lado norte é negativo.

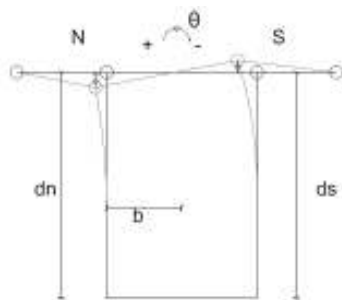


Fig. 3.12 – Desvio vertical,  $dv$ .

Em planta também houve desvios da parede para fora do plano, que no seu topo foram medidos pelos LVDTs 35 e 36, permitindo então calcular a rotação da parede e corrigir os dados de alguns transdutores relativamente ao desvio horizontal ( $dh$ ) da sua posição inicial, através da expressão 3.2.. A distância  $b$  usada nesta correção é a mesma atrás referida, mas a relação de sinais é contrária para o cálculo deste desvio.

$$dh = \frac{d_{35} + d_{36}}{2} \mp \frac{d_{35} - d_{36}}{L_{35,36}} \times b \quad (3.2.)$$

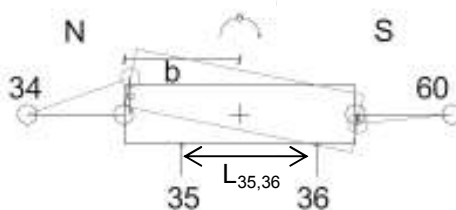


Fig. 3.13 – Desvio horizontal,  $dh$ .

A fim de exemplificar o resultado destas correções, apresenta-se a sua aplicação ao tratamento dos dados relativamente à parede R4.

Inicialmente verificou-se, para um qualquer valor de deslocamento, os deslocamentos obtidos através das correções explicadas anteriormente para os LVDTs 34, 60 e ainda para os LVDTs interno, LFio 7

e 8, para comparação destes quando corrigidos por um fator de relação da altura, isto é, como se estivessem aplicados no mesmo ponto. Definiu-se o ponto para a altura da parede, para assim se obter futuramente os deslocamentos desta.

Para um deslocamento de 11.2 mm, uma inclinação de -4.09 mm/m e obtendo através das medições dos LVDTs 35 e 36 uma rotação de 7.17 mm/m e um deslocamento médio de 9.31 mm, resultou um dn de 3.93 mm e um ds de -1.36 mm, que permitiu calcular os desvios, vertical e horizontal, de cada sensor.

Tabela 3.1. – Desvios vertical e horizontal

LVDT	dv [mm]	dh [mm]
60	-5.62	1.85
LFio8	-3.82	5.01
interno	8.26	16.91
34	7.65	15.83
LFio7	6.38	13.61

Depois de obtidos os desvios, calcularam-se os deslocamentos através da relação do teorema de Pitágoras, determinando primeiro o deslocamento relacionado com o desvio vertical e usando depois este valor para o cálculo do deslocamento final, relacionado com o desvio horizontal.

Tabela 3.2. – Deslocamentos

LVDT	deslocamento inicial [mm]	deslocamento corrigido (dv) [mm]	deslocamento final [mm]
60	-11.17	-11.27	-11.28
LFio8	-10.73	-10.74	-10.76
interno	14.20	14.17	14.04
34	13.50	13.36	12.77
LFio7	11.95	11.91	11.75

Para uma apreciação global das correções, por exemplo, para o LVDT 60, observe-se o gráfico de força/deslocamento da figura 3.14, onde o sinal dos deslocamentos foi trocado para se obter uma curva nos moldes habituais.

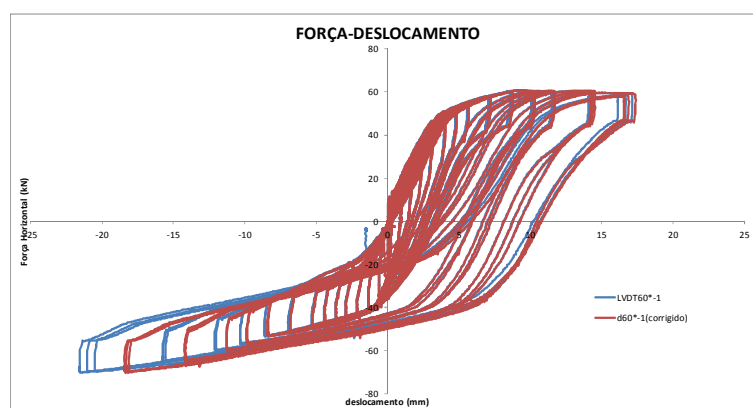


Fig. 3.14 – Diagrama força/deslocamento LVDT60 e LVDT60 corrigido.

Para a comparação dos deslocamentos foi necessária uma correção por um fator de escala em altura que multiplicando este pelo deslocamento corrigido transforma os valores obtidos para estarem à mesma altura, e assim verificar que a correção destes estaria bem calculada, como mostra a tabela 3.3.

Tabela 3.3. – Deslocamentos à mesma altura.

LVDT	fator de escala	deslocamento [mm]
60	0.97	-10.88
LFio8	1.13	-12.11
interno	0.92	12.96
34	1.02	12.99
LFio7	1.13	13.22

Conclui-se que os valores obtidos estão bastante próximos para o deslocamento escolhido. Para definir os deslocamentos finais da parede optou-se por considerar uma média entre o LVDT60 e 34, corrigido para a altura da parede, porque estes nem sempre mostraram um comportamento igual, devido ao sistema de roldanas que lhes estava associado prender um pouco os fios. Assim, obtém-se uma diferença global de deslocamentos ilustrada pela figura 3.15, onde a diferença máxima é de 7.72 mm, e um diagrama força-deslocamento onde se observam as diferenças entre estes e a média considerada (figura 3.16).

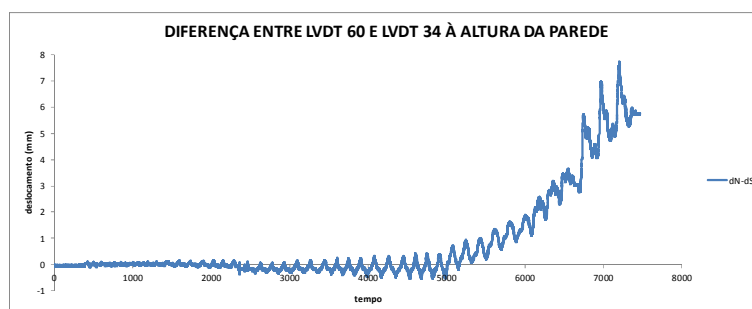


Fig. 3.15 – Gráfico da diferença entre LVDT60 e 34 ao longo do tempo.

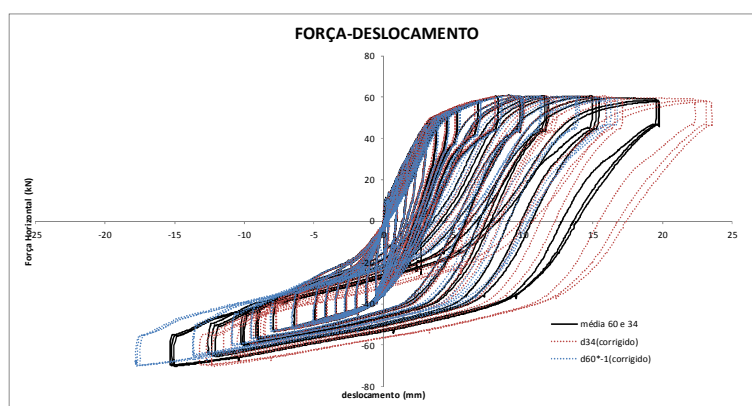


Fig. 3.16 – Diagrama força/deslocamento LVDT34 e 60 corrigido e média.



# 4

## ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1. TIPOS DE RESULTADOS, APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO

Este ponto da dissertação tem como objetivo a apresentação e a análise detalhada do comportamento mecânico das paredes portantes de alvenaria de pedra para uma comparação dos resultados mais à frente neste estudo.

Os resultados estão agrupados por tipologia de parede, começando pelas paredes regulares (ponto 4.2), de seguida as parcialmente regulares (ponto 4.3), as irregulares (ponto 4.4) e por fim as muito irregulares (ponto 4.5).

Para uma primeira análise fez-se a evolução das leituras de todos os transdutores de deslocamento, células de carga e clinómetros ao longo do tempo. Devido à grande extensão de dados obtidos em cada ensaio, a apresentação dos resultados processados irão ser apresentados de forma gráfica para uma melhor compreensão.

Para a definição dos ciclos de deslocamento optou-se por uma média entre os LVDTs 34 (lado norte) e 60 (lado sul), colocados próximos do topo da parede, porque foi detetada uma folga no atuador horizontal, logo os valores de deslocamento obtidos por este não seriam os realmente aplicados. Os ciclos são definidos em positivos e negativos conforme o deslocamento imposto na parede seja para sul ou norte, respetivamente. Para cada deslocamento imposto foram realizados três ciclos, tendo-se procurado aplicar sempre a mesma história de deslocamentos.

Para o estudo do comportamento mecânico das paredes de alvenaria de pedra é necessário calcular diagramas de força/deslocamento e alguns parâmetros, tais como, a força máxima atingida e a ductilidade. Estes diagramas estão acompanhados por fotografias que representam o deslocamento inicial e máximo atingido para desta forma perceber a rotura.

A partir do diagrama obtido para a força horizontal/deslocamento, é traçada a envolvente com vista à obtenção de uma curva bilinear que permita calcular uma aproximação da rigidez elástica e da ductilidade (de acordo com o exposto no capítulo 2), que são parâmetros importantes da resposta cíclica em corte e necessários para a comparação de resultados. Porém, em face dos gráficos envolventes obtidos, muitos dos quais não apresentam a forma completa do diagrama da figura 2.8, não foi seguida de forma sistemática a proposta de Frumento (2009) exposta no capítulo 2. De facto, em alguns casos, revelou-se mais apropriado optar por uma aproximação diferente do traçado da curva bilinear, consistindo em duas retas de tendência, uma para o crescimento inicial da força, para obter a rigidez elástica aproximada, e outra para a restante parte da curva de forma a igualar as áreas tal como

proposto na bibliografia referida. Para o cálculo do deslocamento de cedência adotou-se o ponto de interseção das retas.

Ainda se apresenta a evolução de deslocamentos ao longo do tempo de forma a evidenciar os patamares de deslocamento considerados juntamente com as deformadas das juntas horizontais laterais, para assim perceber qual o comportamento destas e se estão coerentes com as deformadas, isto é, perceber quando uma junta deveria estar a abrir ou fechar.

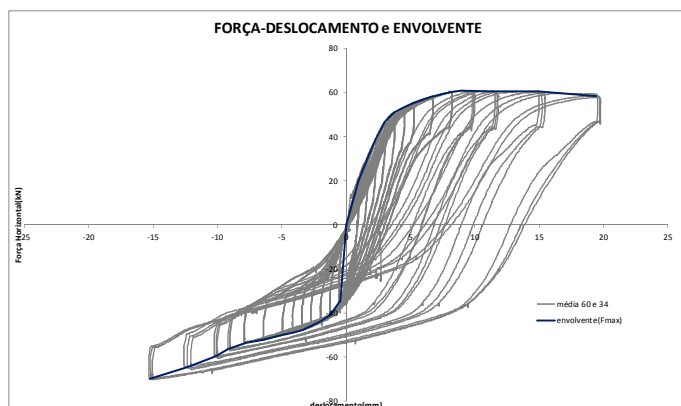
Para perceber o comportamento das paredes ao longo dos ensaios optou-se por traçar os perfis laterais, o que ajuda na interpretação dos diagramas de força/deslocamento, proporcionando uma espécie de “filme”. As deformadas apresentadas revelam uma grande extensão de dados, mas necessária para uma melhor leitura e compreensão da evolução do comportamento ao longo dos deslocamentos impostos, estando agrupados em grupos de quatro relacionados por um fator de escala, isto é, o primeiro grupo tem uma distância máxima no topo da parede da vertical de 0.5 mm e os restantes vão incrementando 0.5 mm, criando assim uma melhor relação entre eles. Nestes ainda se pode ver o desvio máximo da parede em relação à sua vertical, *drift*.

Estes resultados permitem fazer uma comparação, apresentada no ponto 4.6 deste capítulo, entre o tipo de parede e ainda, com o esforço axial imposto, perceber qual a diferença entre as paredes do mesmo grupo e para o mesmo esforço.

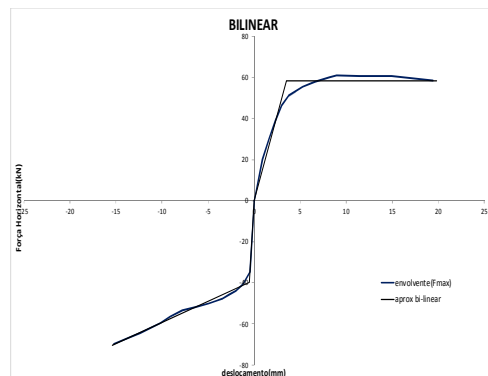
## 4.2. PAREDES TIPO R

### 4.2.1. ENSAIO R4

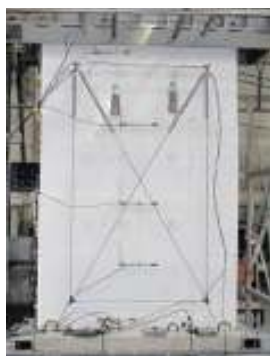
Este ensaio foi o primeiro a ser realizado tendo servido para ajustar os atuadores e verificar o seu funcionamento. Ao dar início ao ensaio verificou-se um inesperado levantamento (rotação) exagerado da parede, obrigando à correção do sistema de funcionamento e forçando ao reinício do ensaio. Pela figura 4.1 pode-se ver o resumo dos resultados globais obtidos.



a) Diagrama Força/Deslocamento e envoltória primeira carga



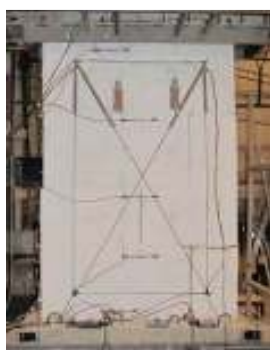
f) Envoltória de primeira carga e aproximação bilinear



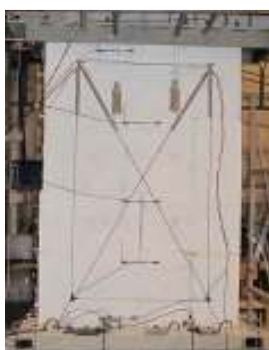
b) d inicial-



c) d inicial+



d) d max-

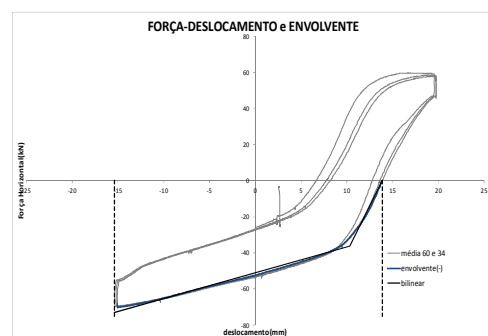


e) d max+

Tabela 4.1. – Parâmetros obtidos da envoltória (R4)

	$F_{max}$	$d_{max}$	$d_y$	$\mu$	$K_e$
	[kN]	[mm]	[mm]		[kN/m]
+	60.6	19.8	3.5	5.7	16554
-	-70.3	-15.4	-0.5	29.1	74684

g) Resumo de parâmetros globais



h) Envoltória do último ciclo

Fig. 4.1 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (R4): a) diagrama força-deslocamento, b) a e) fotografias em posições deformadas extremas, f) detalhe e g) parâmetros da envoltória, h) envoltória do último ciclo.

O comportamento principal desta parede, sob carga axial de 150 kN, foi de *rocking* nos ciclos negativos e deslizamento nos positivos. O ensaio foi concluído devido à instabilidade da parede, porque o seu desvio para fora do plano era muito grande uma vez que neste primeiro ensaio não se dispôs de sistema de guiamento longitudinal da parede.

Pelo diagrama da figura 4.1 a) conclui-se que houve dissipação de energia, não havendo perda de força quando se compara para um mesmo ciclo a queda de resistência é muito reduzida, já para o deslocamento no último ciclo com o do ciclo seguinte a queda é notória.

Refira-se ainda que, devido ao sistema de aplicação da carga vertical usando uma plataforma deslizante (de baixo atrito), o gráfico de força/deslocamento exhibe umas perdas de força bruscas nas extremidades de cada ciclo, que não foi possível corrigir. Não obstante, em termos dos resultados aqui apresentados este efeito não tem influência de relevo.

A partir dos dados obtidos foi possível traçar a curva bilinear envolvente (figura 4.1 e)) e estimar os valores apresentados na tabela 4.1.

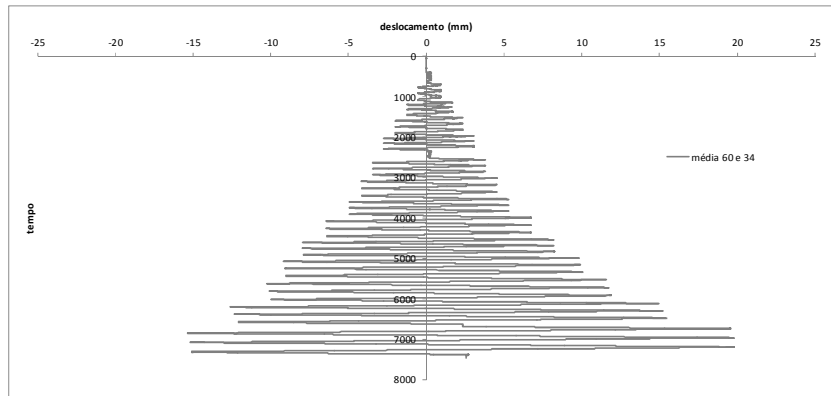
Observa-se que a curva bilinear com patamar constante está muito próxima do resultado final no caso dos ciclos positivos; já a dos ciclos negativos, aquele tipo de curva conduziria a uma aproximação mais deficiente por não se ter atingido o valor da força máxima, tendo-se então adotado uma aproximação bilinear com rigidez pós cedência. Como se pode verificar pelos parâmetros calculados, neste ensaio existe uma diferença significativa de ductilidade entre o ciclo positivo e o negativo, bem como na sua rigidez, tendo por base a envolvente de primeira carga.

Porém verifica-se que a deformação induzida na parede, com progressivo escorregamento acumulado no sentido positivo, provoca um aumento de força sempre que se inicia um ciclo negativo. Este aspeto dificulta a determinação da envolvente cíclica nos moldes habituais nestes estudos (envolvente essa que normalmente se aproxima da curva de resposta monotónica) pois cada vez que há inversão do sinal de força, tudo se passa como se começasse o ensaio de uma nova parede com condições diferentes das iniciais. Desta forma, calculou-se uma nova envolvente adicional com base no último ciclo de carga, determinando novos valores do deslocamento de cedência (3.5 mm) e da ductilidade (8.3), relativos ao ponto de força nula anterior, que se apresentam mais realistas próximos dos valores do ciclo positivo listados na tabela 4.1. Nestas condições a rigidez de recarga “pré-cedência” toma o valor de 9990 kN/m, já mais próximo da rigidez para sentido positivo ( $k_e=16554$  kN/m), embora menor como se esperaria pelo facto de já haver degradação da parede.

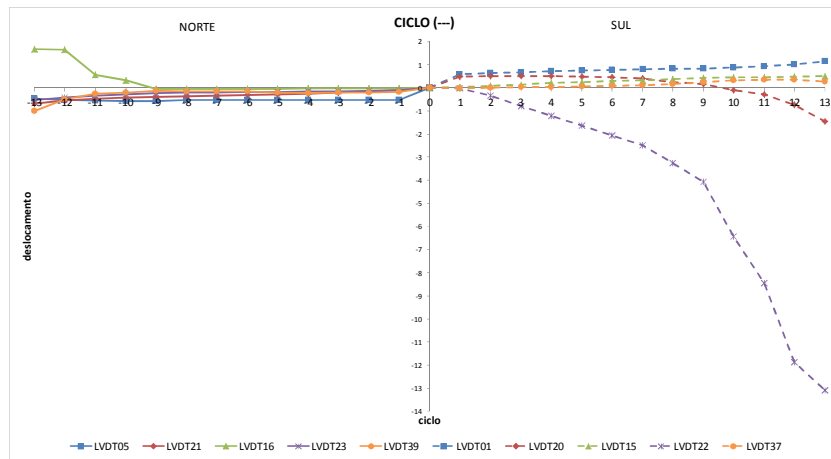
Relativamente à diferença do valor de rigidez inicial (positiva e negativa), a figura-se algo estranha e difícil de explicar por motivos físicos reais. Admite-se que possa ter havido erros de leitura, principalmente para os primeiros ciclos, pelo facto de os LVDTs 34 e 60 estarem ligados por fios à parede, atravessando roldanas que, por atrito indesejável, possam ter retido os deslocamentos reais na fase inicial (deslocamentos muito pequenos). O mesmo se passa na fase de inversão de deslocamento (início de descarga) onde se nota uma aparente quebra abrupta de força, logo desde o início do ensaio e perdurando até aos últimos ciclos. É de admitir que esta ilusória quebra de força seja na realidade devida a uma deficiente medição dos deslocamentos na fase inicial de descarga que, porém, pouca influência tem nos resultados finais aqui discutidos.

Na figura 4.2 apresenta-se a resposta das juntas laterais ao longo dos patamares de deslocamentos identificáveis na figura 4.2 a). Observa-se que alguns dos sensores não estão de acordo com o esperado, pois sendo visível pelas fotografias que estariam a abrir ou a fechar consoante o lado da parede e o deslocamento imposto, verifica-se que não é a leitura observável nos gráficos, facto pode devido a estarem sujeitos não só a abertura/fecho mas também a escorregamento, o que altera o valor

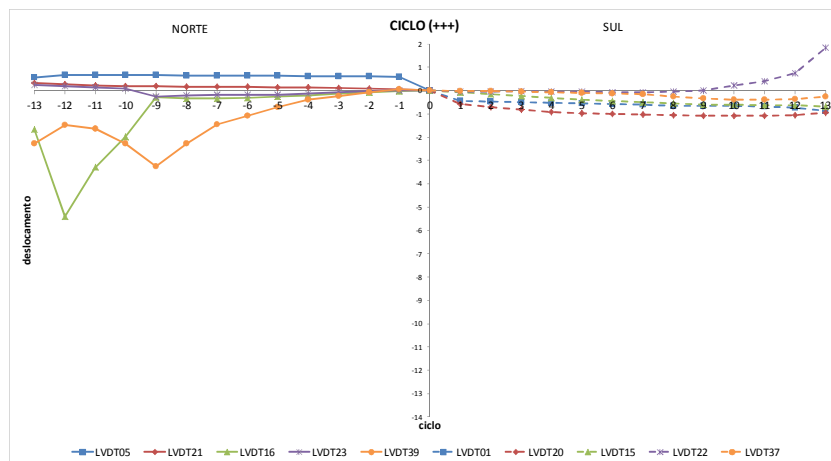
resultante desta medida. Conclui-se assim que é necessário bastante atenção no tratamento dos dados, eventualmente excluindo resultados fora da tendência esperada, tais como os LVDTs 16 e 22 para os ciclos negativos e os 16, 39 e 22 para os ciclos positivos. De fato, não contando com resultados considerados anômalos, registam-se máximas aberturas de juntas de cerca de 0.68 mm e de 0.34 mm, respectivamente no sentido positivo e negativo.



a)



b)



c)

Fig. 4.2 – Resposta das juntas horizontais laterais (R4): a) história de deslocamentos globais impostos e deslocamentos nas juntas para b) ciclos negativos e c) ciclos positivos.

De seguida apresenta-se as deformadas, por forma a relacionar e ajudar a perceber os gráficos anteriores, proporcionando uma espécie de “filme” do ensaio para os patamares de deslocamento indicados na figura 4.2 a). É notório um comportamento inicial de flexão, apesar de começar a revelar um deslizamento para o deslocamento de -2.76 mm.



Fig. 4.3 – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (R4 – até -2.76 mm e 3.03 mm).

Verifica-se uma continuação do comportamento verificado anteriormente, tornando cada vez mais notório o deslizamento na primeira junta para os ciclos negativos.



Fig. 4.3 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (R4 – de -3.45 mm até -6.42 mm e 3.79 mm e 6.74 mm).

Nos últimos grupos de deslocamento verifica-se o agravamento do deslizamento e onde ocorre, continuando a flexão a ser predominante do lado sul, apesar de se verificar, para os ciclos negativos que a primeira pedra junto à base perde contacto com a parede.

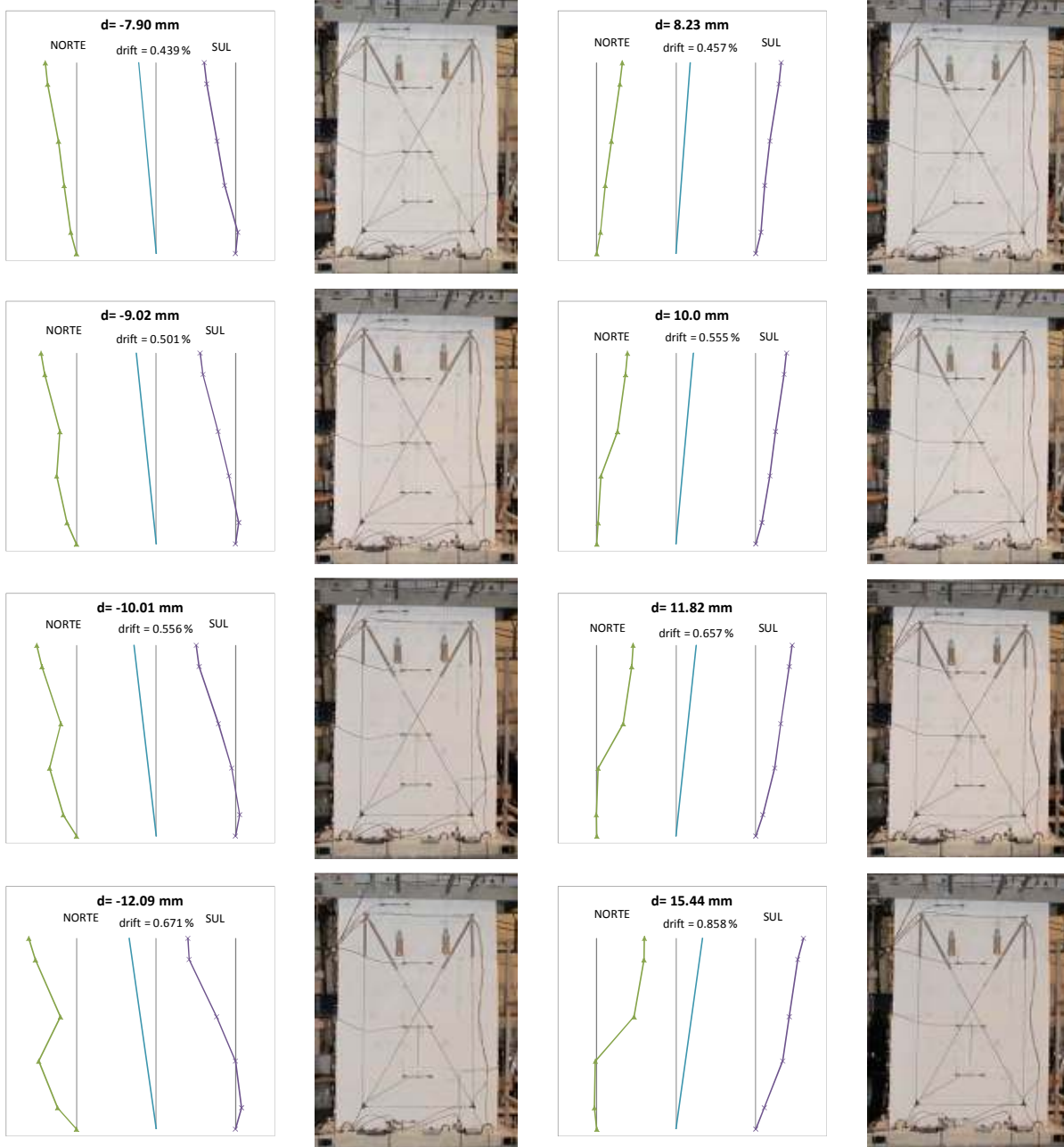


Fig. 4.3 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes drifts, d em mm (R4 – de -7.90 mm até -12.09 mm e 8.23 mm e 15.44 mm).

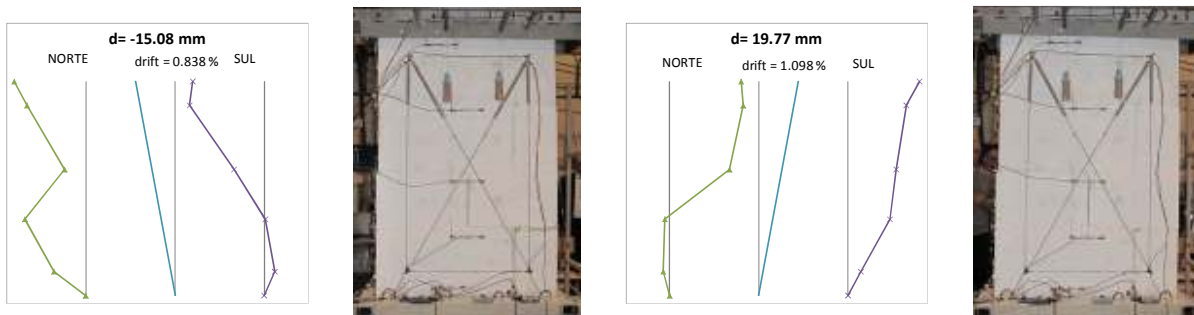
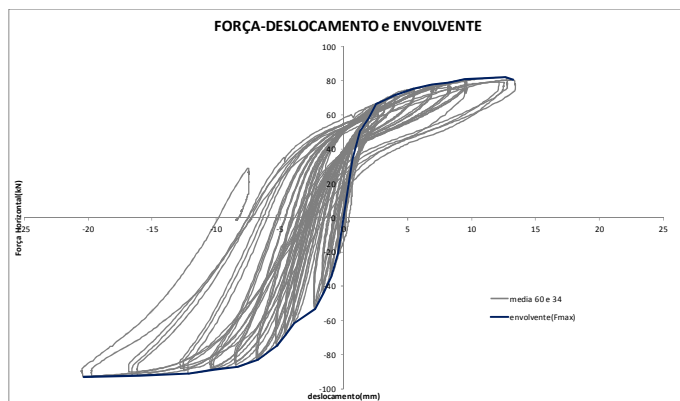


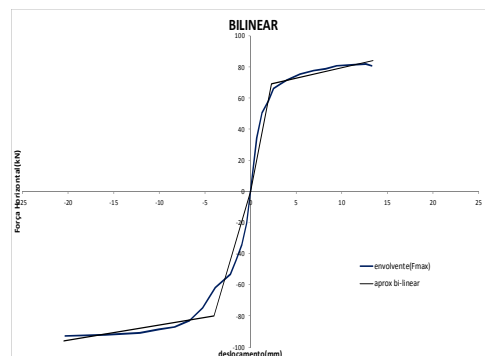
Fig. 4.3 (cont.)– Deformadas laterais e correspondentes drifts, d em mm (R4 – -15.08 mm e 19.77 mm).

#### 4.2.2. ENSAIO R5

Com a realização do primeiro ensaio chegou-se à conclusão de que a forma de aplicação da força vertical não foi a melhor opção. Por isso, a partir deste ensaio, a aplicação foi realizada de acordo com o explicado no ponto 3.3. A figura 4.4 ilustra o resumo dos resultados obtidos.



a) Diagrama Força/Deslocamento e envoltório primeira carga



f) Envoltório de primeira carga e aproximação bilinear



b) d inicial-



c) d inicial+



d) d max-



e) d max+

Tabela 4.2. – Parâmetros obtidos da envoltório (R5)

	$F_{max}$ [kN]	$d_{max}$ [mm]	$d_y$ [mm]	$\mu$	$K_e$ [kN/m]
+	82.0	13.4	2.3	5.8	30425
-	-92.9	-20.5	-4.0	5.1	26252

g) Resumo de parâmetros globais

Fig. 4.4 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (R5): a) diagrama força-deslocamento, b) a e e) fotografias em posições deformadas extremas, f) detalhe e g) parâmetros da envoltório.

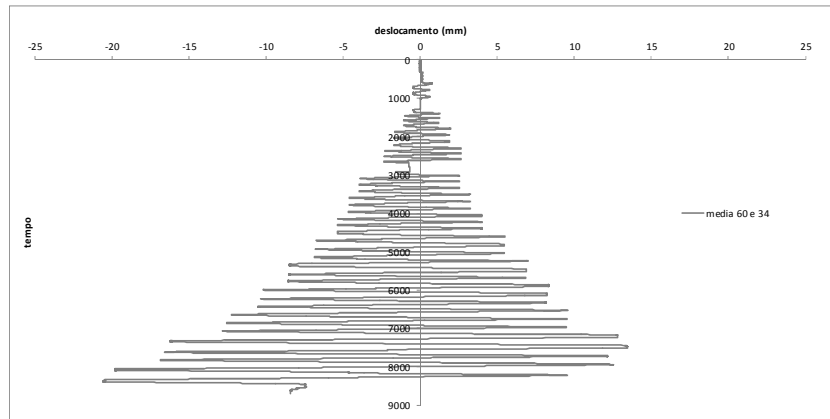
O comportamento principal desta parede foi de *rocking*, com levantamento pela base do lado sul para ciclos positivos e deslizamento por corte nos ciclos negativos, tendo-se atingido a rotura como se pode ver nas figuras 4.4 d) e e). A carga vertical aplicada foi de 300 kN e, tal como no ensaio anterior, o

desvio para fora do plano desta parede também foi excessivo; assim, por motivos de segurança parou-se o ensaio antes de se observar uma clara quebra de resistência em qualquer dos sentidos. A parede saiu para fora do plano.

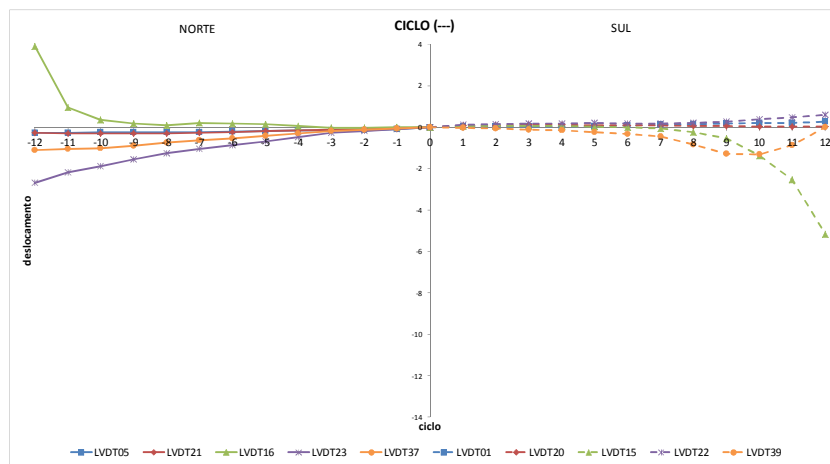
Pelo diagrama da figura 4.4 a), conclui-se que houve alguma dissipação de energia, há uma ligeira perda de força quando comparada para um deslocamento no último ciclo com o ciclo seguinte e ainda para um mesmo ciclo a queda de resistência é muito reduzida.

Os valores obtidos pelo ensaio e calculados a partir da curva bilinear estão apresentados na tabela 4.2. Constata-se que a curva bilinear com rigidez pós-cedência se apresenta bem próxima da envolvente experimental, apesar de nos ciclos positivos ainda ter uma ligeira tendência de crescimento da força horizontal. Não tendo havido evidência do efeito de escorregamento como na parede R4, o tratamento da envolvente já não apresentou as dificuldades anteriores. Como se pode verificar pelos parâmetros calculados, neste ensaio o comportamento apresentou maior simetria do que no anterior e os valores de ductilidade também são mais próximos nos dois sentidos.

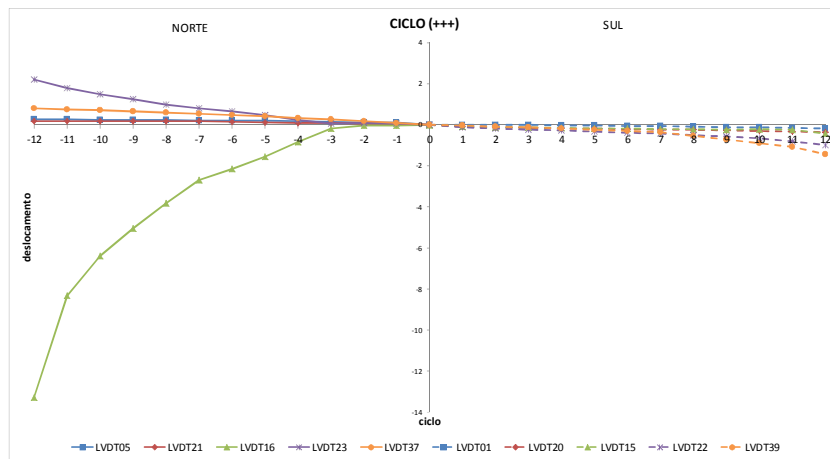
Na figura 4.5 apresenta-se a resposta das juntas laterais; excluindo resultados anómalos, LVDTs 16 para ambos os ciclos e o 39 e 15 para os negativos, registam-se máximas aberturas de juntas de 2.2 mm e de 0.6 mm, respetivamente, no sentido positivo e negativo, corroborando o funcionamento de *rocking* obtido.



a)



b)



c)

Fig. 4.5 – Resposta das juntas horizontais laterais (R5): a) história de deslocamentos globais impostos e deslocamentos nas juntas para b) ciclos negativos e c) ciclos positivos.

Os gráficos das deformadas laterais para os *drifts* indicados complementam a informação anterior e como esperado visualiza-se um comportamento de flexão para os ciclos iniciais.

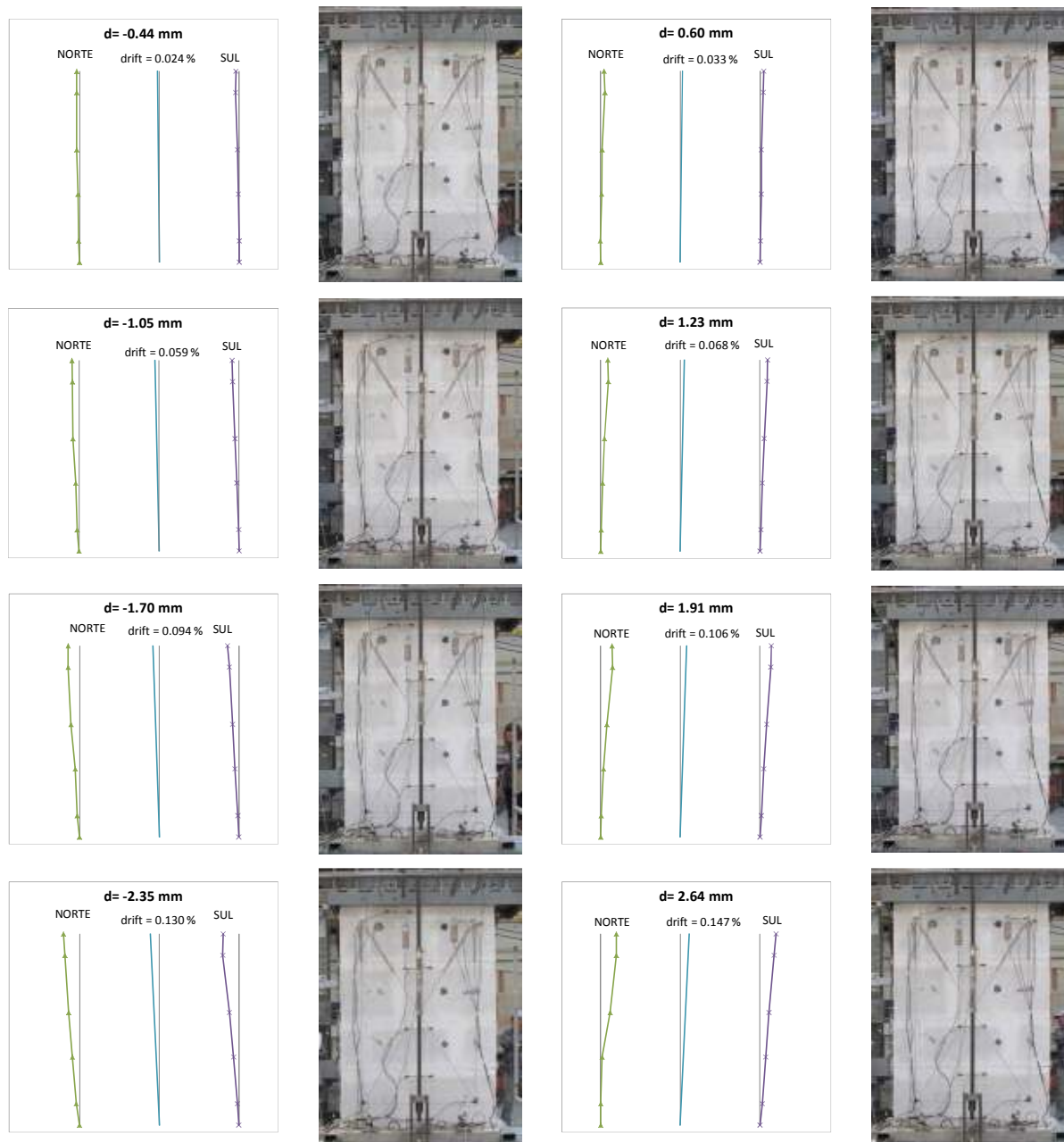


Fig. 4.6 – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, *d* em mm (R5 – até -2.35 mm e 2.64 mm).

Nesta fase de deslocamentos nota-se um deslizamento devido a abertura de juntas para os ciclos positivos.

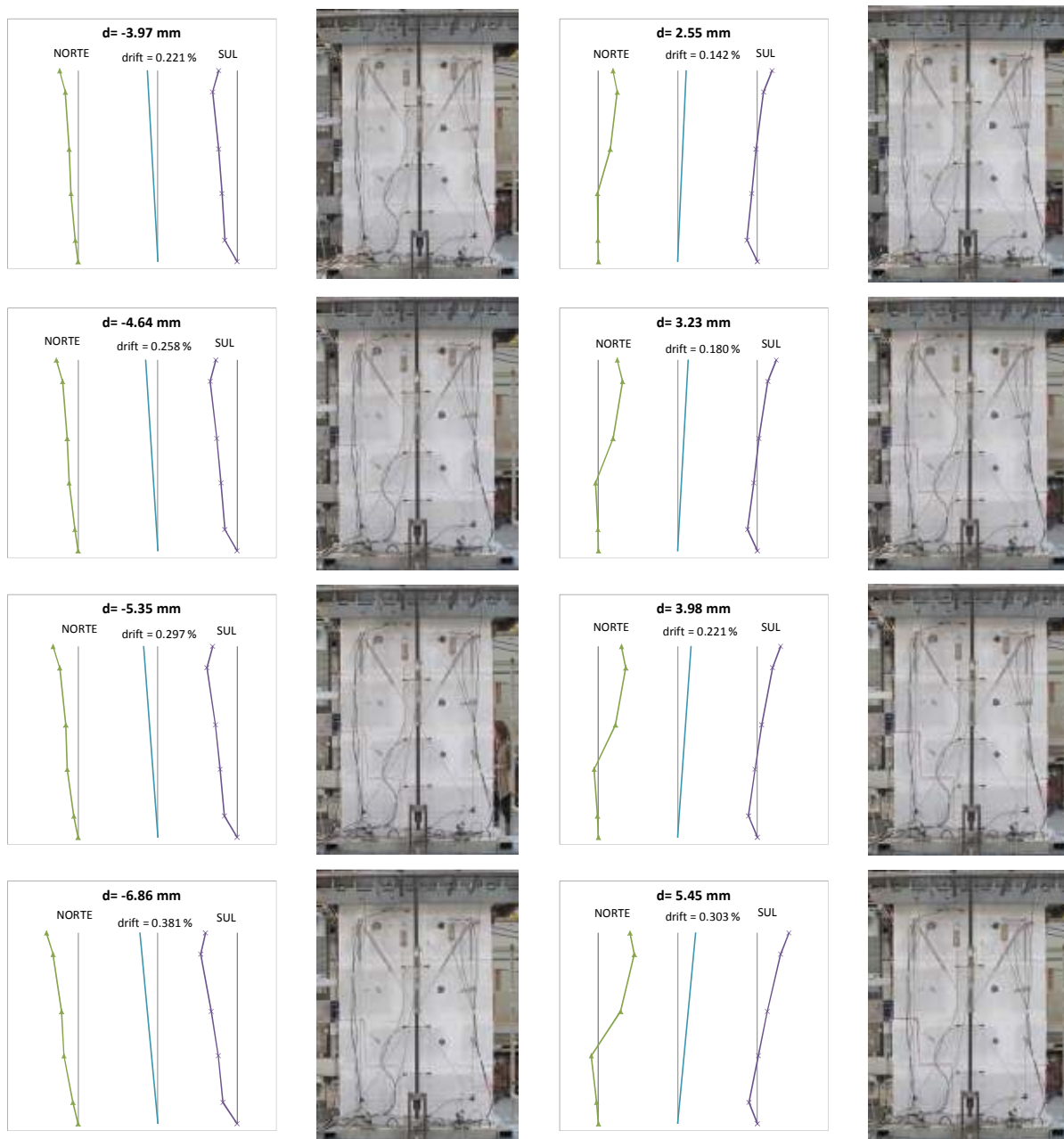


Fig. 4.6 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, *d* em mm (R5 – de -3.97 mm a -6.86 mm e 2.55 mm a 5.45 mm).

Conclui-se que existe agravamento da abertura da junta, implicando um deslizamento, para os ciclos positivos. Para os ciclos negativos verifica-se apenas nos dois últimos deslocamentos a abertura da junta neste sentido.

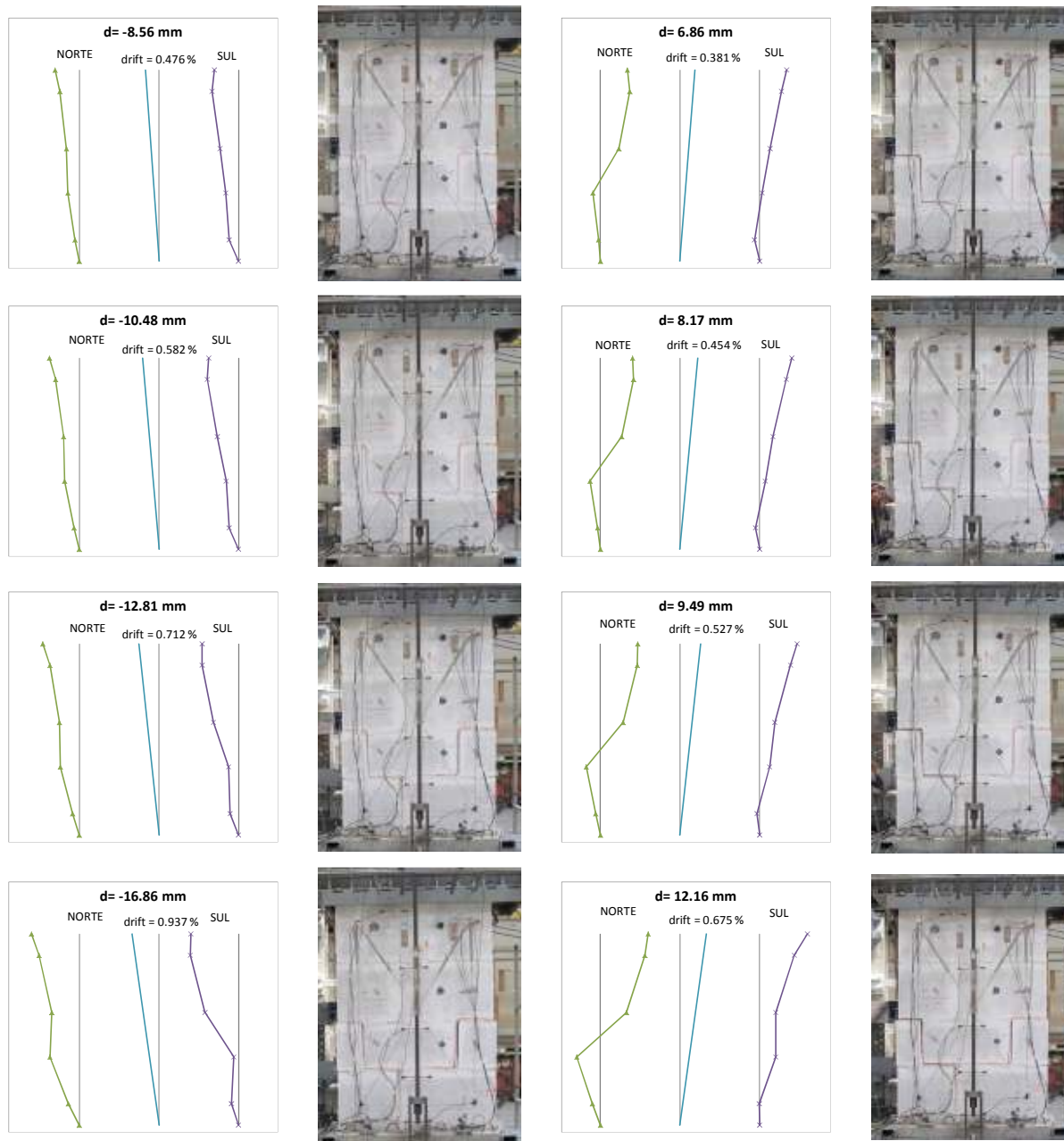
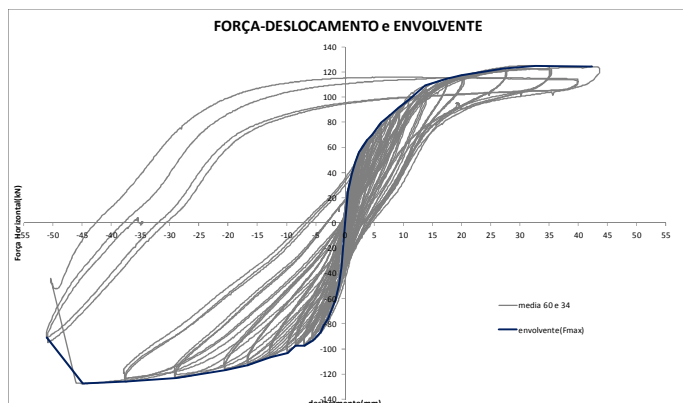


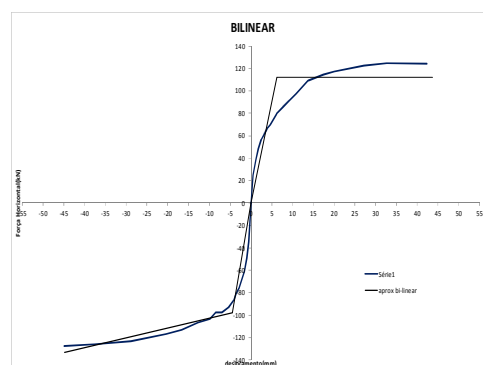
Fig. 4.6 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, *d* em mm (R5 – de -8.56 mm a -16.86 mm e 6.86 mm a 12.16 mm).

### 4.2.3. ENSAIO R6

Antes de iniciar o ensaio desta parede decidiu-se colocar uma estrutura de guiamento lateral por forma a não permitir um grande desvio da parede para fora do plano. Na figura 4.7 pode-se ver o resumo dos resultados obtidos para a parede R6.



a) Diagrama Força/Deslocamento e envolvente primeira carga



f) Envolvente de primeira carga e aproximação bilinear



b) d inicial-



c) d inicial+



d) d max-



e) d max+

Tabela 4.3. – Parâmetros obtidos da envolvente (R6)

	$F_{max}$ [kN]	$d_{max}$ [mm]	$d_y$ [mm]	$\mu$	$K_e$ [kN/m]
+	125.0	43.6	6.2	7.0	18221
-	-127.6	44.8	-4.4	10.2	22185

g) Resumo de parâmetros globais

Fig. 4.7 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (R6): a) diagrama força-deslocamento, b) a e) fotografias em posições deformadas extremas, f) detalhe e g) parâmetros da envolvente.

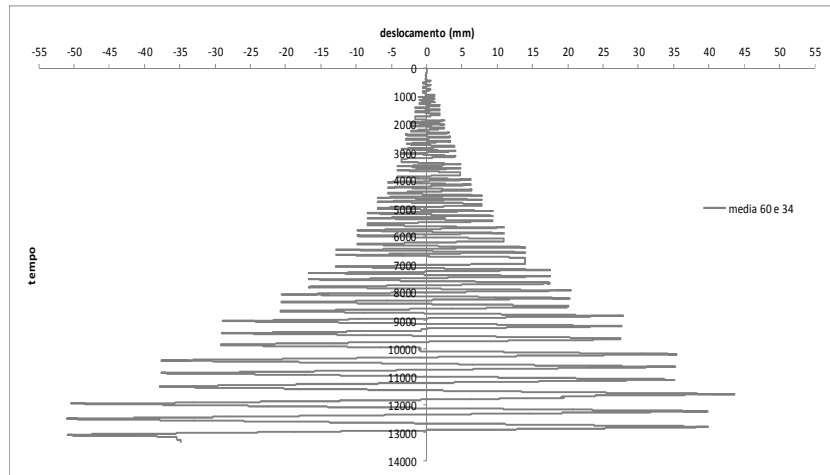
Neste ensaio, com carga vertical de 450 kN destaca-se o comportamento de *rocking* da parede, tendo havido rotura por corte e deslizamento da pedra mais pequena da base no último deslocamento imposto, como se pode ver nas figuras 4.7 d) e e). Graças ao guiamento lateral, foi possível impor maiores deslocamentos neste ensaio, que apenas foi terminado quando se deu a rotura da parede.

Pelo diagrama conclui-se também que houve alguma dissipação de energia, não há perda de força quando comparada para um deslocamento no último ciclo com o ciclo seguinte e ainda para um mesmo ciclo a queda de resistência é muito reduzida.

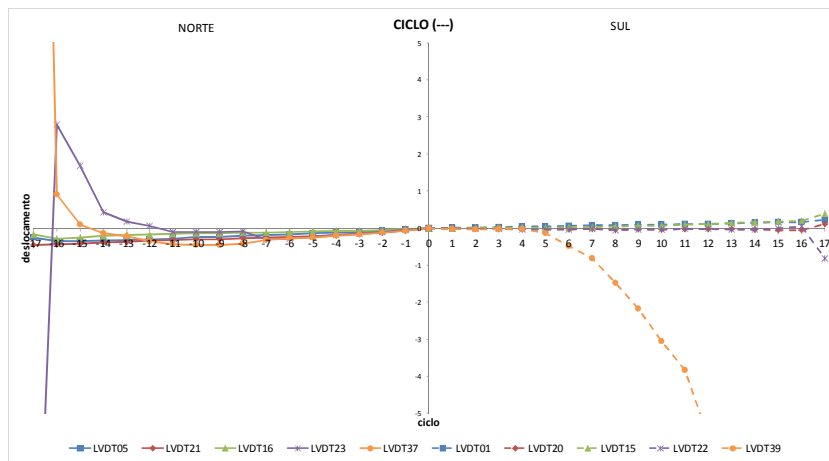
A partir destes dados foi possível traçar a curva bilinear e determinar os valores apresentados na tabela 4.3, verificando-se que a aproximação bilinear com rigidez pós-cedência se ajusta bem à envolvente negativa, enquanto para a positiva se afasta um pouco mais, razão pela qual foi adotada uma aproximação com rigidez nula pós-cedência. Para a obtenção da envolvente não foi considerado o último valor dos ciclos negativos, por apresentar uma força 20 % inferior à força máxima que ocorreu após uma ruptura brusca por perda de apoio numa pedra da base da parede.

Como se pode verificar pelos parâmetros calculados, as diferenças entre as características para os ciclos positivos e negativos não são muito grandes, particularmente no que se refere a força, deslocamentos e ductilidade. Porém a rigidez inicial realmente atingida é superior à indicada na tabela 4.3, pois esta é devida ao tratamento realizado para a obtenção da curva bilinear. A rigidez que se obtém através do primeiro carregamento até à primeira quebra é de 29980 kN/m e 42067 kN/m para o ciclo positivo e negativo respetivamente.

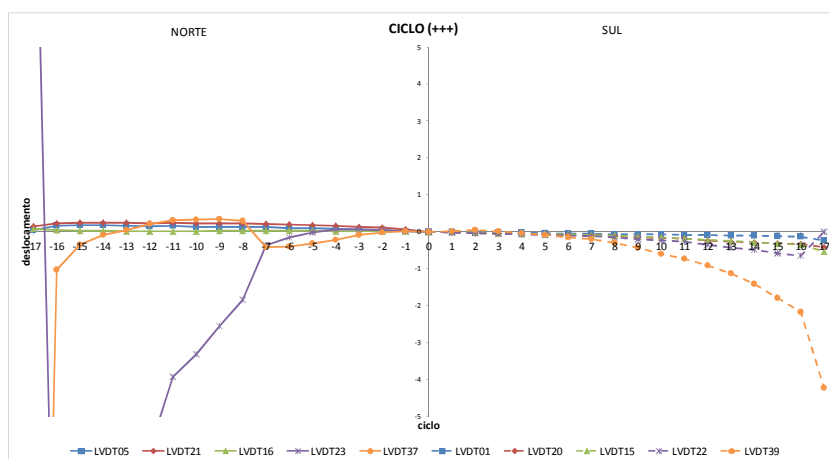
Na figura 4.8 apresenta-se a resposta das juntas laterais, onde, excluindo resultados fora da tendência esperada, LVDTs 37 e 23 para ambos os ciclos e 39 para os negativos, se registam máximas aberturas de juntas de cerca de 0.25 mm e de 0.40 mm no sentido positivo e negativo, respetivamente. Estes valores não comprovam o comportamento de *rocking*, poderá dever-se a que os sensores que deveriam ter dado valores com este significado foram os desprezados.



a)



b)



c)

Fig. 4.8 – Resposta das juntas horizontais laterais (R6): a) história de deslocamentos globais impostos e deslocamentos nas juntas para b) ciclos negativos e c) ciclos positivos.

Os gráficos das deformadas laterais para os *drifts* indicados complementam a informação anterior, mostrando como nos ensaios anteriores que o comportamento inicial é de flexão.

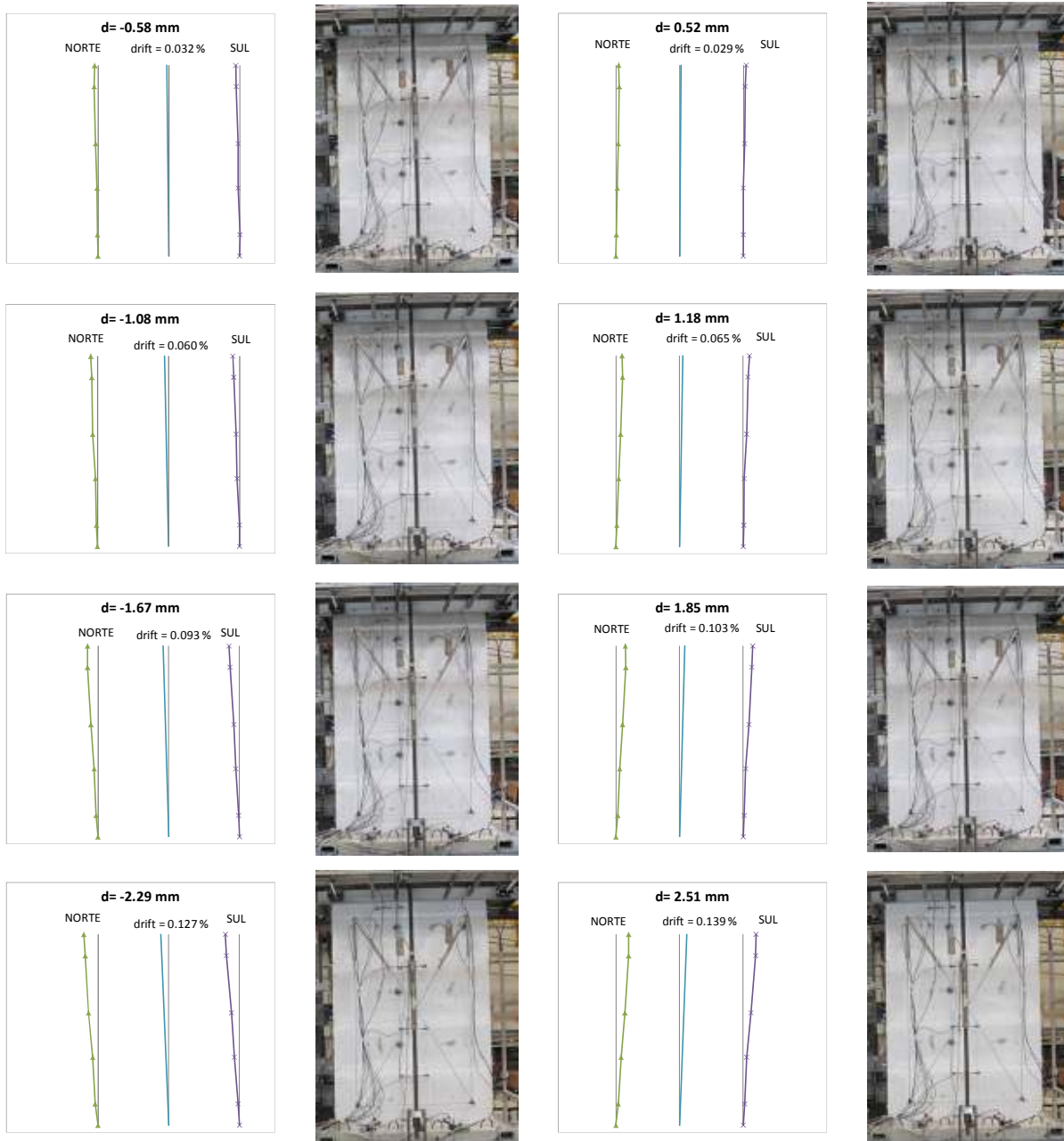


Fig. 4.9 – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (R6 – até -2.29 mm e 2.51 mm).

Apenas no último deslocamento apresentado pela figura seguinte se nota um deslizamento da pedra da base, sendo o restante de flexão.

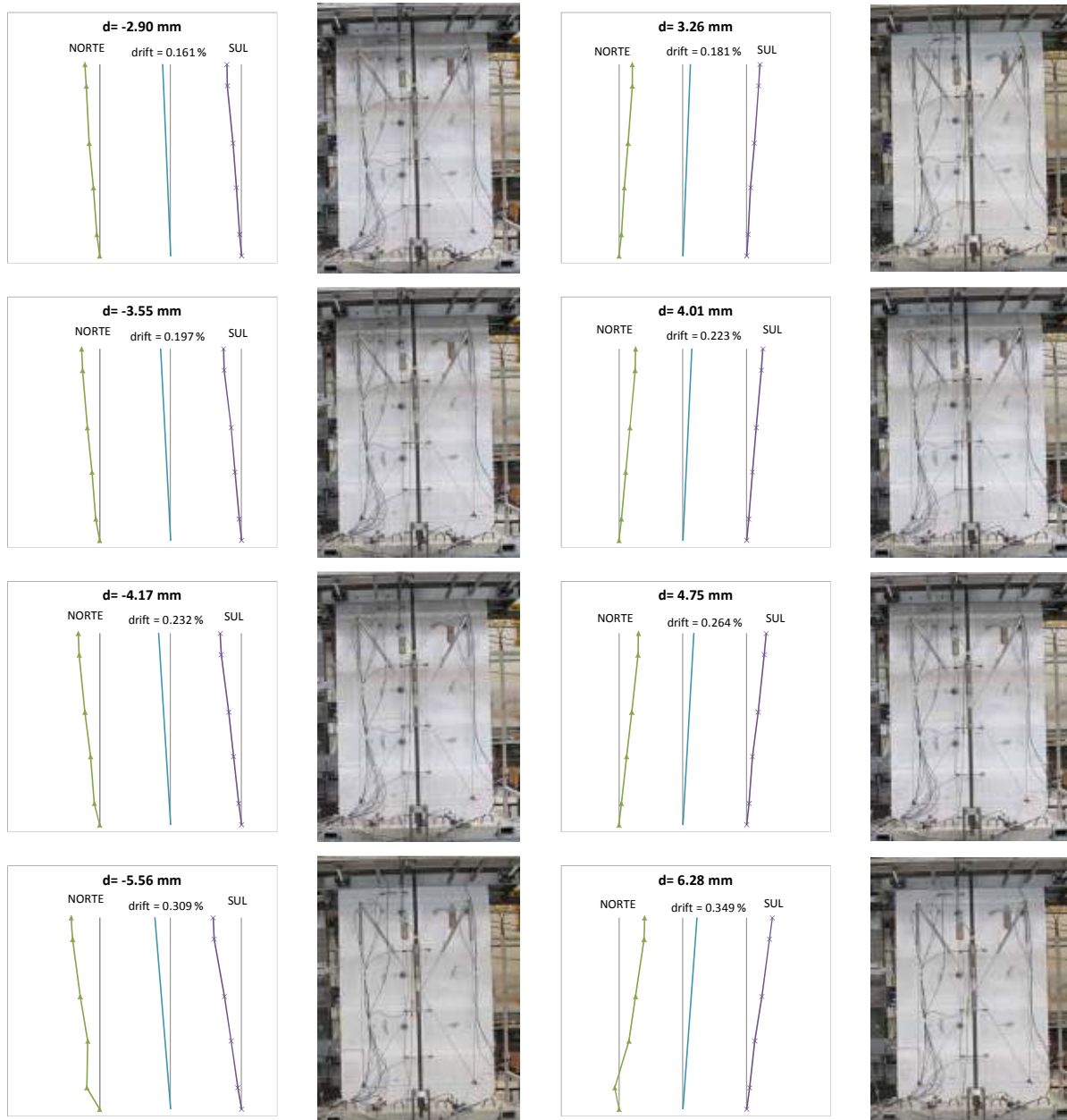


Fig. 4.9 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, *d* em mm (R6 – de -2.90 mm a -5.56 mm e 3.26 mm a 6.28 mm).

É notória a continuação do comportamento analisado anteriormente.

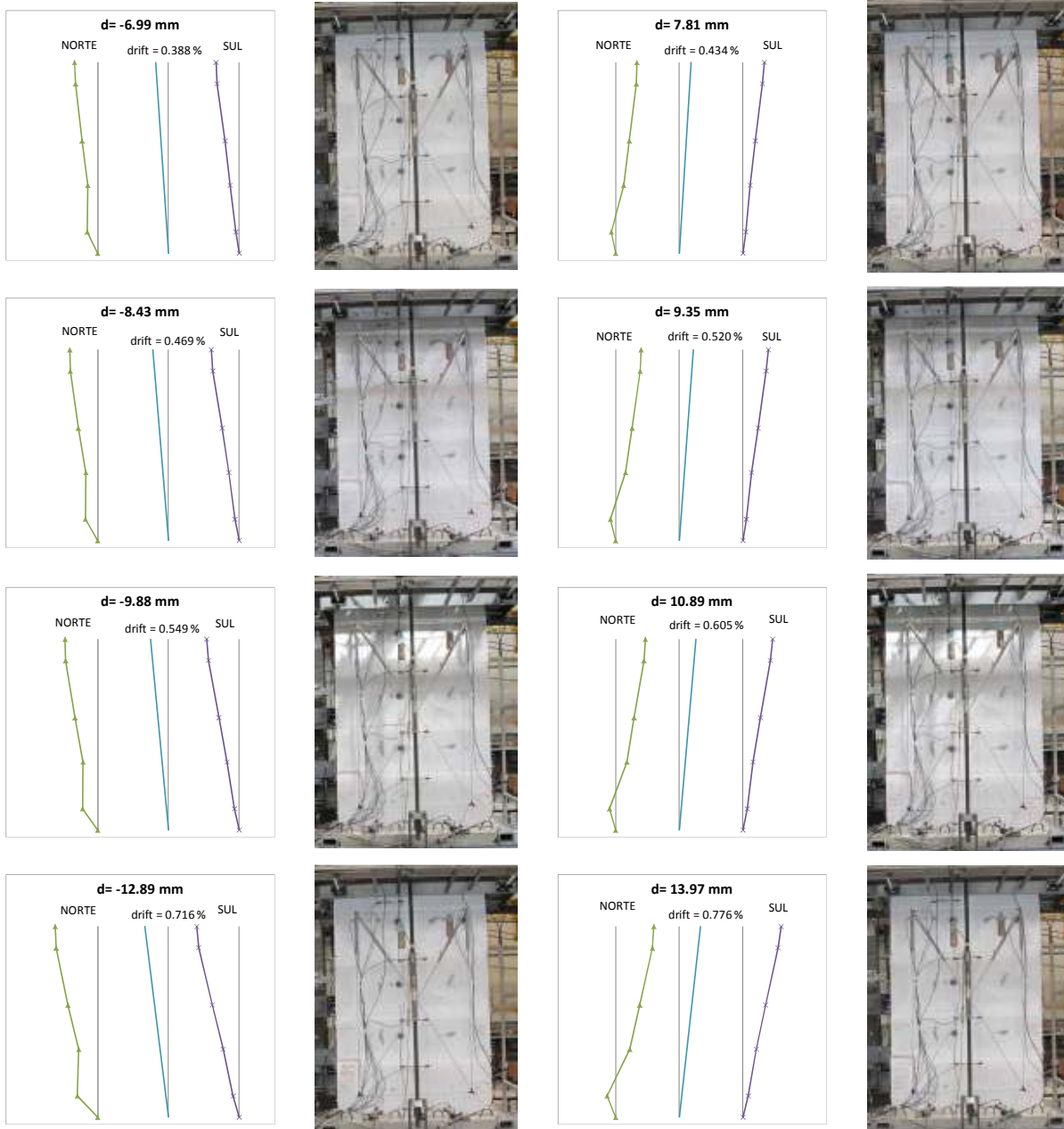


Fig. 4.9 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, *d* em mm (R6 – de -6.99 mm a -12.89 mm e 7.81 mm a 13.97 mm).

Nas deformadas seguintes é evidente o agravamento da situação anterior, visualizando o modo de rotura no último deslocamento.

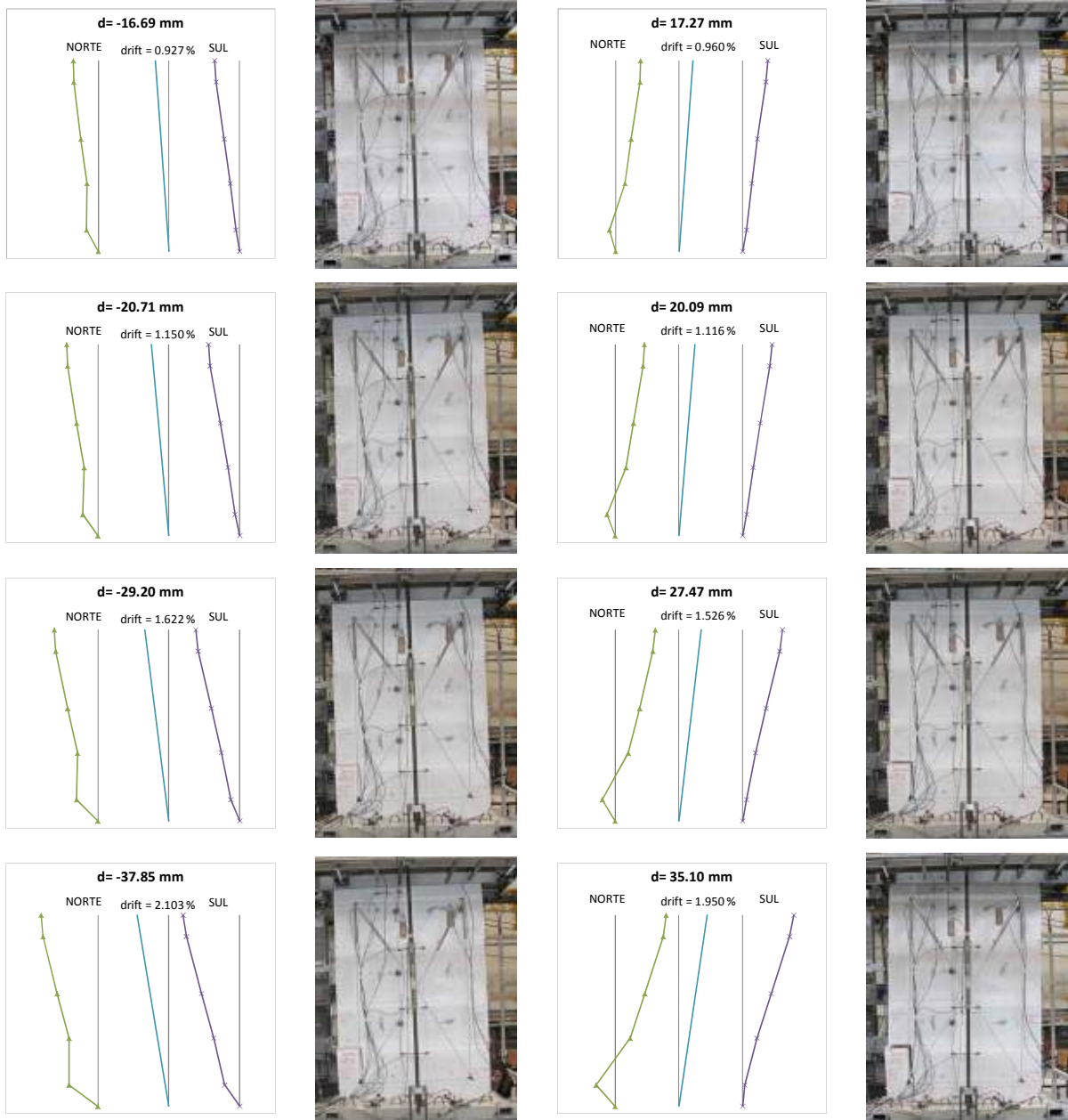


Fig. 4.9 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (R6 – de -16.69 mm a -37.85 mm e 17.27 mm a 35.10 mm).

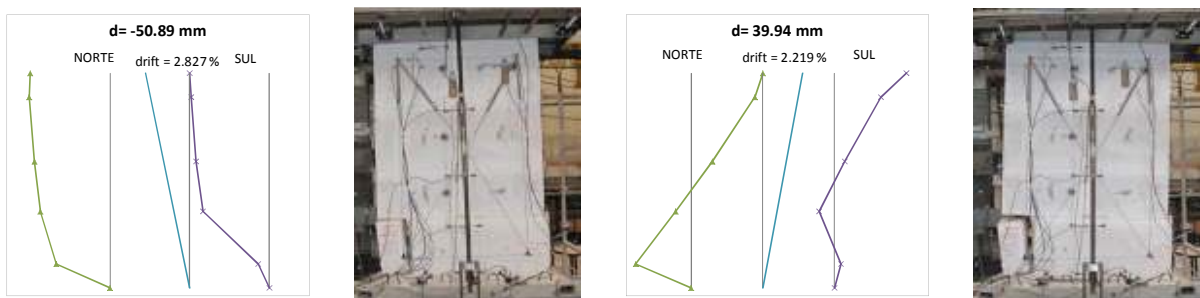
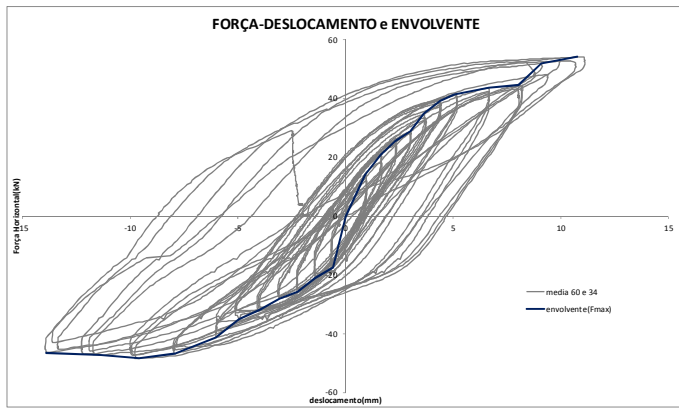


Fig. 4.9 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (R6 - -50.89 mm e 39.94 mm).

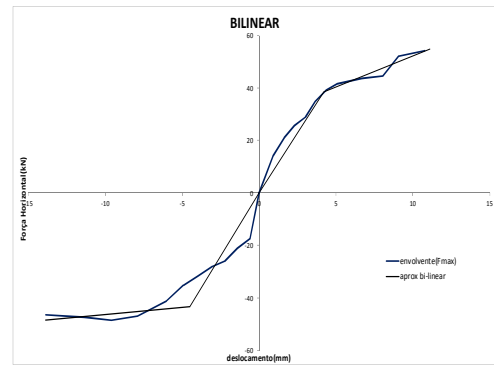
### 4.3. PAREDES TIPO PR

#### 4.3.1. ENSAIO PR4

A partir deste ensaio iniciou-se o estudo das paredes parcialmente regulares, de modo a fazer comparações dos resultados em função da regularidade das paredes. Na figura 4.10 pode-se ver o resumo dos resultados obtidos para a parede PR4, com carga vertical de 150 kN.



a) Diagrama Força/Deslocamento e envolvente primeira carga



f) Envolvente de primeira carga e aproximação bilinear



b) d inicial-



c) d inicial+



d) d max-

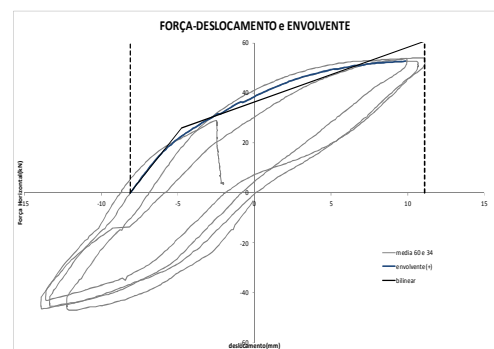


e) d max+

Tabela 4.4. – Parâmetros obtidos da envolvente (PR4)

	$F_{max}$ [kN]	$d_{max}$ [mm]	$d_y$ [mm]	$\mu$	$K_e$ [kN/m]
+	54.1	11.1	4.2	2.6	9779
-	-48.4	-13.9	-4.5	3.1	7856

g) Resumo de parâmetros globais



h) Envolvente do último ciclo

Fig. 4.10 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (PR4): a) diagrama força-deslocamento, b) a e) fotografias em posições deformadas extremas, f) detalhe e g) parâmetros da envolvente, h) envolvente do último ciclo.

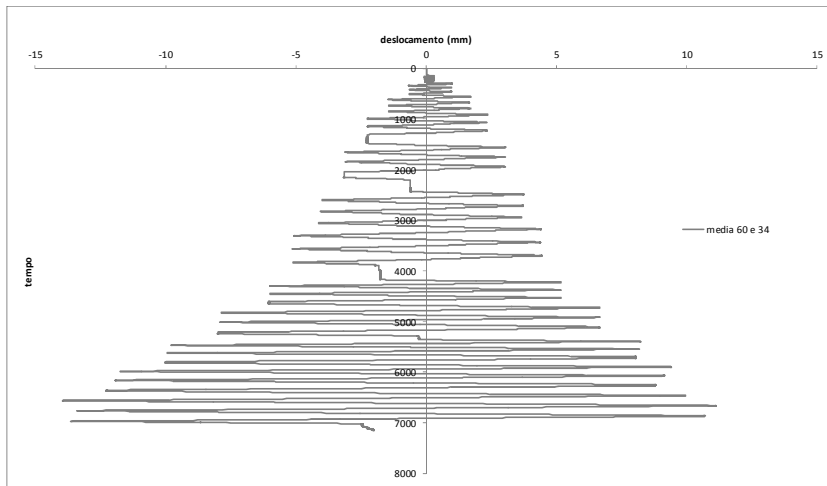
Constata-se nas figuras 4.10, d) e e) que a resposta foi de rotura diagonal por corte. A paragem deste ensaio foi devida à instabilidade da parede, tendo sido necessário colocar uma cinta solta na direção transversal por questões de segurança. Neste tipo de paredes notou-se que houve esmagamento de algumas pedras e corte em lasca, o que não se verificou nos anteriores.

Pela figura 4.10 a) verifica-se um ganho de resistência a uma determinada altura do ensaio que poderá dever-se ao rearranjo das pedras, uma dissipação de energia considerável e ainda para um mesmo deslocamento a queda de resistência é muito reduzida. A partir destes dados foi possível traçar a curva bilinear e determinar os valores apresentados na tabela 4.4, constando-se que a curva bilinear (figura 4.10 f)) com rigidez pós cedência apresenta razoável aproximação do resultado final.

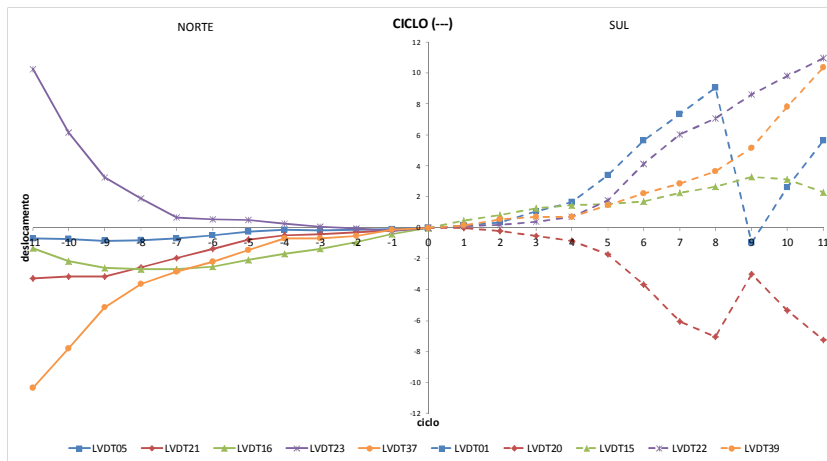
Como se pode verificar pelos parâmetros calculados, as diferenças de características entre os ciclos positivos e negativos não são muito grandes. No entanto, tal como no ensaio da parede R4, verifica-se um ganho de força em recarga que dificulta o traçado da envolvente para a obtenção dos parâmetros reais. Assim, considerando apenas o último ciclo positivo, a aproximação de uma curva bilinear com endurecimento conduz a um deslocamento de cedência de 3.35 mm e uma ductilidade de 5.7, esta última com valor bastante superior ao obtido com base na “envolvente inicial”.

Os valores da rigidez elástica obtidos através do primeiro troço de crescimento da força até à primeira cedência, são respetivamente 15548 kN/m e 28993 kN/m para o ciclo positivo e negativo, sendo bastante superiores aos valores estimados pelo cálculo adotando a curva bilinear ajustada.

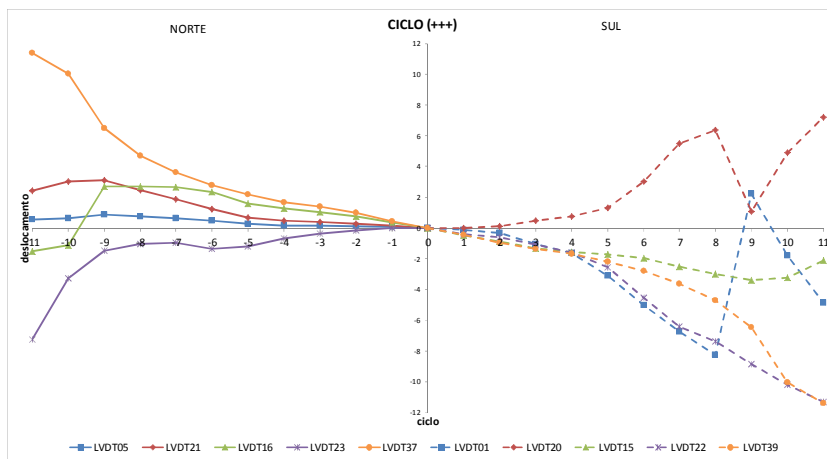
Na figura 4.11 apresenta-se a resposta das juntas laterais onde, novamente desprezando resultados anómalos, LVDTs 23 e 20 para ambos os ciclos, se registam-se máximas aberturas de juntas de cerca de 11.38 mm e de 10.95 mm, no sentido positivo e negativo, respetivamente, em concordância com o movimento global.



a)



b)



c)

Fig. 4.11 – Resposta das juntas horizontais laterais (PR4): a) história de deslocamentos globais impostos e deslocamentos nas juntas para b) ciclos negativos e c) ciclos positivos.

A pedra mais pequena no topo da parede tornou-se muito instável e com os gráficos seguintes pode-se comprovar o diagrama força/deslocamento, percebendo qual o comportamento de rotura e pedras instabilizadoras. Nestas deformadas, logo de início se nota uma fragilidade na parede, mostrando ligeiros deslizamentos.

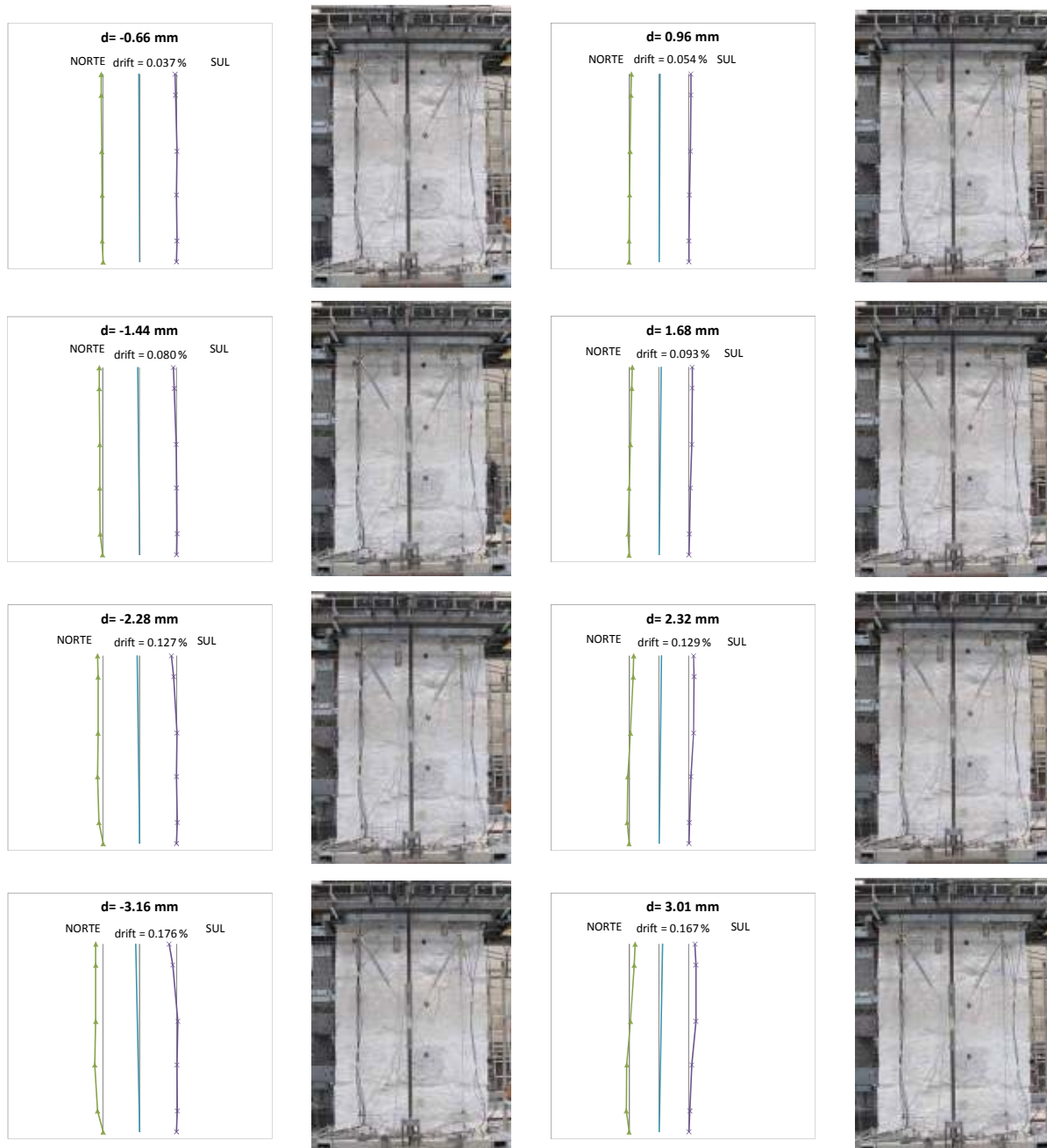


Fig. 4.12 – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (PR4 – até -3.16 mm e 3.01 mm).

Nos seguintes gráficos começa-se a notar a formação de uma rotura diagonal por corte.

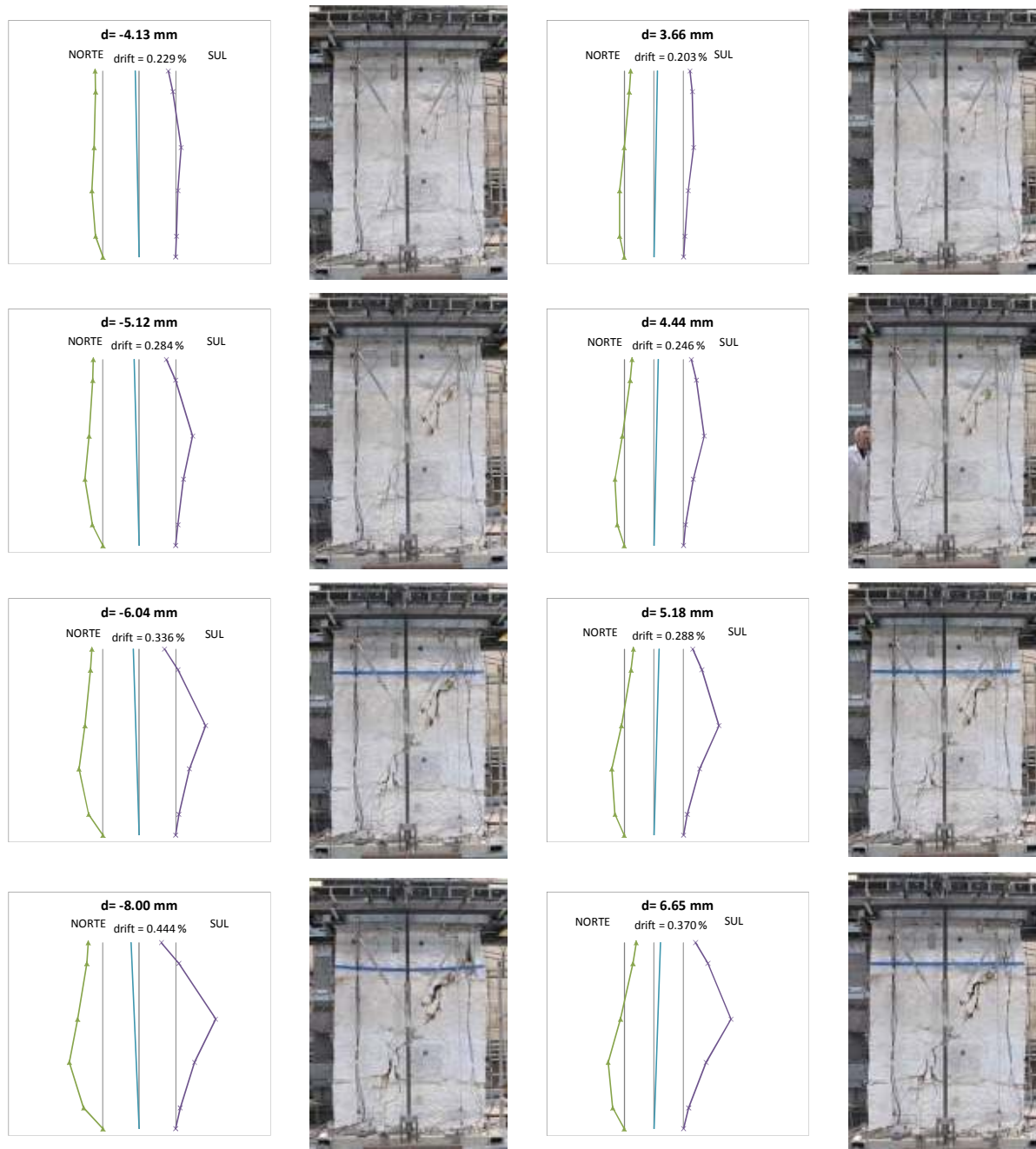


Fig. 4.12 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, *d* em mm (PR4 – de -4.13 mm a -8.00 mm e 3.66 mm a 6.65 mm).

A abertura da diagonal provoca na deformada um claro efeito de dilatação transversal na parede.

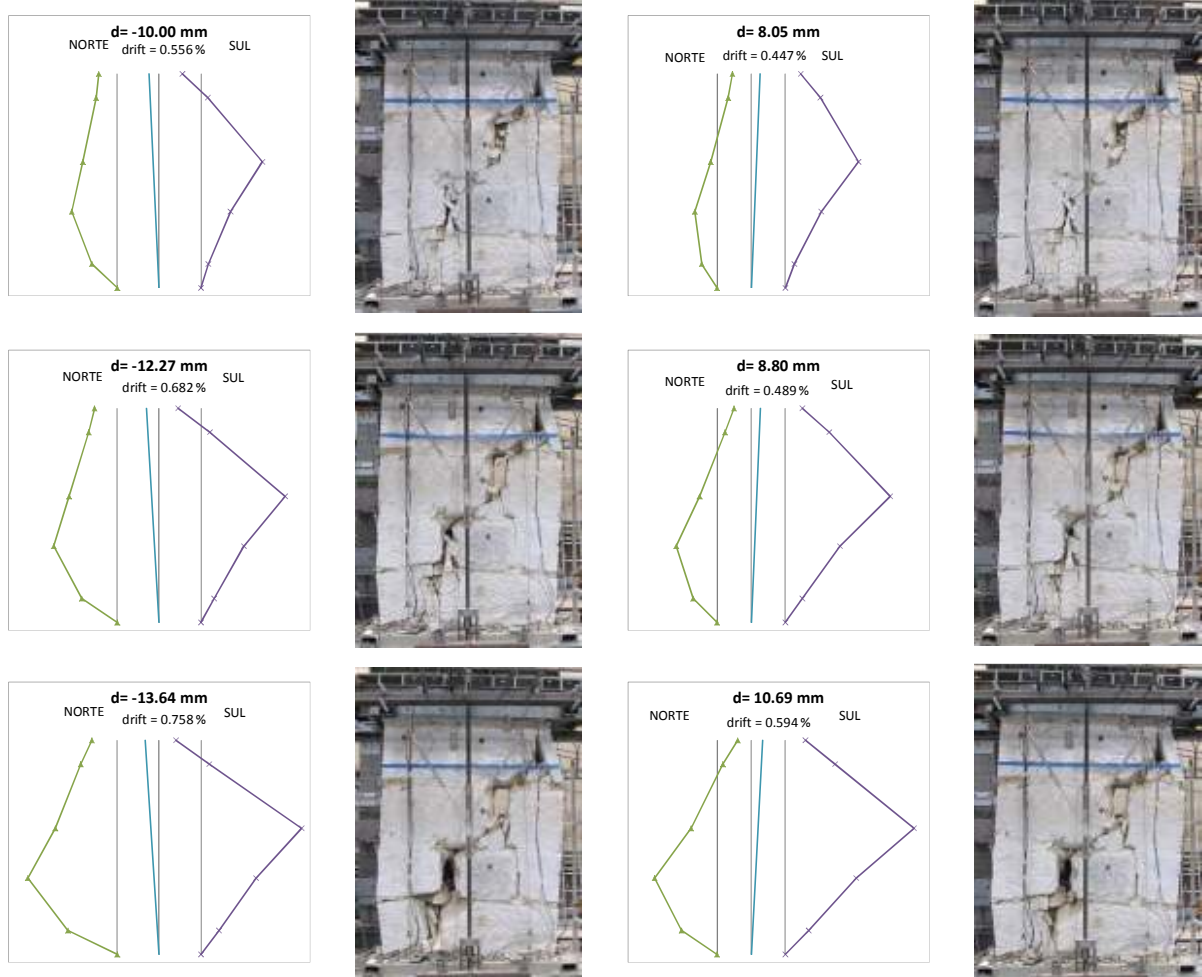
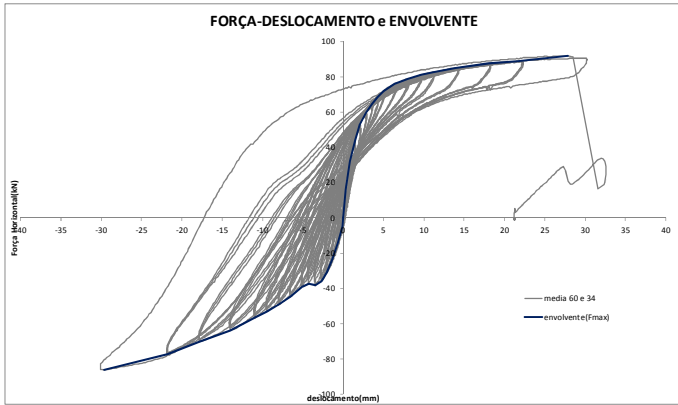


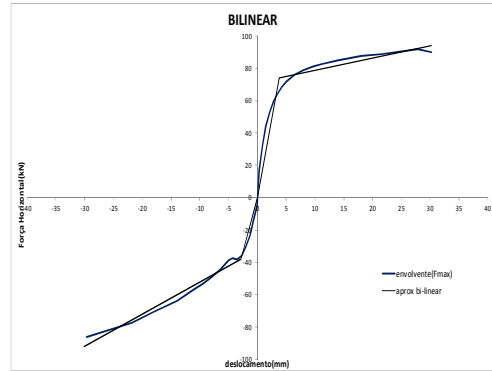
Fig. 4.12 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (PR4 – de -10.00 mm a -13.64 mm e 8.05 mm a 10.69 mm).

4.3.2. ENSAIO PR5

A figura 4.13 ilustra o resumo dos resultados obtidos para a parede PR5 que evidenciou comportamento geral de *rocking* para ciclos positivos, havendo rotura diagonal por corte no final do ensaio, como podemos ver nas figuras 4.13, d) e e). A carga vertical aplicada foi de 300 kN e a paragem deste ensaio foi devida à rotura da parede, com forte risco de instabilidade.



a) Diagrama Força/Deslocamento e envoltiva primeira carga



f) Envoltiva de primeira carga e aproximação bilinear



b) d inicial-



c) d inicial+



d) d max-

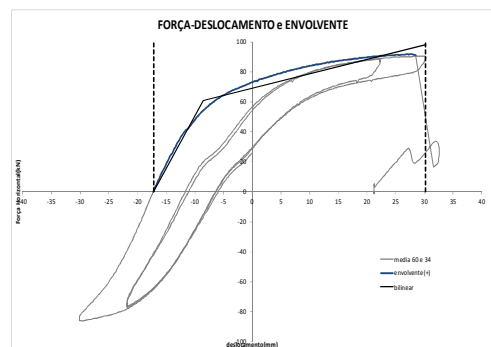


e) d max+

Tabela 4.5. – Parâmetros obtidos da envoltiva (PR5)

	$F_{max}$ [kN]	$d_{max}$ [mm]	$d_y$ [mm]	$\mu$	$K_e$ [kN/m]
+	91.7	30.2	3.8	7.9	19421
-	-86.1	-30.1	-2.9	10.4	12987

g) Resumo de parâmetros globais



h) Envoltiva do último ciclo

Fig. 4.13 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (PR5): a) diagrama força-deslocamento, b) a e) fotografias em posições deformadas extremas, f) detalhe e g) parâmetros da envoltiva, h) envoltiva do último ciclo.

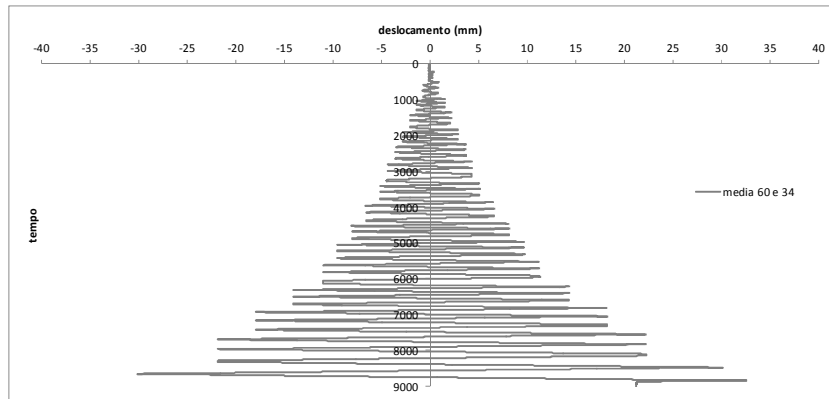
Neste ensaio, durante a aplicação da carga vertical houve abertura de fendas e esmagamento de algumas pedras. A dissipação de energia é reduzida se se tomar em conta cada ciclo individualmente, mas num todo, para os ciclos negativos, ela ainda é considerável. Quando comparada a força para um deslocamento no último ciclo com o ciclo seguinte verifica-se, que para os ciclos positivos não houve perda de força, mas para os negativos existe uma queda ligeira. Para o mesmo patamar de deslocamento a queda de resistência é praticamente nula.

A partir destes dados foi possível traçar a envolvente e aproximar a curva bilinear com rigidez pós-cedência que permitiu determinar os valores apresentados na tabela 4.5. A curva bilinear adotada apresenta-se bastante próxima da envolvente em ambos os sentidos, realçando-se que para o sentido negativo é uma aproximação que ainda acompanha a tendência de crescimento da envolvente.

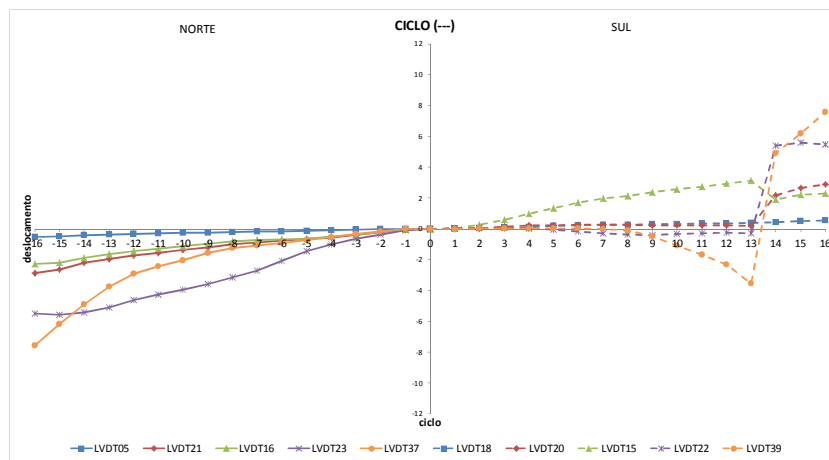
Como se pode verificar pelos parâmetros calculados, as diferenças entre os ciclos positivos e negativos não são muito grandes, salvo na rigidez inicial. Nesta última, as diferenças são maiores no caso de se usar diretamente os diagramas reais, obtendo-se 32843 kN/m e 18668 kN/m, respetivamente, para o sentido positivo e negativo.

À semelhança de casos anteriores, do estudo destes dados apenas para o último ciclo positivo, obtém-se uma nova aproximação bilinear (figura 4.13 h)) donde resulta o deslocamento de cedência de 8.7 mm a que corresponde uma menor ductilidade de 5.4.

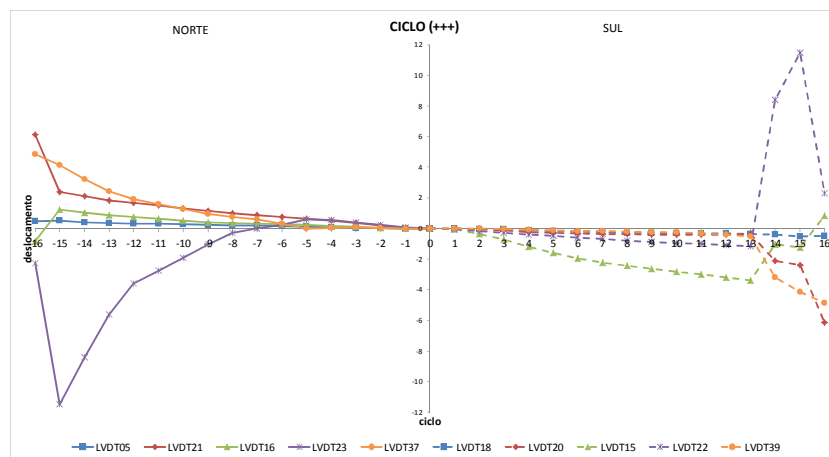
Com os diagramas dos deslocamentos dos transdutores associados às juntas laterais verifica-se qual foi a junta que mais abriu com o efeito de *rocking* (figuras 4.14 b) e c)). Ao analisar os gráficos percebe-se que é necessário algum cuidado no tratamento dos dados, pois nem todos os sensores dão a informação esperada. Expurgando os resultados destes, LVDTs 23 e 22 (últimos três ciclos) para os ciclos positivos, obtém-se abertura máxima de juntas de 6.13 mm e de 7.67 mm, no sentido positivo e negativo, respetivamente.



a)



b)



c)

Fig. 4.14 – Resposta das juntas horizontais laterais (PR5): a) história de deslocamentos globais impostos e deslocamentos nas juntas para b) ciclos negativos e c) ciclos positivos.

Os gráficos das deformadas laterais complementam a informação anterior, observando-se que para o primeiro grupo o comportamento é de flexão.

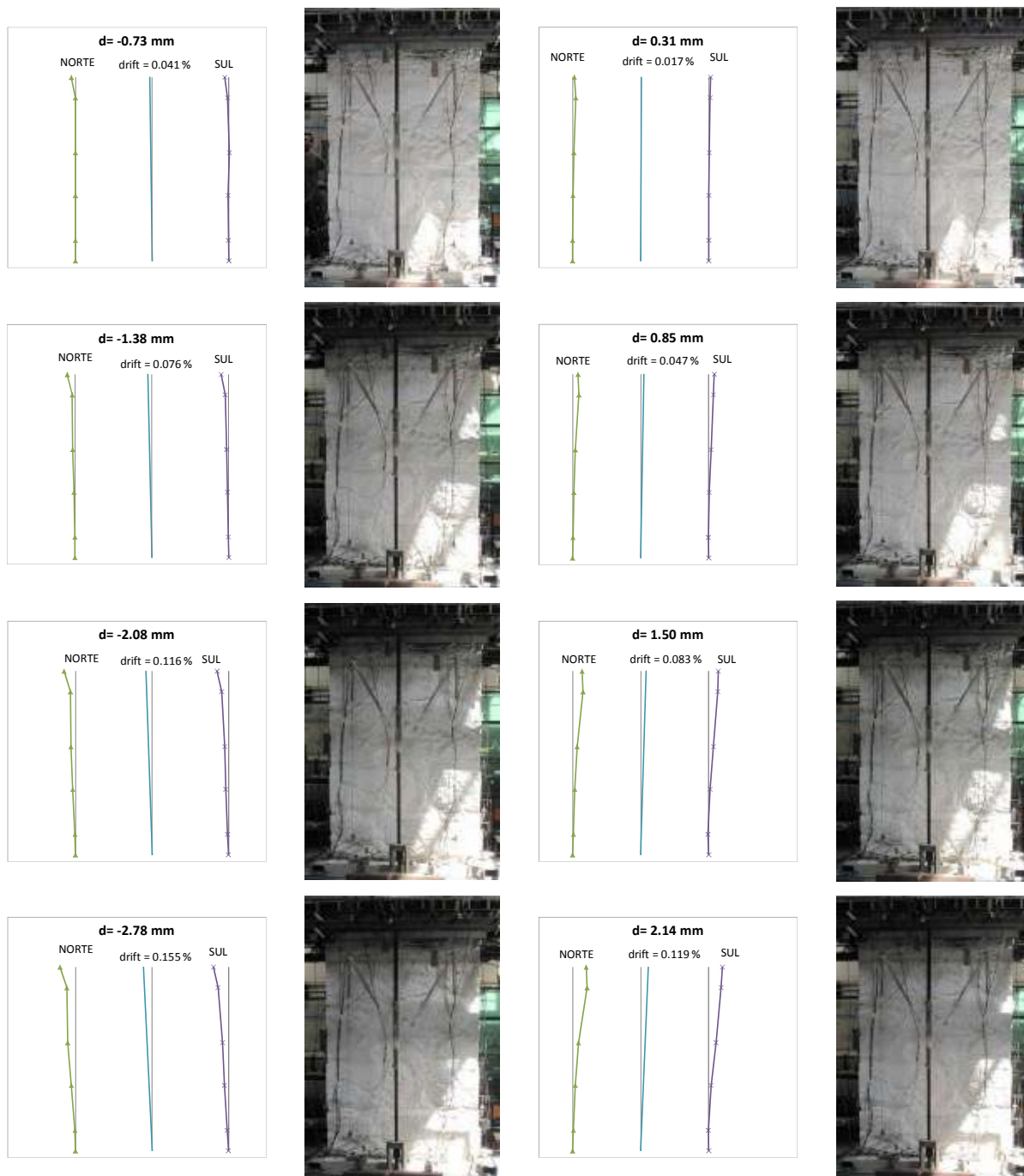


Fig. 4.15 – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (PR5 – até -2.78 mm e 2.14 mm).

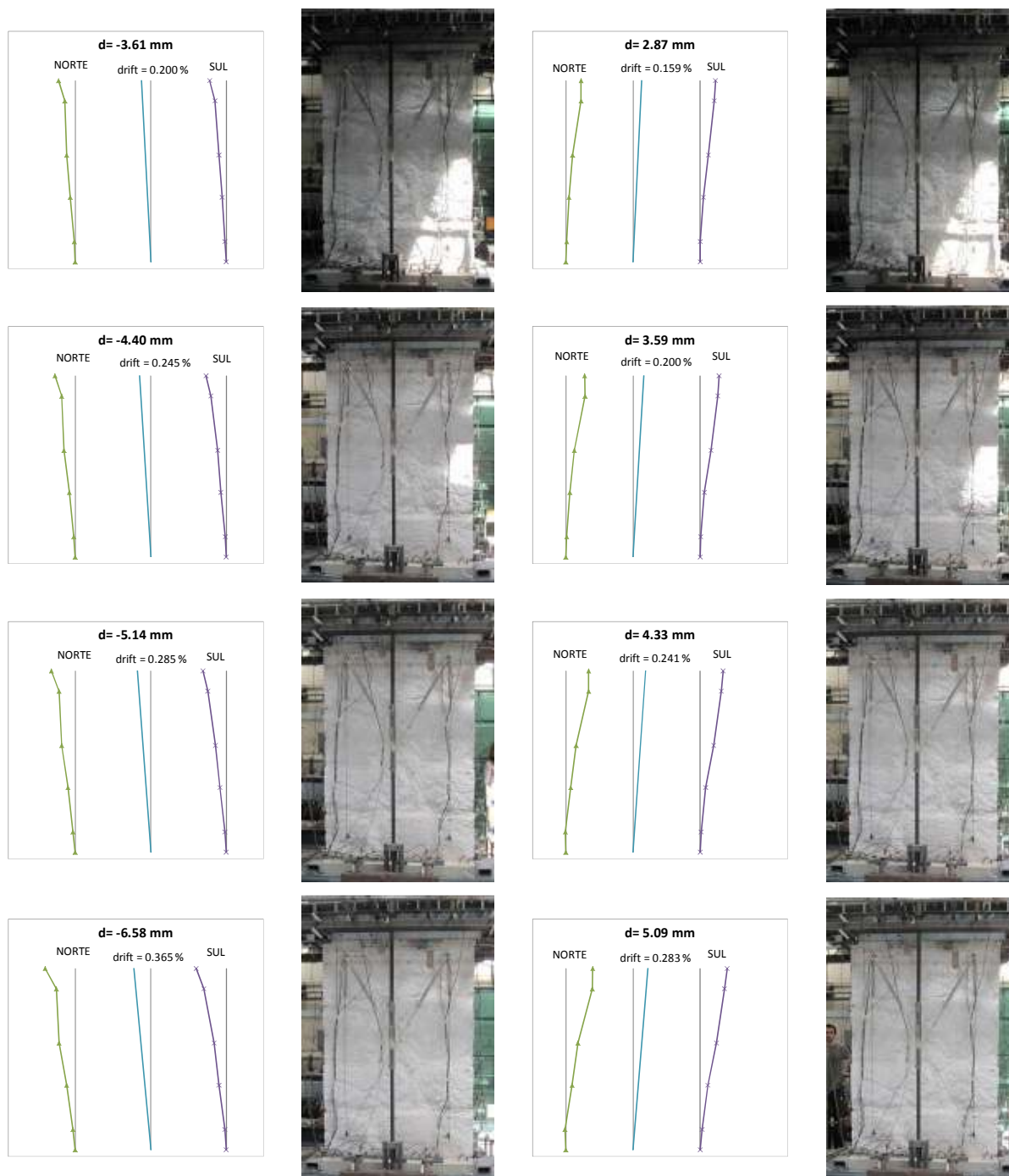


Fig. 4.15 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (PR5 – de -3.61 mm a -6.58 mm e 2.87 mm a 5.09 mm).

Um deslizamento na pedra da base do lado norte começa a notar-se.

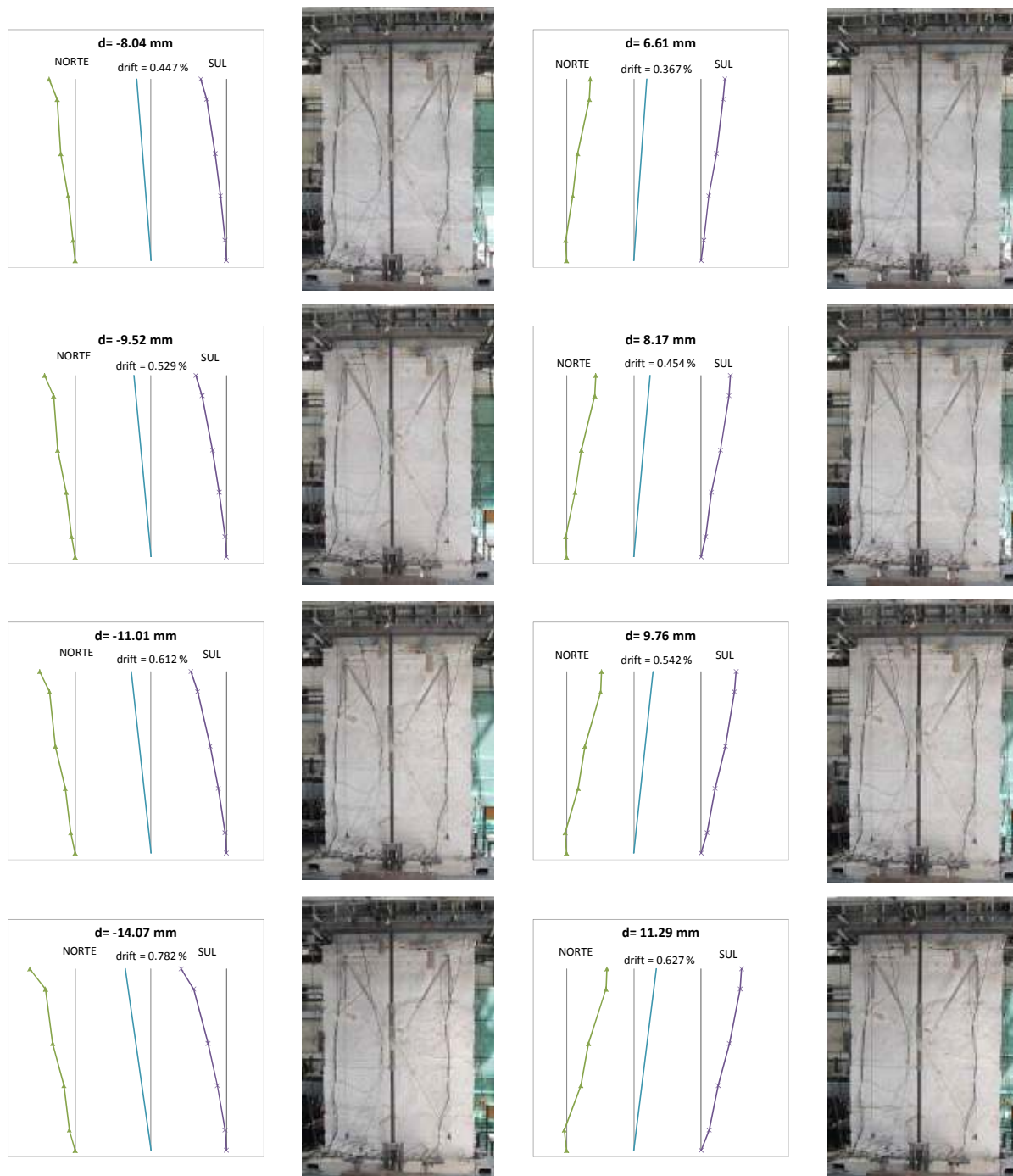


Fig. 4.15 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (PR5 – de -8.04 mm a -14.07 mm e 6.61 mm a 11.29 mm).

Verificou-se uma rotura diagonal por corte abrupta pelo último deslocamento, tendo vindo a aumentar o deslizamento para os ciclos positivos.

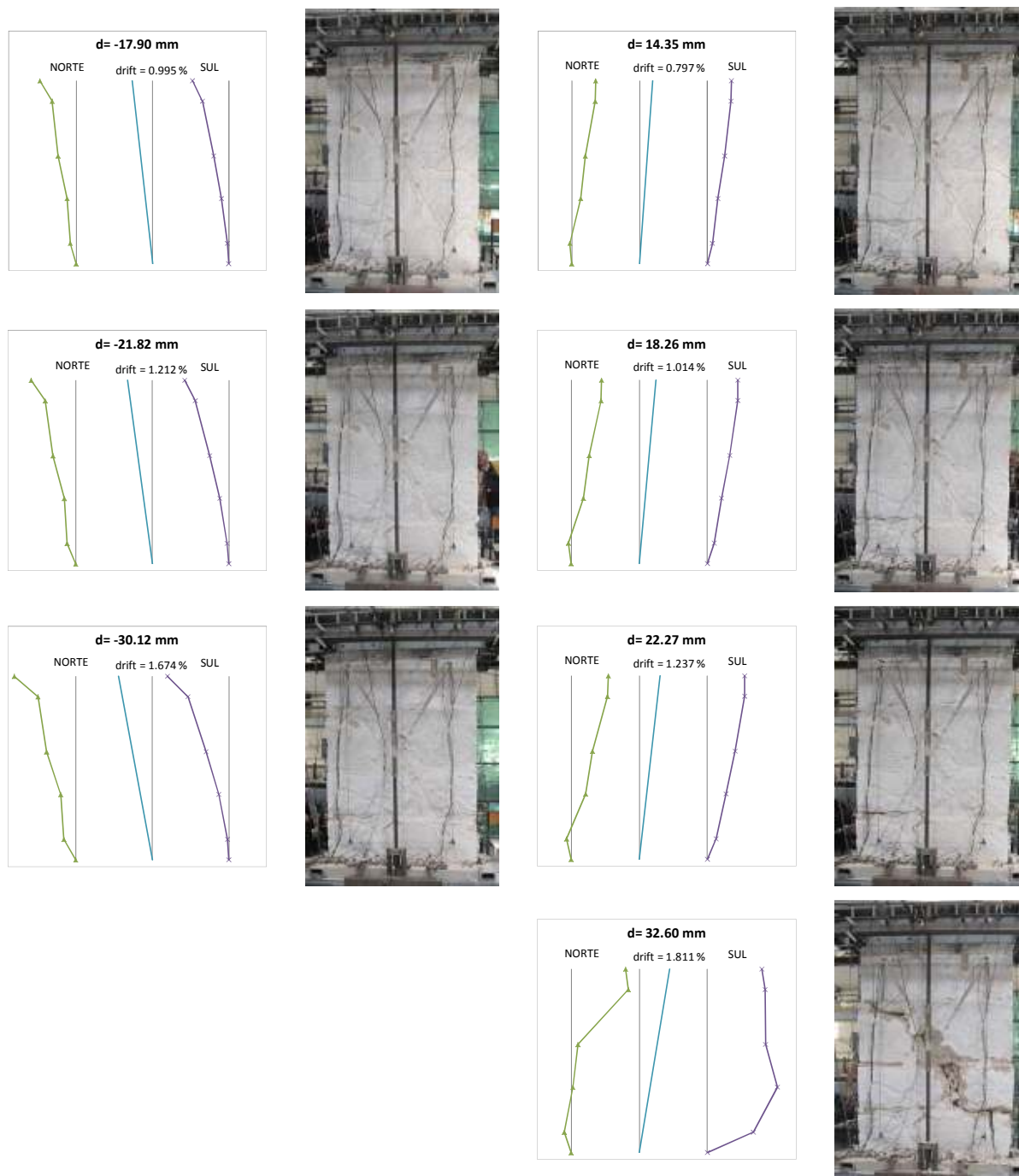
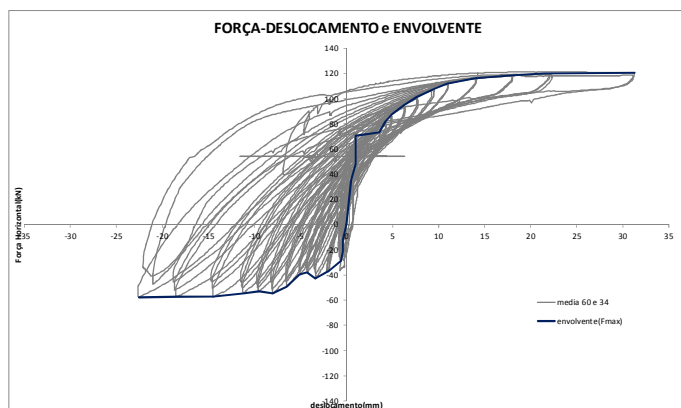


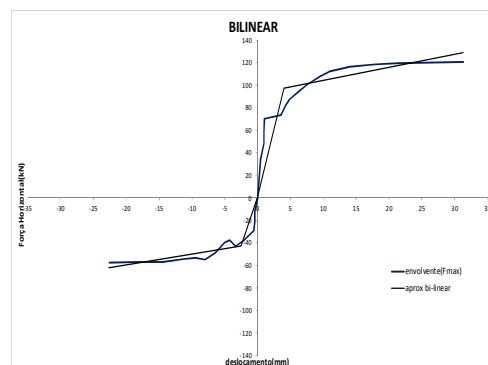
Fig. 4.15 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, *d* em mm (PR5 – de -17.90 mm a -30.12 mm e 14.35 mm a 32.60 mm).

### 4.3.3. ENSAIO PR6

A resposta global da parede PR6, sob carga vertical de 450 kN, encontra-se resumida na figura 4.16, que evidencia um comportamento de flexão com deslizamento para os ciclos negativos, havendo rotura diagonal por corte, como se pode ver nas figuras 4.16, d) e e). A paragem deste ensaio foi devida à instabilidade da parede, tendo mesmo que se recorrer à colocação de uma cinta.



a) Diagrama Força/Deslocamento e envoltiva primeira carga



f) Envoltiva de primeira carga e aproximação bilinear



b) d inicial-



c) d inicial+



d) d max-

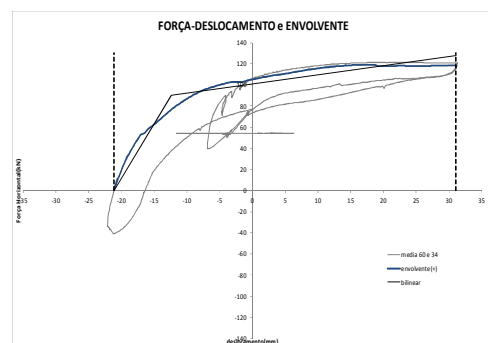


e) d max+

Tabela 4.6. – Parâmetros obtidos da envoltiva (PR6)

	$F_{max}$ [kN]	$d_{max}$ [mm]	$d_y$ [mm]	$\mu$	$K_e$ [kN/m]
+	121.4	31.3	4.0	7.8	21318
-	-57.7	-22.7	-2.5	9.1	15563

g) Resumo de parâmetros globais



h) Envoltiva do último ciclo

Fig. 4.16 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (PR6): a) diagrama força-deslocamento, b) a e) fotografias em posições deformadas extremas, f) detalhe e g) parâmetros da envoltiva, h) envoltiva do último ciclo.

Neste ensaio, a aplicação da carga vertical provocou abertura de fendas e notou-se esmagamento de algumas pedras. Pelo diagrama da figura 4.16 a) conclui-se que houve alguma dissipação de energia para os ciclos negativos, não havendo perda de força quando comparada para um deslocamento no último ciclo com o ciclo seguinte para os ciclos positivos e ainda para um mesmo deslocamento a queda de resistência é muito reduzida, exceto para os últimos ciclos negativos. No final do ensaio houve uma repetição de um ciclo positivo (*pushover*).

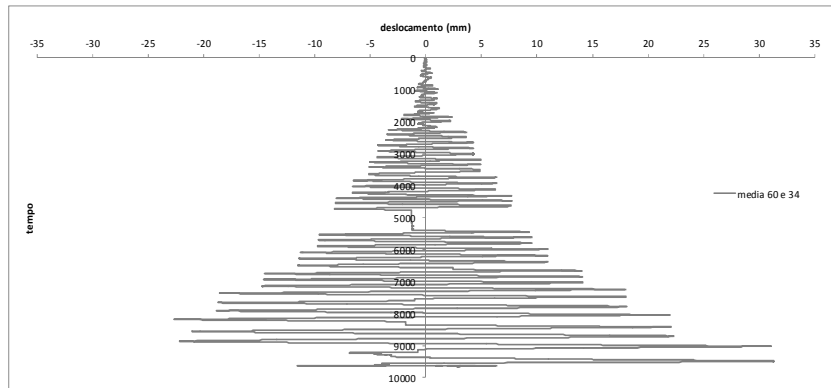
A partir destes dados obtidos foi possível traçar a curva envolvente bilinear e determinar os valores apresentados na tabela 4.6. A curva bilinear adotada está próxima do resultado real, sendo que a envolvente já apresenta patamar de cedência tanto para os ciclos positivos como os negativos.

Como se pode verificar pelos parâmetros calculados, existe uma discrepância entre os valores da força máxima para os ciclos positivos e negativos. O menor valor da força máxima para os ciclos negativos foi devido à perda de apoio da parede.

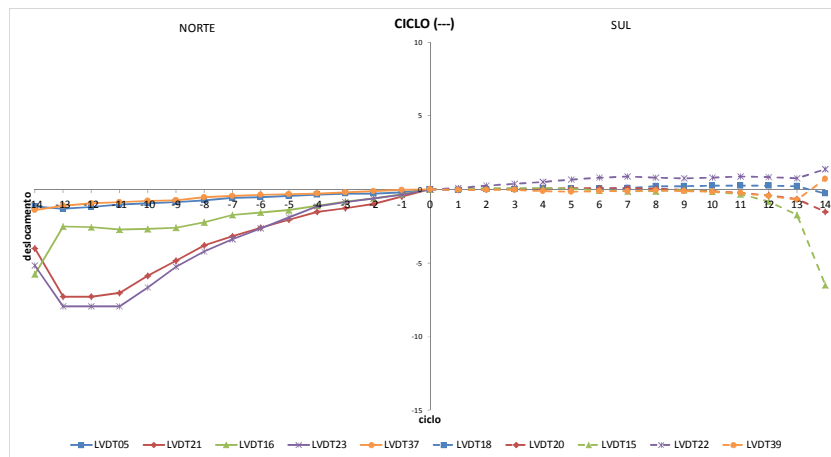
Tal como em casos anteriores, verifica-se um ganho de força para os ciclos positivos, pelo que a envolvente escolhida não será a mais correta para quantificar ductilidade. Novamente para o último ciclo positivo, traçou-se a envolvente (figura 4.16 h)) para desta forma obter um deslocamento de cedência e uma ductilidade mais realistas, respetivamente de 8.75 mm e 6.0.

A rigidez que se verificou (diretamente da envolvente) foi superior à indicada na tabela 3.6, tendo sido atingido 60841 kN/m e 44047 kN/m, respetivamente para o ciclo positivo e negativo. Estes valores muito superiores aos indicados na tabela poderão dever-se ao estranho comportamento inicial verificado nos diagramas força/deslocamento que por sua vez podem ter sido devido a erros de leitura ou mesmo de falhas do mecanismo de roldanas por onde os fios passavam.

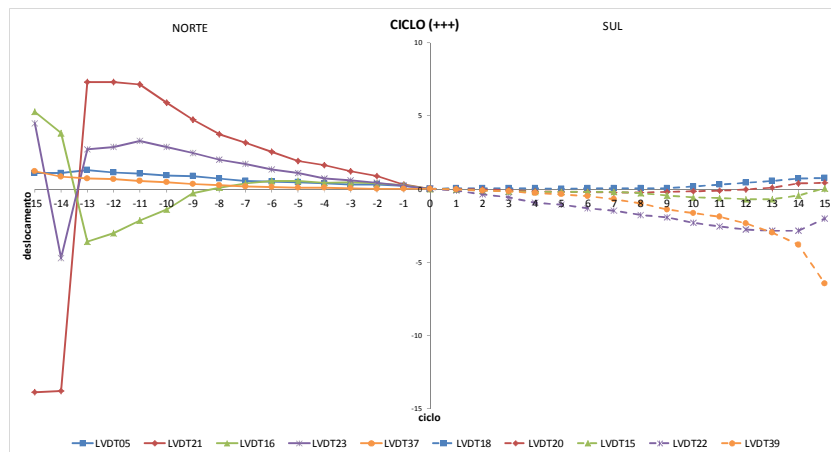
A resposta dos transdutores laterais apresenta uma aproximação do esperado, principalmente nos primeiros ciclos em que as juntas do lado norte abrem e as do lado sul fecham quando o deslocamento é positivo e vice-versa (figuras 4.17 b) e c)). Excluindo resultados anómalos, LVDTs 15 para os ciclos negativos e para os positivos os 16 e 21 para os dois últimos, obtém-se as maiores aberturas de 7.28 mm e de 1.37 mm, respetivamente no sentido positivo e negativo. No final verifica-se deslizamento maior do lado norte, provocando alterações nas leituras dos sensores.



a)



b)



c)

Fig. 4.17 – Resposta das juntas horizontais laterais (PR6): a) história de deslocamentos globais impostos e deslocamentos nas juntas para b) ciclos negativos e c) ciclos positivos.

Os gráficos das deformadas laterais auxiliam a compreensão do comportamento geral da parede, onde se pode visualizar que o comportamento inicial é de flexão e permanece quase até ao fim para os ciclos positivos.

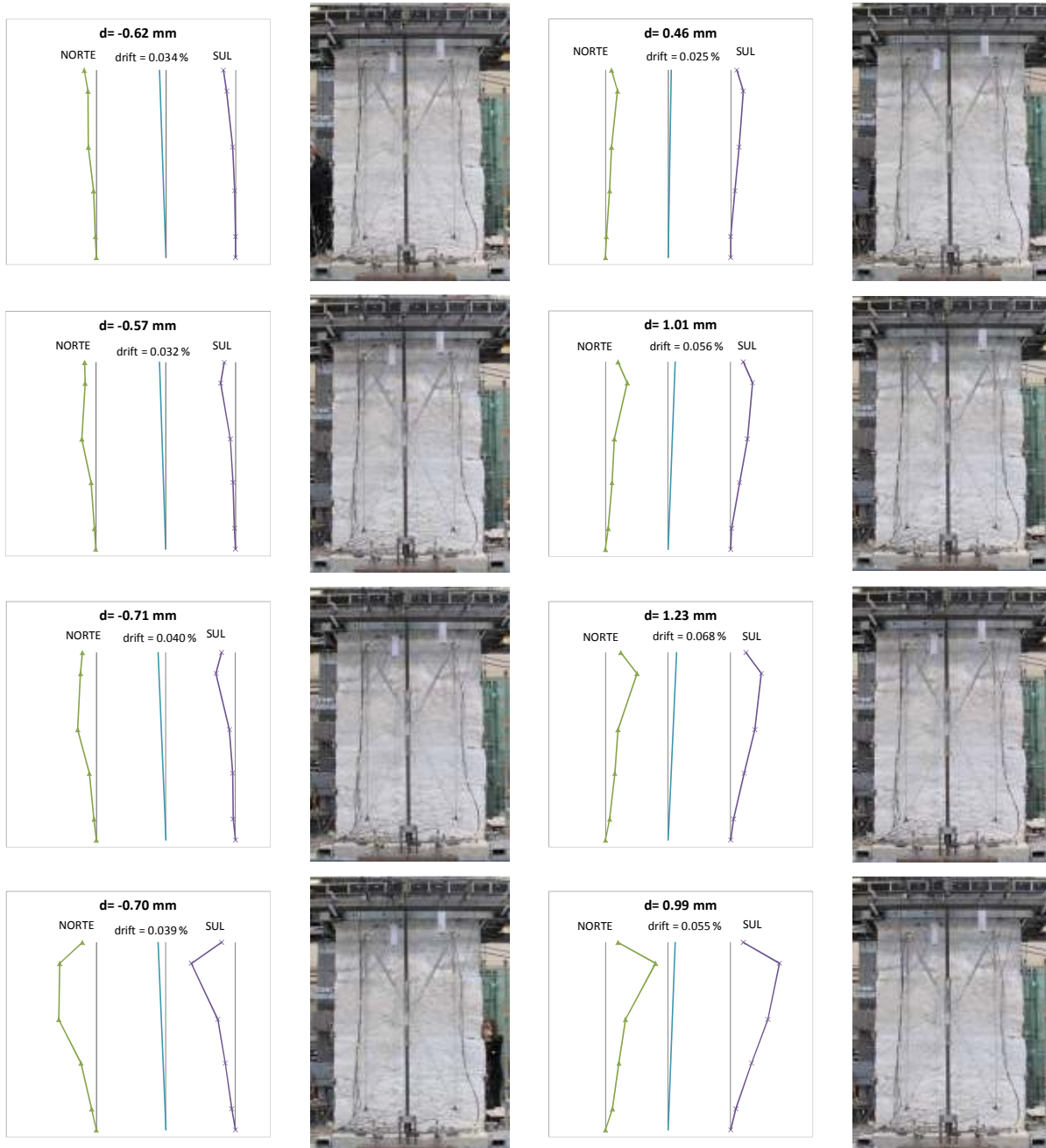


Fig. 4.18 – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, *d* em mm (PR6 – até -0.70 mm e 0.99 mm).

Nos próximos deslocamentos já se verifica algum deslizamento nas deformadas que a olho nu não se notavam.

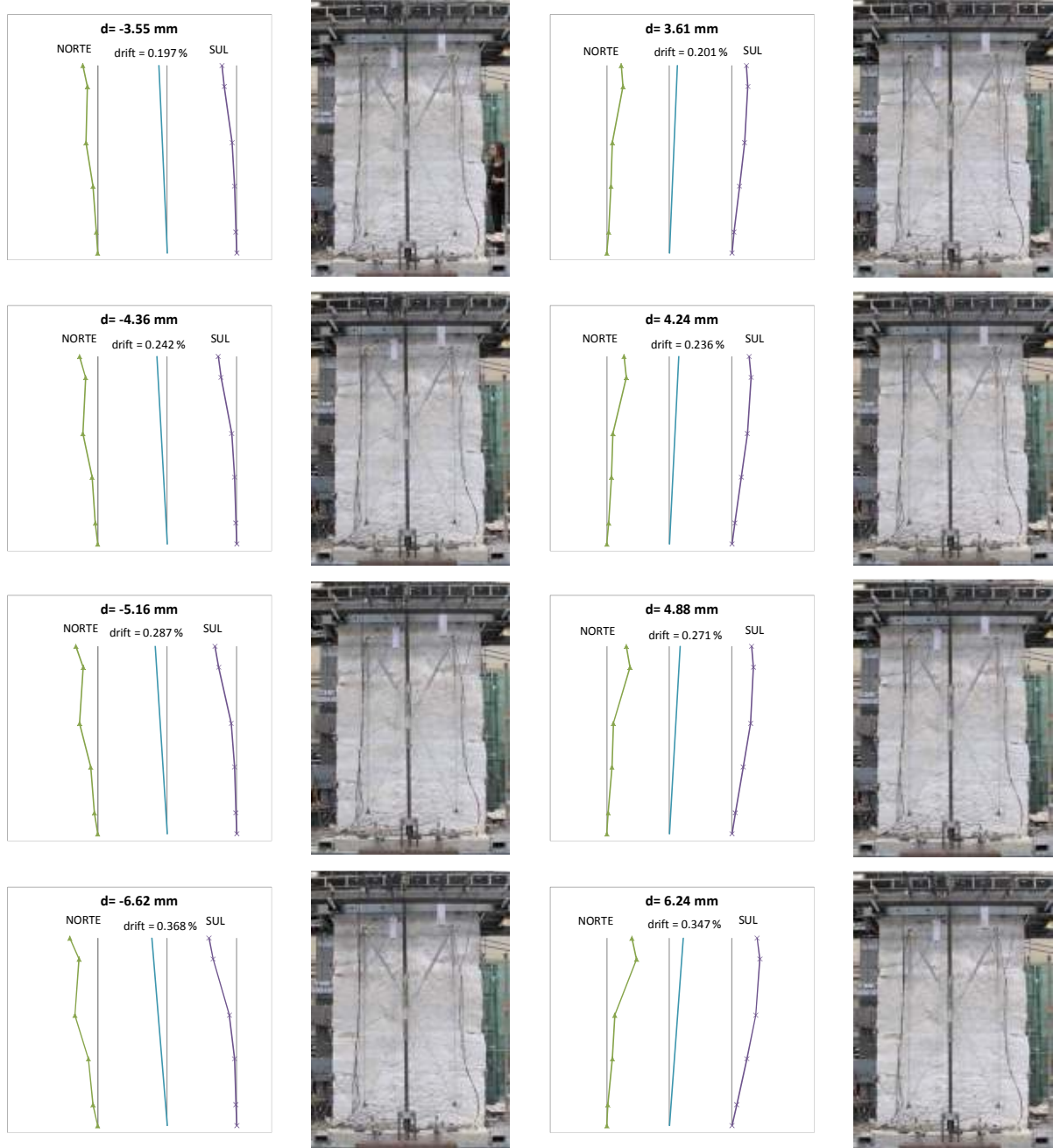


Fig. 4.18 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (PR6 – de -3.55 mm a -6.62 mm e 3.61 mm a 6.24 mm).

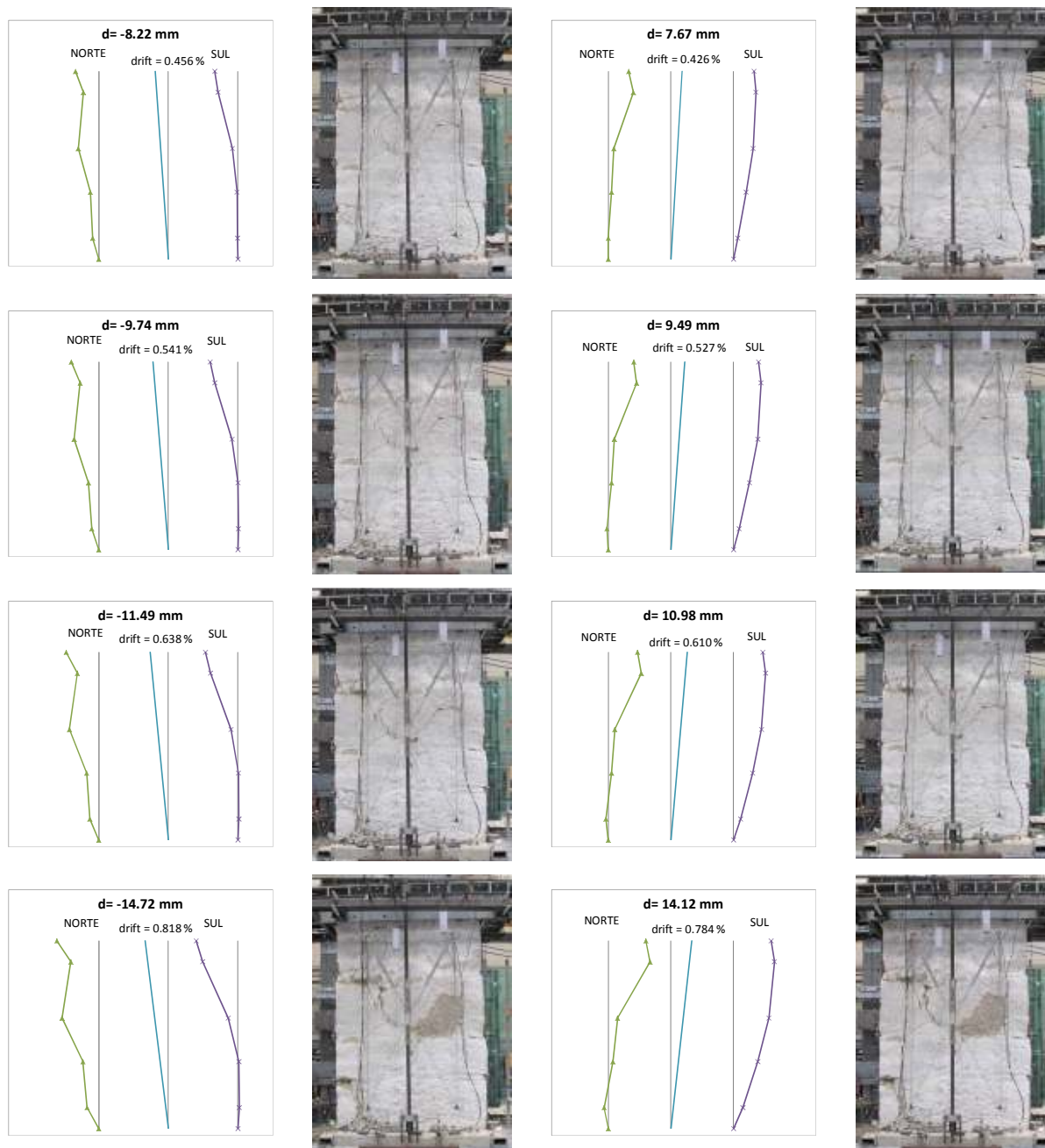


Fig. 4.18 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (PR6 – de -8.22 mm a -14.72 mm e 7.67 mm a 14.12 mm).

É visível a rotura por corte nas deformadas seguintes.

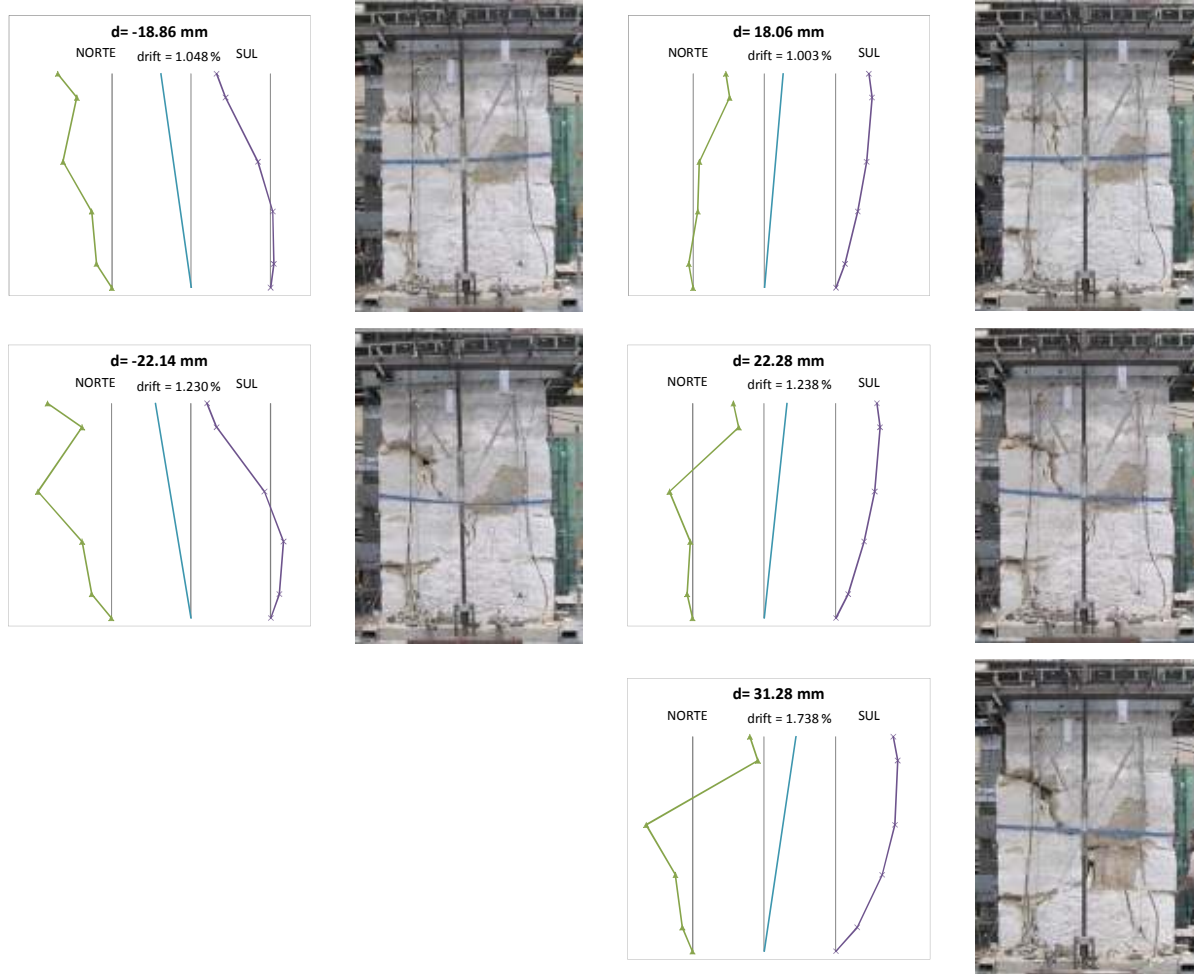


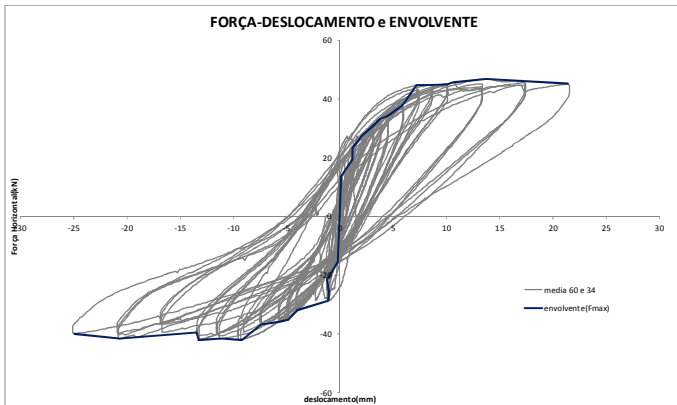
Fig. 4.18 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*,  $d$  em mm (PR6 – de -18.86 mm a -22.14 mm e 18.06 mm a 31.28 mm).

#### 4.4. PAREDES TIPO IR

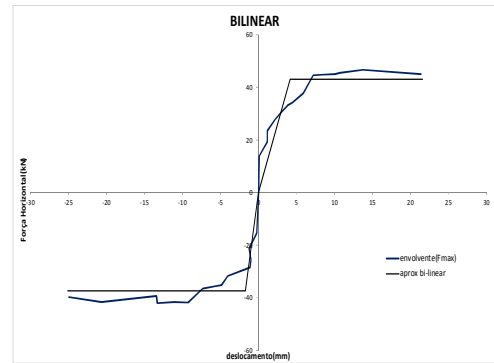
##### 4.4.1. ENSAIO IR4

Com este ensaio iniciou-se o estudo das paredes irregulares, enriquecendo a variedade de geometrias e permitindo uma análise comparativa para conhecer as diferenças entre as diversas paredes.

A figura 4.19 apresenta o resumo dos resultados obtidos para a parede IR4, com carga vertical de 150kN, que sofreu uma rotura diagonal por corte nos dois sentidos como evidenciado nas figuras 4.19, d) e e).



a) Diagrama Força/Deslocamento e envolvente primeira carga



f) Envolvente de primeira carga e aproximação bilinear



b) d inicial-



c) d inicial+



d) d max-

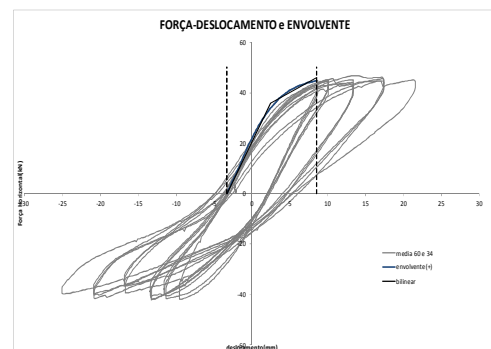


e) d max+

Tabela 4.7. – Parâmetros obtidos da envolvente (IR4)

	$F_{max}$ [kN]	$d_{max}$ [mm]	$d_y$ [mm]	$\mu$	$K_e$ [kN/m]
+	45.6	21.6	4.2	5.1	10552
-	-42.1	-25.1	-1.7	14.8	22589

g) Resumo de parâmetros globais



h) Envolvente do ciclo com maior força

Fig. 4.19 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (IR4): a) diagrama força-deslocamento, b) a e) fotografias em posições deformadas extremas, f) detalhe e g) parâmetros da envolvente, h) envolvente do ciclo com maior força.

Neste ensaio, na aplicação da carga vertical, houve abertura de fendas e verificou-se esmagamento e rotura de algumas pedras. Pelo diagrama da figura 4.19 a) conclui-se que houve dissipação de energia, há uma ligeira perda de força quando comparada para um deslocamento no último ciclo com o ciclo seguinte e ainda para um mesmo deslocamento a queda de resistência é muito reduzida.

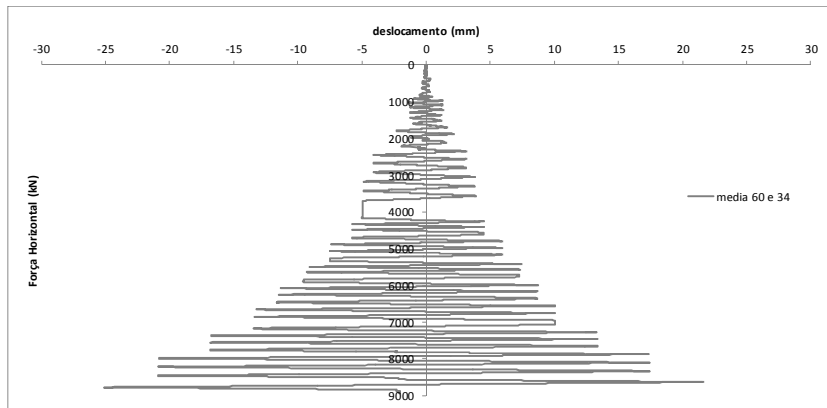
A partir destes dados foi possível traçar a curva bilinear e determinar os valores apresentados na tabela 4.7. A curva bilinear com patamar pós-cedência constitui uma aproximação razoável do resultado real, porque a envolvente tem a tendência esperada para tipo destas paredes.

Como se pode verificar pelos parâmetros calculados, os valores das forças e deslocamentos máximos atingidos são próximos em ambos os sentidos, mas o mesmo não se passa com a ductilidade e a rigidez inicial que são mais elevadas para ciclos negativos.

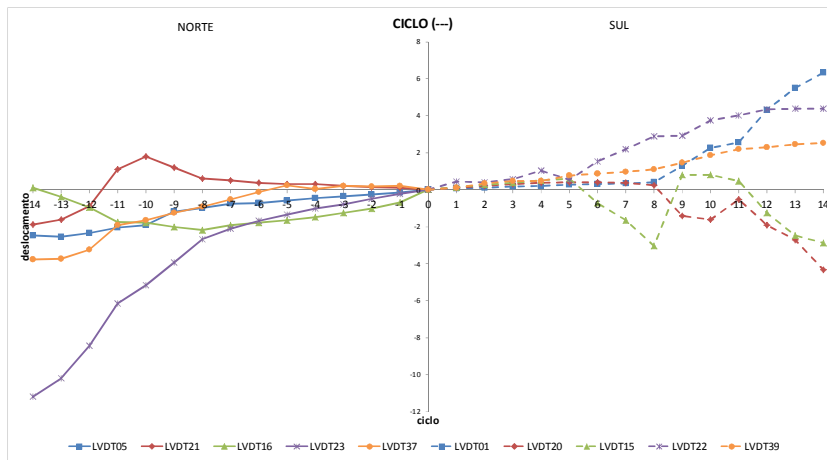
No caso de se adotar a curva envolvente real para calcular a rigidez elástica realmente atingida, obter-se-ia valores muito elevados (rigidez a tender para infinito), o que não seria plausível. Este fato poderá dever-se ao comportamento inicial verificado no diagrama força/deslocamento que pode ter sido causado por erros de leitura ou mesmo de falhas no mecanismo de roldanas, que veio a verificar-se que prendiam os fios. Assim, desprezando os ciclos iniciais, os novos valores calculados para os sentidos positivo e negativo, são, respetivamente, 2.16 mm e -4.03 mm para os deslocamentos de cedência, 10.0 e 6.2 para a ductilidade e 12836 kN/m e 7896 kN/m para a rigidez elástica.

Tendo havido ganho de força para o sentido positivo, traçou-se nova envolvente de forma a determinar qual o valor do deslocamento de cedência e ductilidade realmente atingido. Os novos valores calculados são 5.8 mm e 2.1 para o deslocamento de cedência e ductilidade, respetivamente.

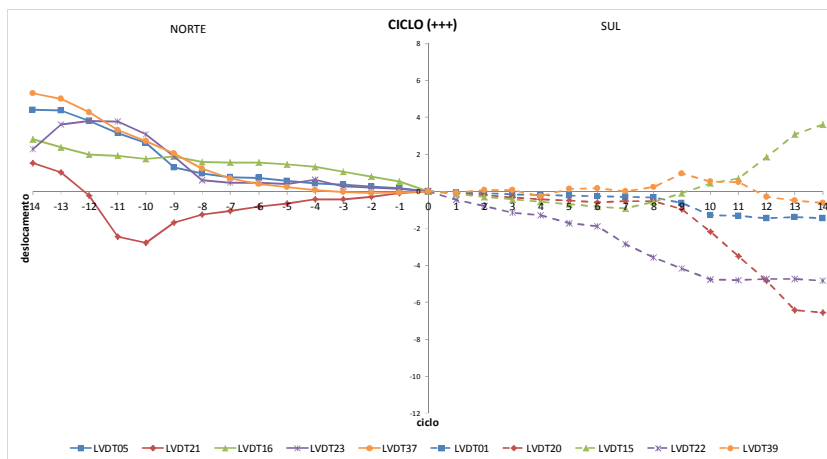
Neste tipo de paredes as juntas laterais não correspondem à mesma posição do lado norte e sul, visto estas serem irregulares. Como algumas pedras partiram a influência sobre estas medidas são mais significativas. Na figura 4.20 apresenta-se a resposta das juntas laterais, registando-se máximas aberturas de juntas de cerca de 5.31 mm e de 6.34 mm, no sentido positivo e negativo, respetivamente, uma vez desprezados resultados fora da tendência esperada, LVDTs 15 para ambos os ciclos, 20 para os negativos, 21 e 39 para os positivos.



a)



b)



c)

Fig. 4.20 – Resposta das juntas horizontais laterais (IR4): a) história de deslocamentos globais impostos e deslocamentos nas juntas para b) ciclos negativos e c) ciclos positivos.

Os gráficos das deformadas laterais complementam a informação anterior, ajudando a perceber quais as pedras que influenciaram no comportamento desta parede. É visível um deslizamento na fase inicial.

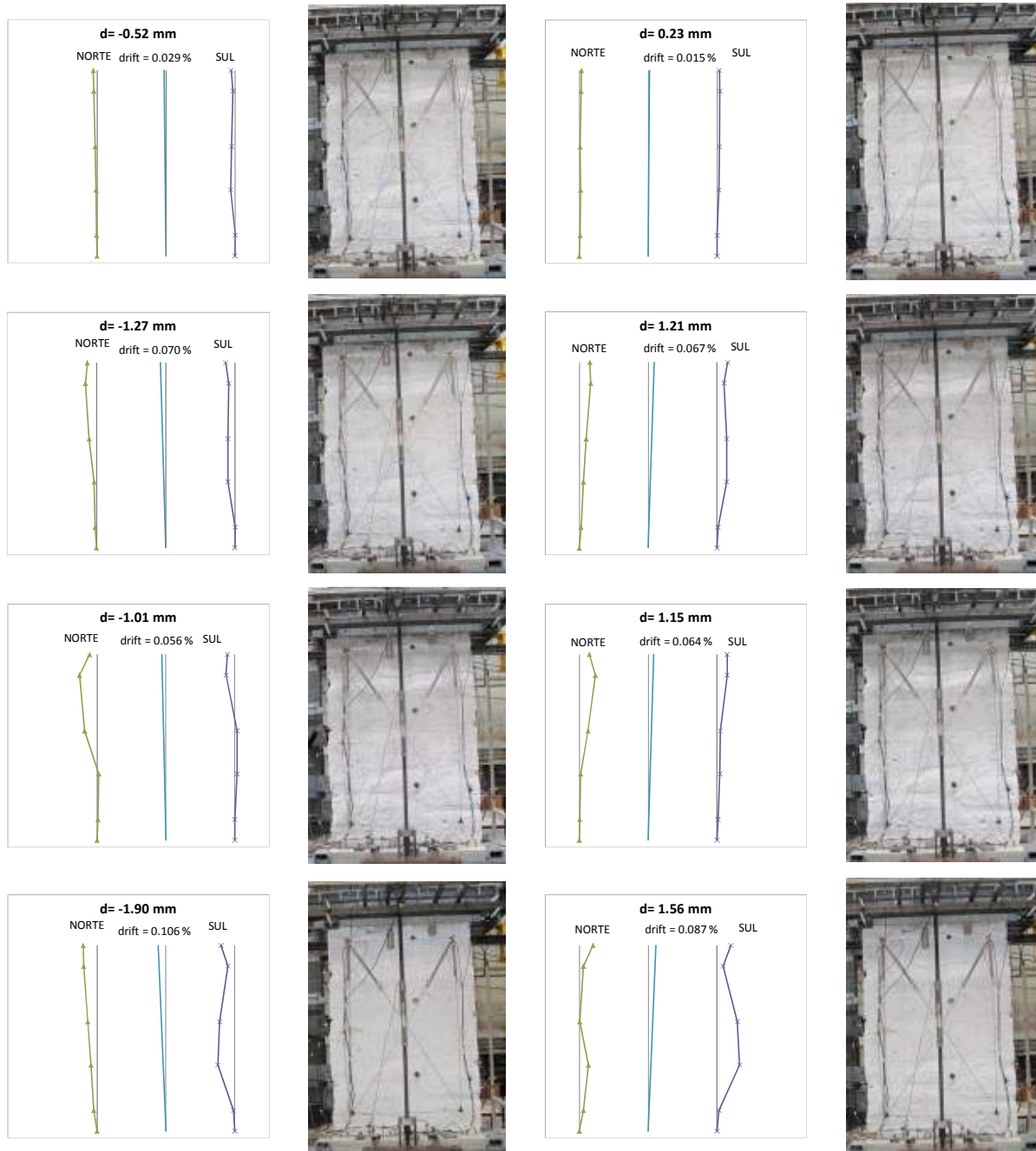


Fig. 4.21 – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (IR4 – até -1.90 mm e 1.56 mm).

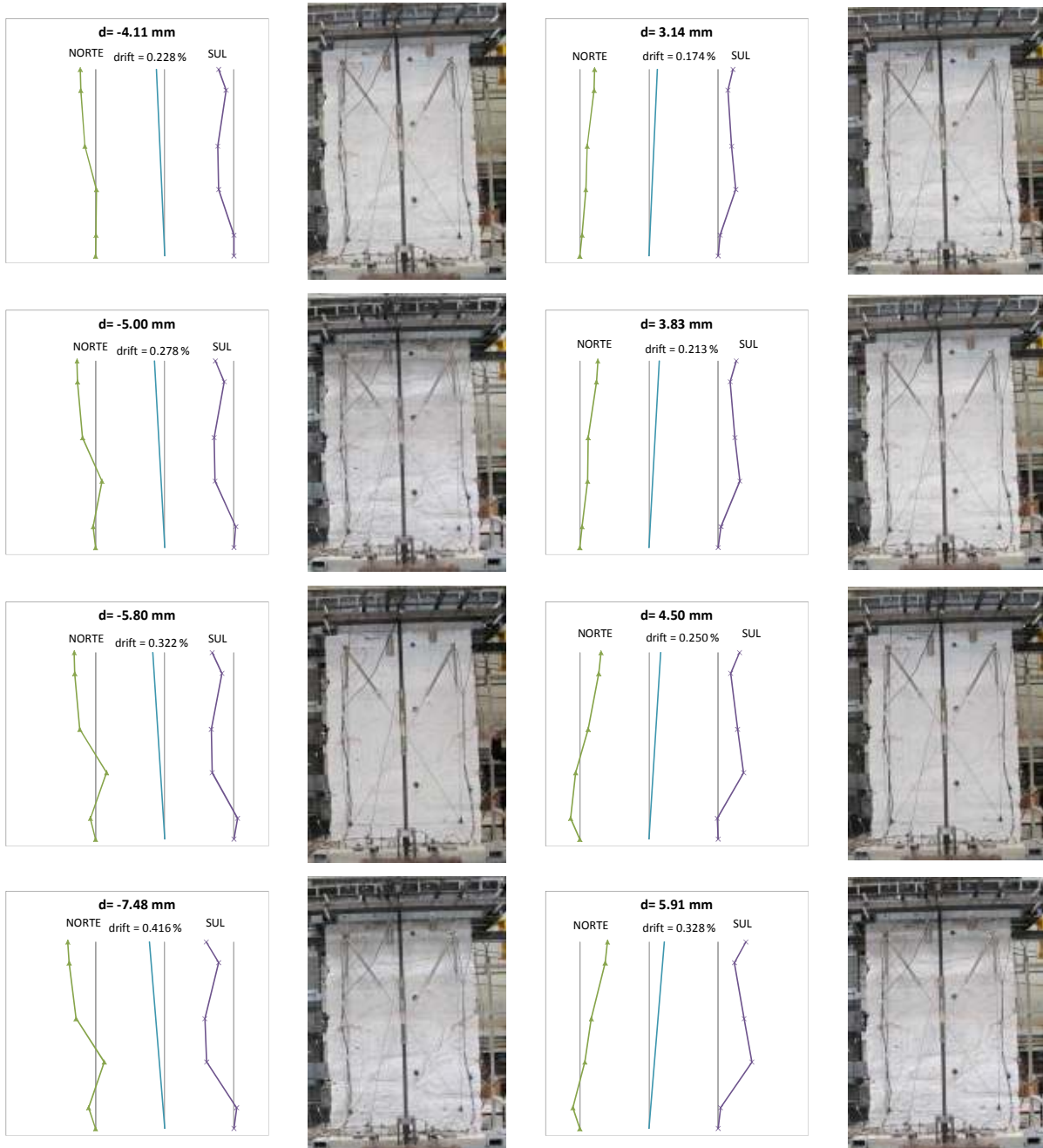


Fig. 4.21 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (IR4 – de -4.11 mm a -7.48 mm e 3.14 mm a 5.91 mm).

Percebe-se a influência que a abertura de fendas provoca nas deformadas quando conjugadas com as fotografias.

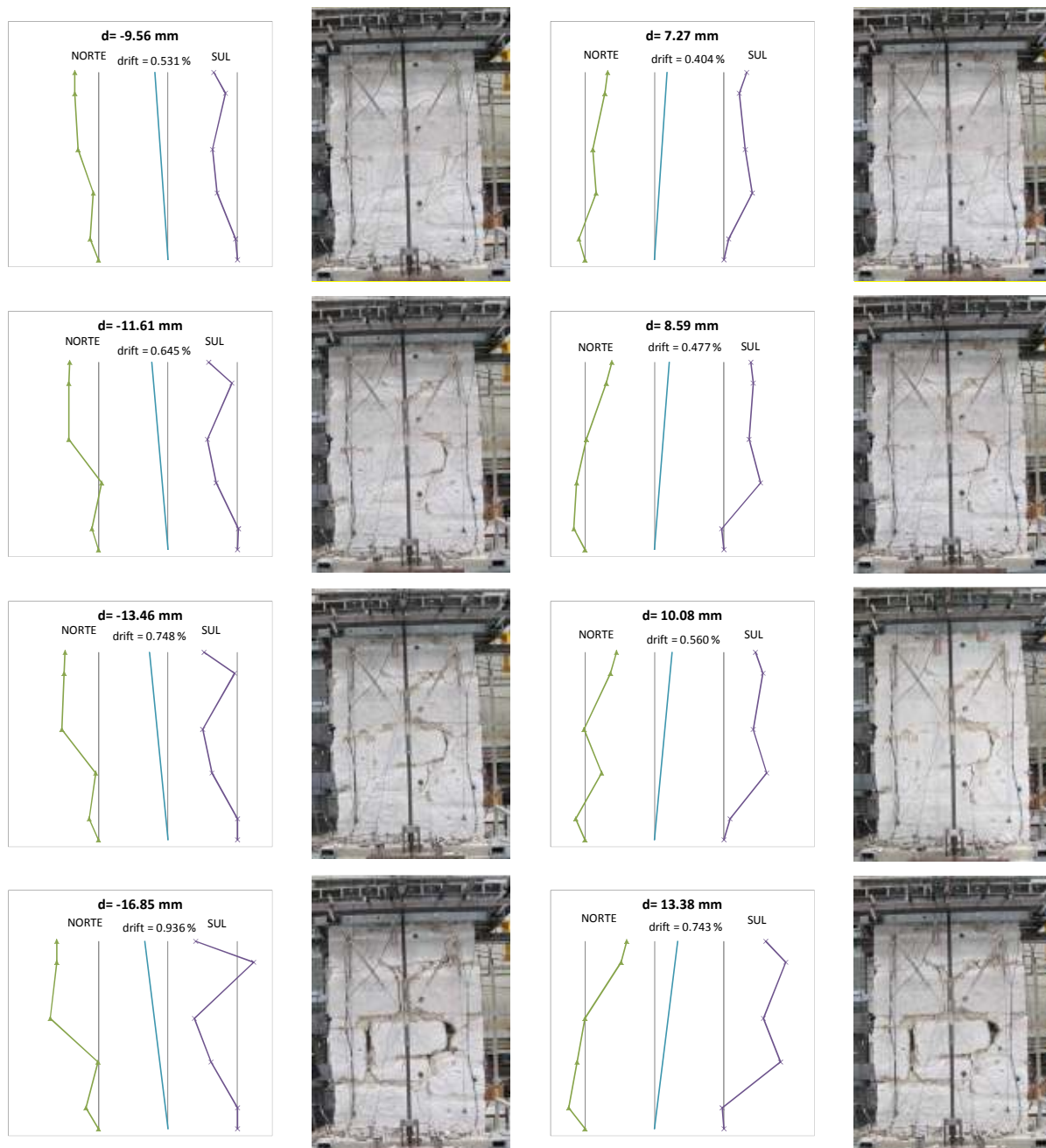


Fig. 4.21 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (IR4 – de -9.56 mm a -16.85 mm e 7.27 mm a 13.38 mm).

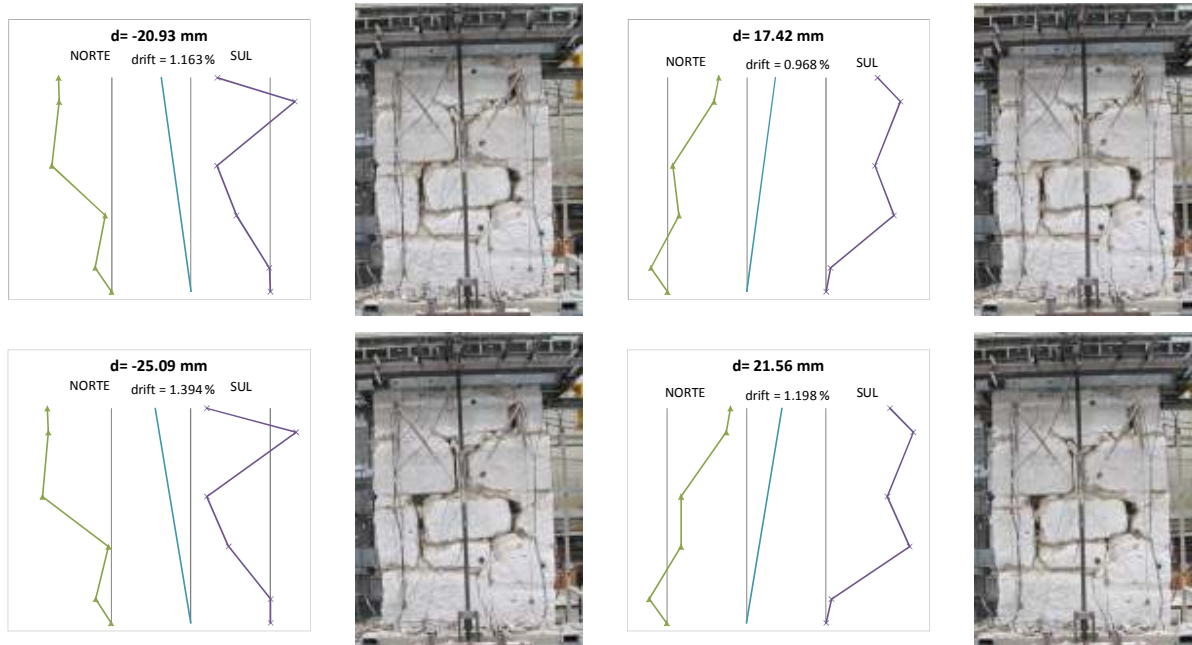
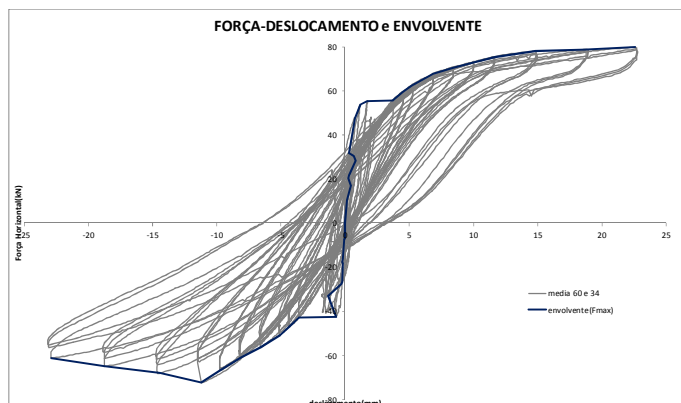


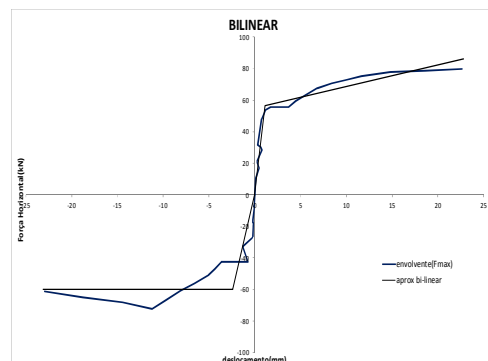
Fig. 4.21 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (IR4 – de -20.93 mm a -25.09 mm e 17.42 mm a 21.56 mm).

#### 4.4.2. ENSAIO IR5

Os resultados obtidos para a parede IR5, sob força axial de 300kN, encontram-se resumidos na figura 4.22, verificando-se que sofreu uma rotura diagonal por corte, destacando quase todo o lado da parede (figuras 4.22, d) e e)) e forçando a paragem do ensaio devido à sua instabilidade.



a) Diagrama Força/Deslocamento e envolvente primeira carga



f) Envolvente de primeira carga e aproximação bilinear



b) d inicial-



c) d inicial+



d) d max-

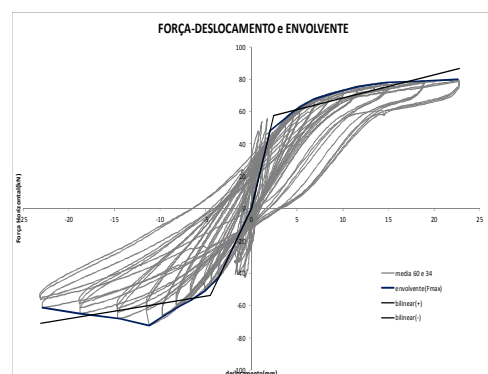


e) d max+

Tabela 4.8. – Parâmetros obtidos da envolvente (IR5)

	$F_{max}$ [kN]	$d_{max}$ [mm]	$d_y$ [mm]	$\mu$	$K_e$ [kN/m]
+	79.9	22.8	1.2	19.8	49512
-	-72.3	-23.1	-2.4	9.6	39116

g) Resumo de parâmetros globais



h) Envolvente desprezando ciclos iniciais

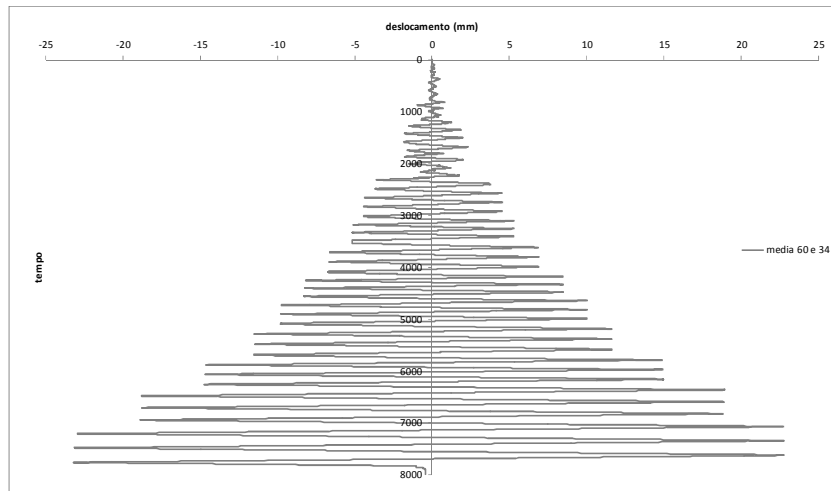
Fig. 4.22 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (IR5): a) diagrama força-deslocamento, b) a e) fotografias em posições deformadas extremas, f) detalhe e g) parâmetros da envolvente, h) envolvente desprezando ciclos iniciais.

Como em ensaios anteriores, na aplicação da carga vertical, houve abertura de fendas e esmagamento e rotura de algumas pedras. Conclui-se que houve alguma dissipação de energia, há perda de força quando comparada para um deslocamento no último ciclo com o ciclo seguinte pós-pico e ainda para um mesmo deslocamento a queda de resistência é muito reduzida.

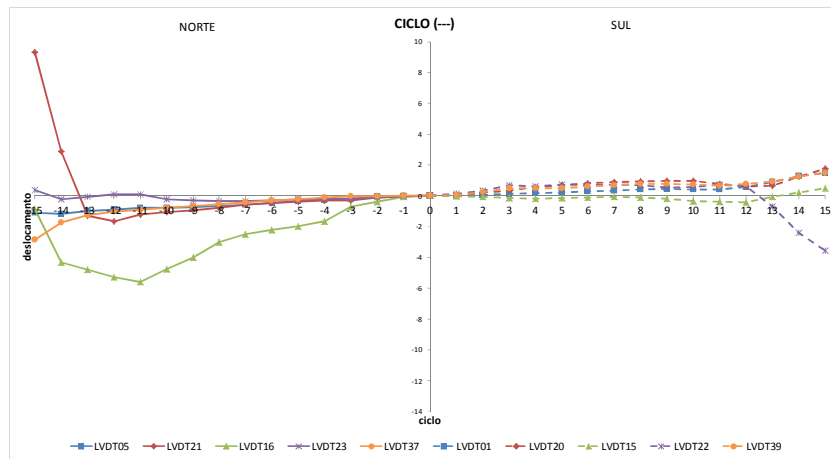
A partir destes dados foi possível traçar a curva bilinear e determinar os valores apresentados na tabela 4.8. No sentido negativo, foi adotado patamar pós-cedência porque a envolvente mostra já uma clara tendência de perda de resistência. Com estas aproximações, os parâmetros calculados para ambos os sentidos não são concordantes, com exceção da força e deslocamentos máximos.

De fato, no diagrama força/deslocamento verifica-se novamente um comportamento inicial estranho, pelo que se fez um novo exercício de desprezar a fase inicial do ensaio, traçando de novo a envolvente, obtendo-se valores para sentidos positivo e negativo, respetivamente, de 2.4 mm e 4.5 mm para o deslocamento de cedência, de 9.5 e 5.1 para a ductilidade e de 23936 kN/m e 11789 kN/m para a rigidez elástica. Não obstante, os resultados permanecem bastante diferentes entre positivo e negativo, o que, manifestamente está relacionado com a maior debilidade da parede no sentido positivo evidenciada figuras 4.22 d) e e).

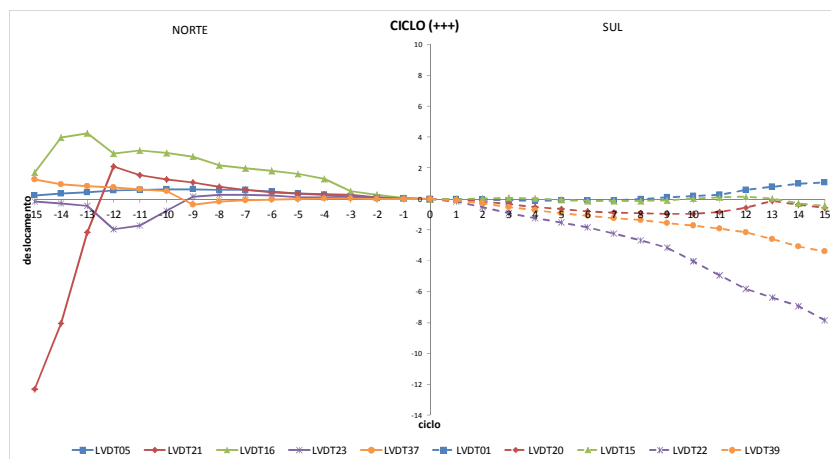
Como nos ensaios anteriores apresenta-se de seguida os diagramas de deslocamentos das juntas laterais, verificando que para os últimos ciclos a leitura dos mesmos não pode ser considerada. Excluindo resultados fora da tendência esperada, LVDTs 21 em ambos os ciclos e 22 para os negativos, notam-se máximas aberturas de juntas de cerca de 4.26 mm e de 1.75 mm, no sentido positivo e negativo, respetivamente.



a)



b)



c)

Fig. 4.23 – Resposta das juntas horizontais laterais (IR5): a) história de deslocamentos globais impostos e deslocamentos nas juntas para b) ciclos negativos e c) ciclos positivos.

Para uma melhor compreensão da figura 4.22 a), os gráficos das deformadas laterais apresentam uma forma de fácil percepção.

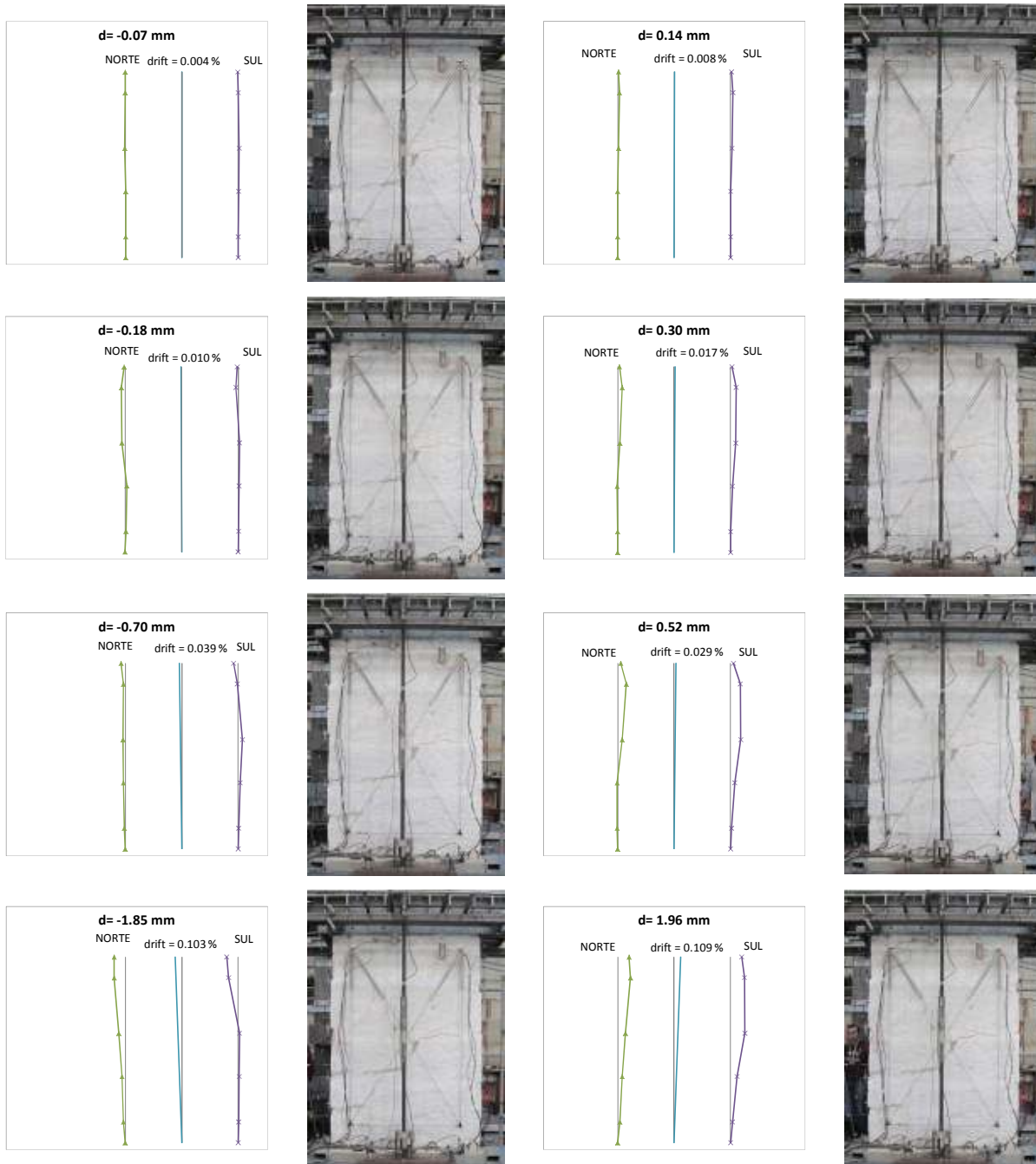


Fig. 4.24 – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (IR5 – até -1.85 mm e 1.96 mm).

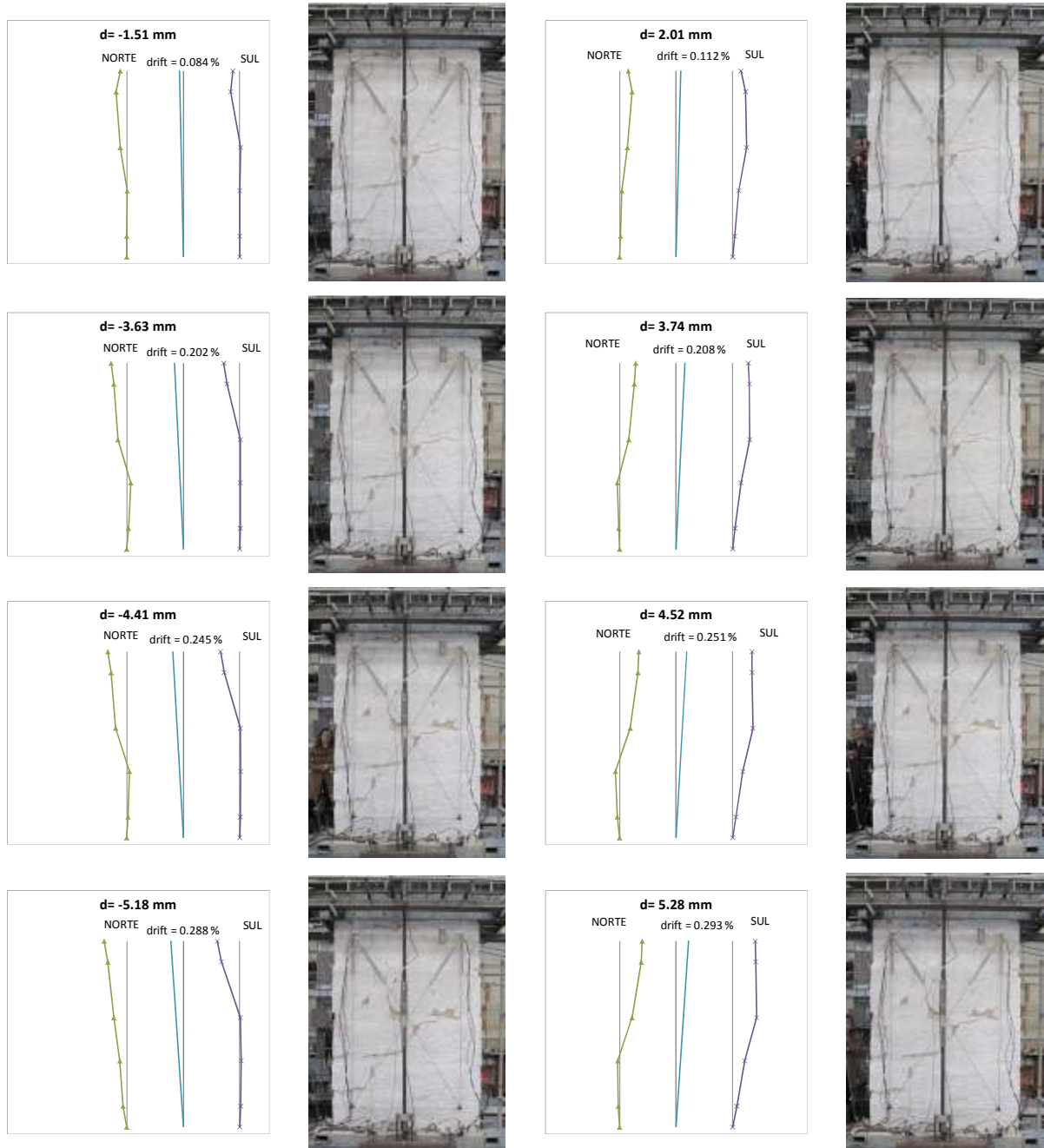


Fig. 4.24 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes drifts, d em mm (IR5 – de -1.51 mm a -5.18 mm e 2.01 mm a 5.28 mm).

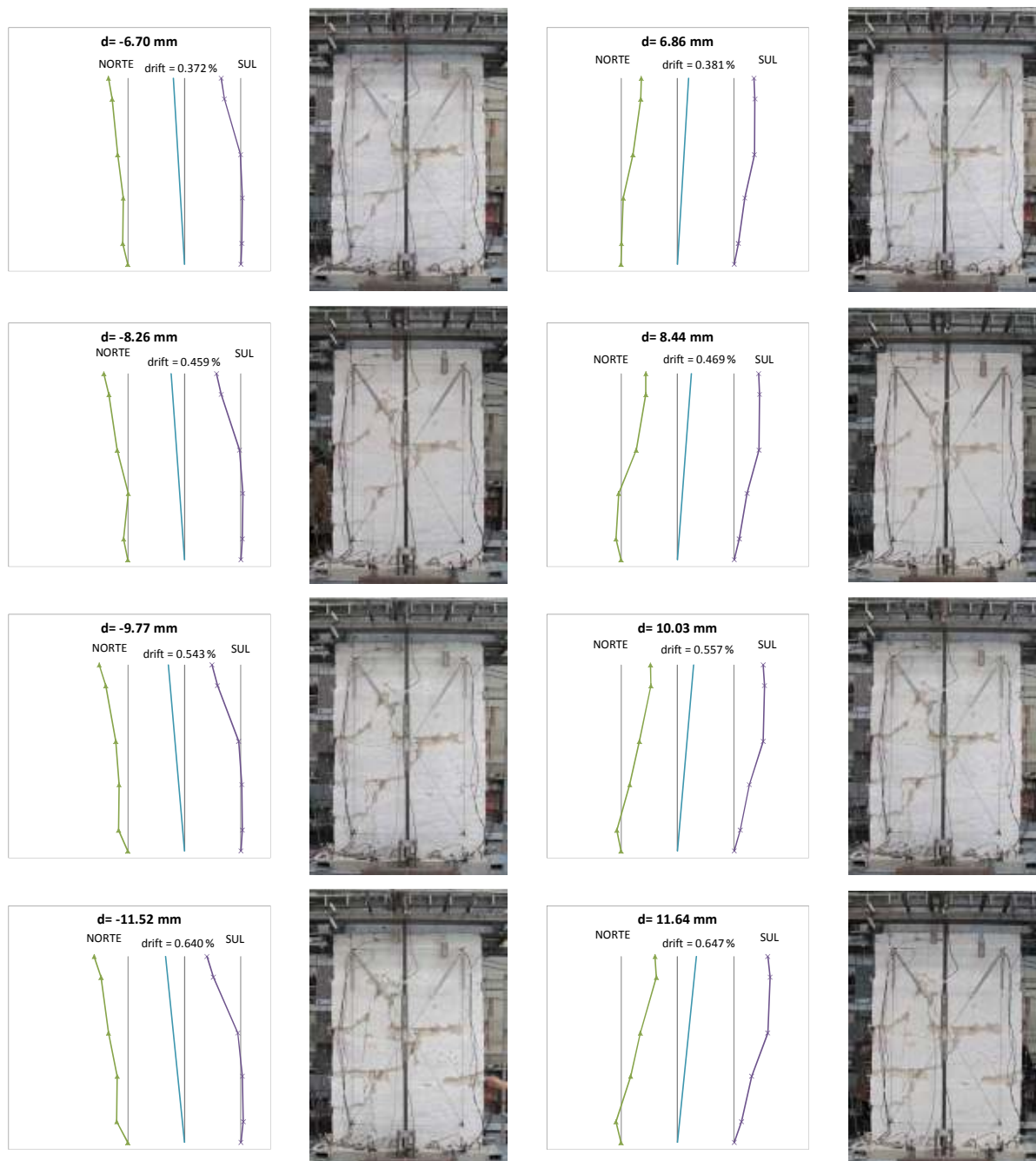


Fig. 4.24 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (IR5 – de -6.70 mm a -11.52 mm e 6.86 mm a 11.64 mm).

Verifica-se que o lado norte da parede está mais destacado.

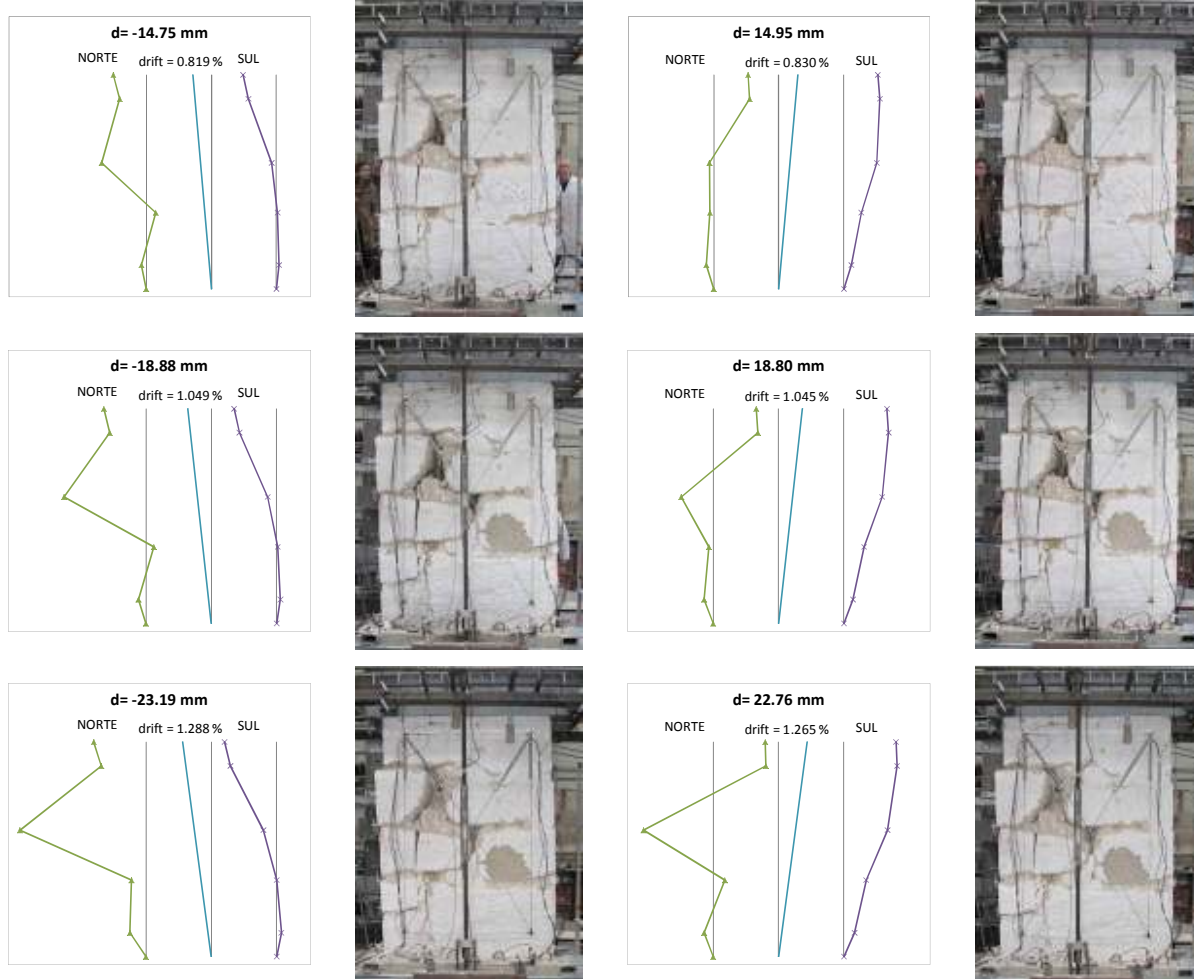
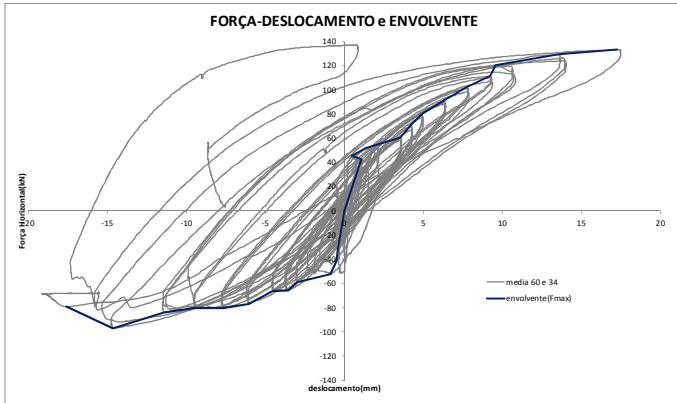


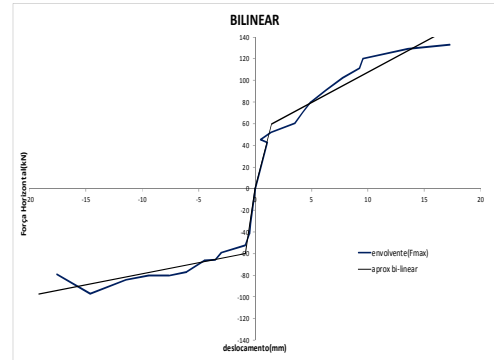
Fig. 4.24 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (IR5 – de -14.75 mm a -23.19 mm e 14.95 mm a 22.76 mm).

4.4.3. ENSAIO IR6

A figura 4.25 apresenta o resumo dos resultados obtidos para a parede IR6, ensaiada com carga vertical de 450kN. Esta parede sofreu uma rotura diagonal por corte, como se observa nas figuras 4.25, d) e e), tendo-se parado o ensaio devida à instabilidade da parede com prévia colocação de uma cinta para proteger a eventual queda de pedras.



a) Diagrama Força/Deslocamento e envoltiva primeira carga



f) Envoltiva de primeira carga e aproximação bilinear



b) d inicial-



c) d inicial+



d) d max-

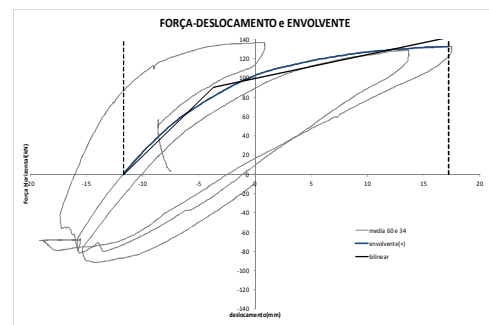


e) d max+

Tabela 4.9. – Parâmetros obtidos da envoltiva (IR6)

	$F_{max}$ [kN]	$d_{max}$ [mm]	$d_y$ [mm]	$\mu$	$K_e$ [kN/m]
+	132.9	17.5	1.4	12.2	41183
-	-96.9	-19.2	-0.9	21.8	68103

g) Resumo de parâmetros globais



h) Envoltiva do último ciclo

Fig. 4.25 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (IR6): a) diagrama força-deslocamento, b) a e) fotografias em posições deformadas extremas, f) detalhe e g) parâmetros da envoltiva, h) envoltiva do último ciclo.

Pelo diagrama da figura 4.25 a) observa-se que houve dissipação de energia, não há perda de força quando comparada para um deslocamento no último ciclo com o ciclo seguinte e ainda para um mesmo deslocamento a queda de resistência é muito reduzida.

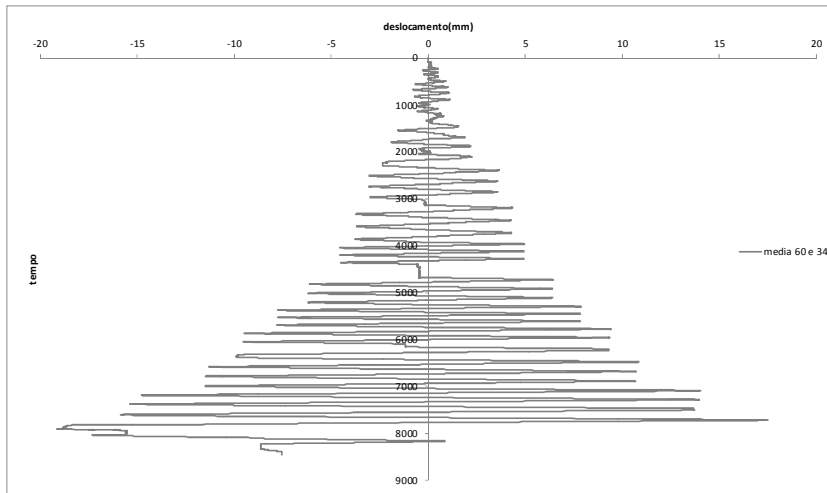
A curva bilinear apresentada na figura 4.25 f) é uma tentativa de aproximação da envolvente real que, para os ciclos positivos parecia ainda evidenciar aumento de força, a partir da qual se determinou os valores apresentados na tabela 4.9.

Como se pode verificar pelos parâmetros calculados, existe uma diferença significativa entre os valores da ductilidade, da rigidez e da força máxima atingida.

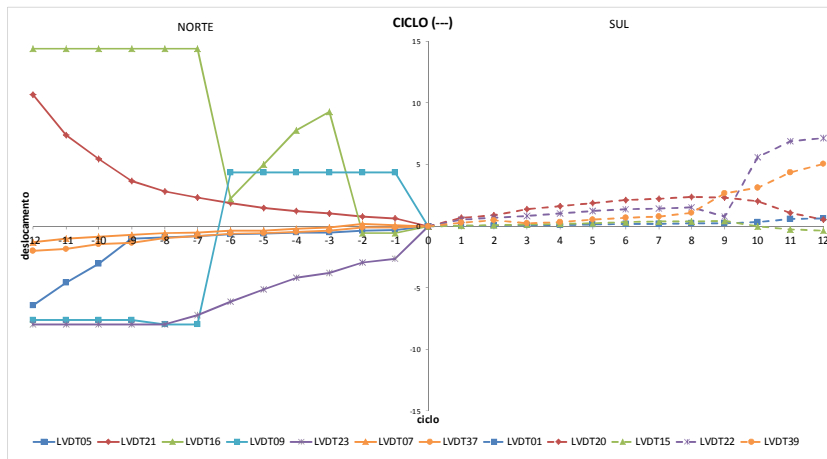
Tal como em alguns ensaios anteriores, tendo havido um ganho de força para os ciclos positivos, foi realizada uma nova análise para a envolvente, considerando apenas o último ciclo, e calculados os respetivos valores de 8.0 mm para o deslocamento de cedência e de 3.6 para a ductilidade.

Para o ciclo negativo, e desprezando os ciclos iniciais, resulta 3.4 mm para o deslocamento de cedência e 5.7 para a ductilidade, que são valores mais próximos e credíveis em relação aos mostrados na tabela 3.9. Neste caso obtém-se para a rigidez 17131 kN/m e 19738 kN/m, para o ciclo positivo e negativo respetivamente.

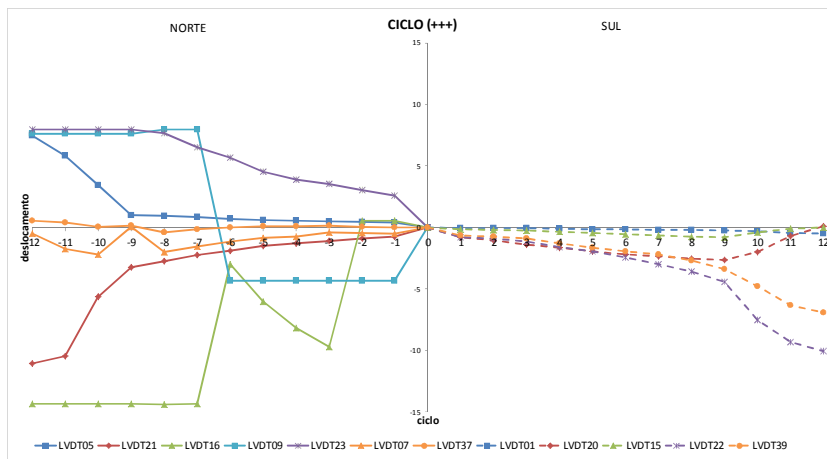
Na figura 4.26 apresenta-se a resposta das juntas laterais, onde, excluindo resultados anómalos, LVDTs 16 e 21 para ambos os ciclos e 7 e 9 para os ciclos positivo e negativo respetivamente. Se registam máximas aberturas de juntas de cerca de 7.97 mm e de 7.12 mm, no sentido positivo e negativo, respetivamente.



a)



b)



c)

Fig. 4.26 – Resposta das juntas horizontais laterais (IR6): a) história de deslocamentos globais impostos e deslocamentos nas juntas para b) ciclos negativos e c) ciclos positivos.

Os gráficos das deformadas laterais complementam a informação anterior.

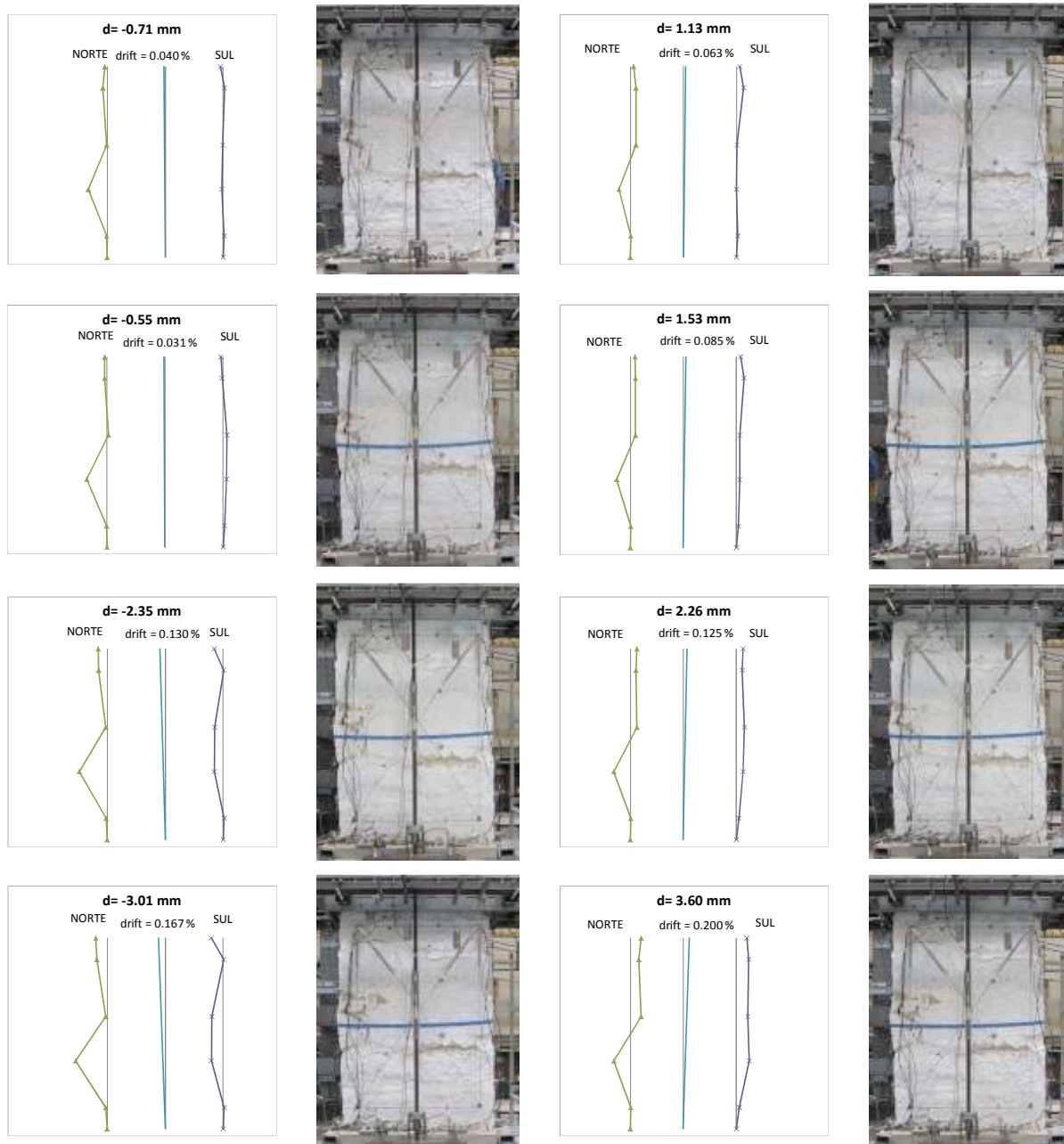


Fig. 4.27 – Deformadas laterais e correspondentes drifts, d em mm (IR6 – até -3.01 mm e 3.60 mm).

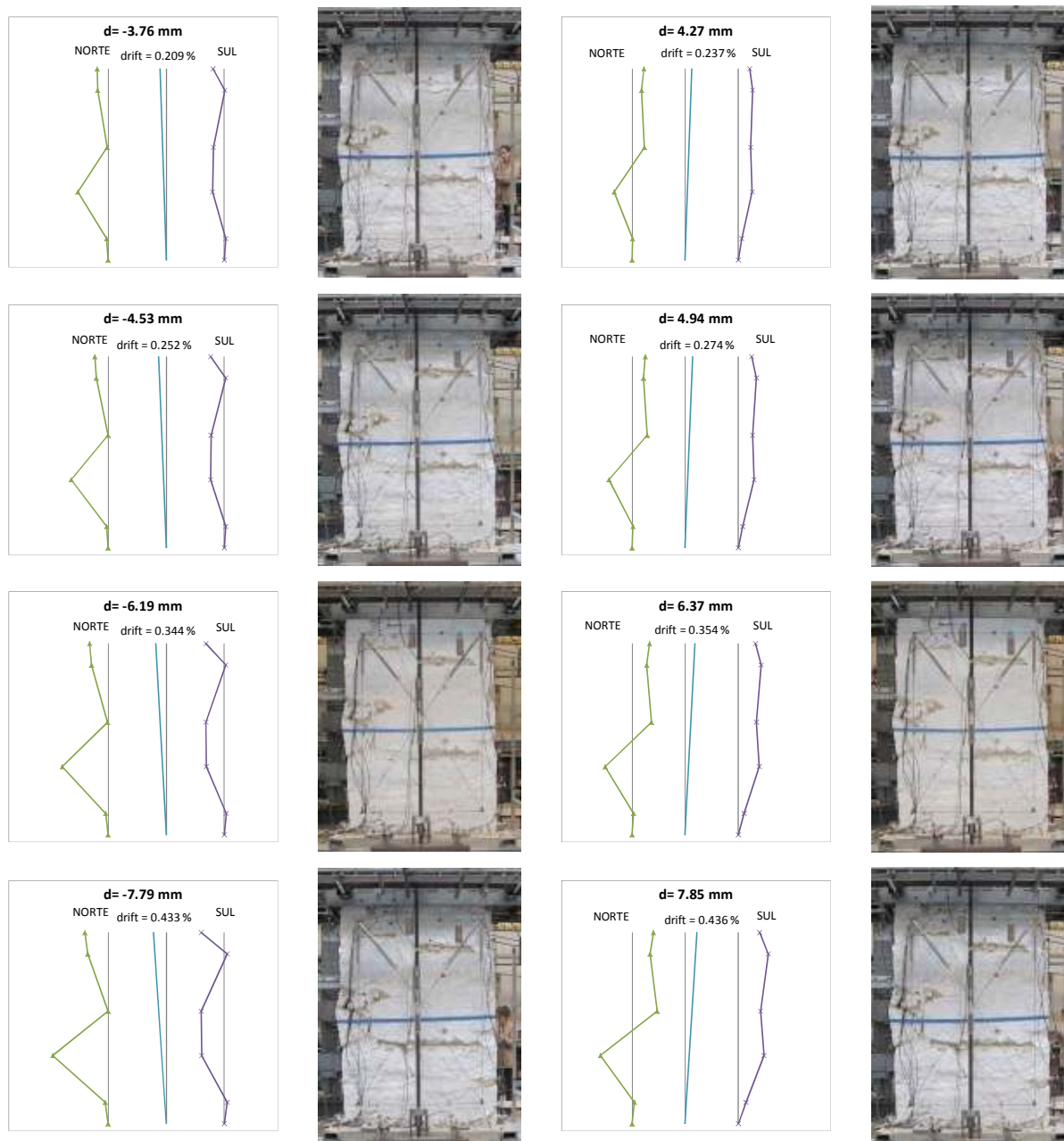


Fig. 4.27 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, *d* em mm (IR6 – de -3.76 mm a -7.79 mm e 4.27 mm a 7.85 mm).

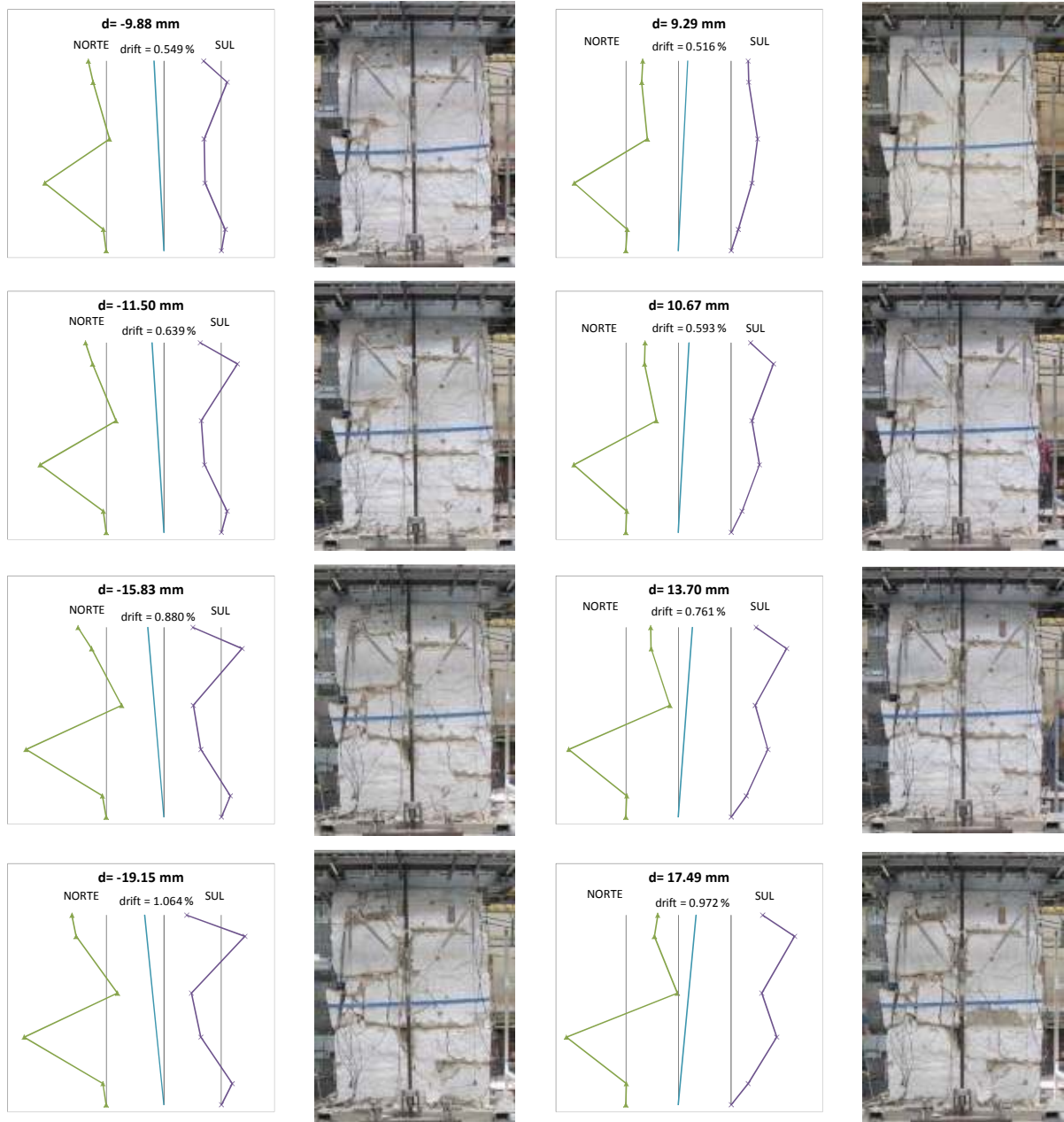
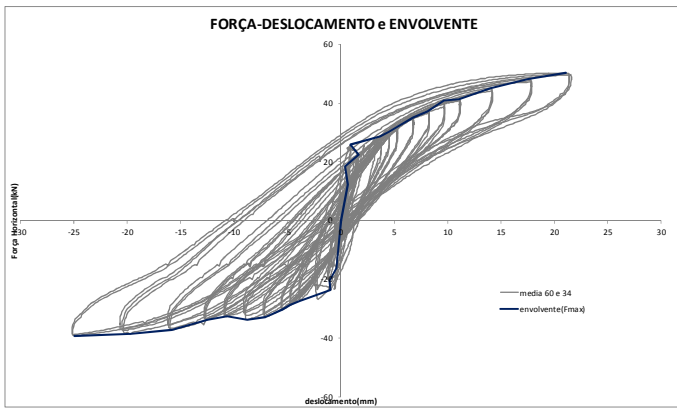


Fig. 4.27 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, *d* em mm (IR6 – de -9.88 mm a -19.15 mm e 9.29 mm a 17.49 mm).

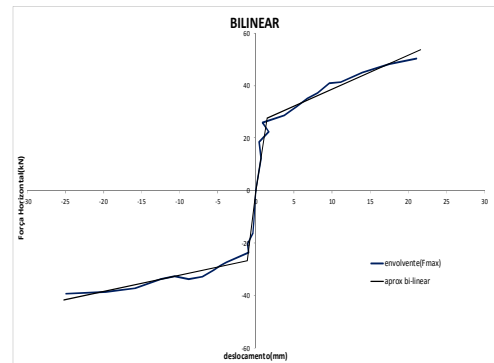
## 4.5. PAREDES TIPO IR++

### 4.5.1. ENSAIO IR4++

Com este ensaio iniciou-se o estudo das paredes muito irregulares sendo estes o último tipo de parede ensaiada no âmbito deste estudo. Pela figura 4.28 pode-se ver o resumo dos resultados obtidos para a parede IR4++, ensaiada sob força vertical de 150kN.



a) Diagrama Força/Deslocamento e envoltiva primeira carga



f) Envoltiva de primeira carga e aproximação bilinear



b) d inicial-



c) d inicial+



d) d max-

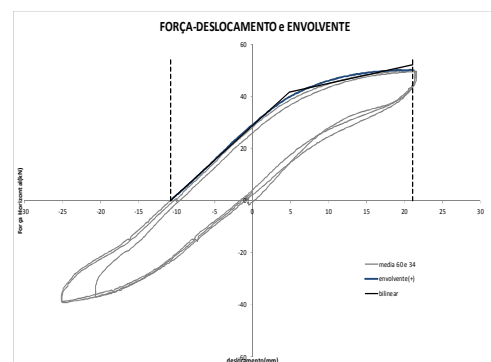


e) d max+

Tabela 4.10. – Parâmetros obtidos da envoltiva (IR4++)

	$F_{max}$ [kN]	$d_{max}$ [mm]	$d_y$ [mm]	$\mu$	$K_e$ [kN/m]
+	50.2	21.6	1.5	14.4	18212
-	-39.2	-25.2	-1.2	21.9	23334

g) Resumo de parâmetros globais



h) Envoltiva último ciclo

Fig. 4.28 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (IR4++): a) diagrama força-deslocamento, b) a e) fotografias em posições deformadas extremas, f) detalhe e g) parâmetros da envoltiva, h) envoltiva último ciclo.

Como se observa nas figuras 4.28 d) e e), houve bastante destruição das pedras desta parede, tendo ocorrido *rocking* e deslizamento, e a paragem deste ensaio foi devida à sua instabilidade.

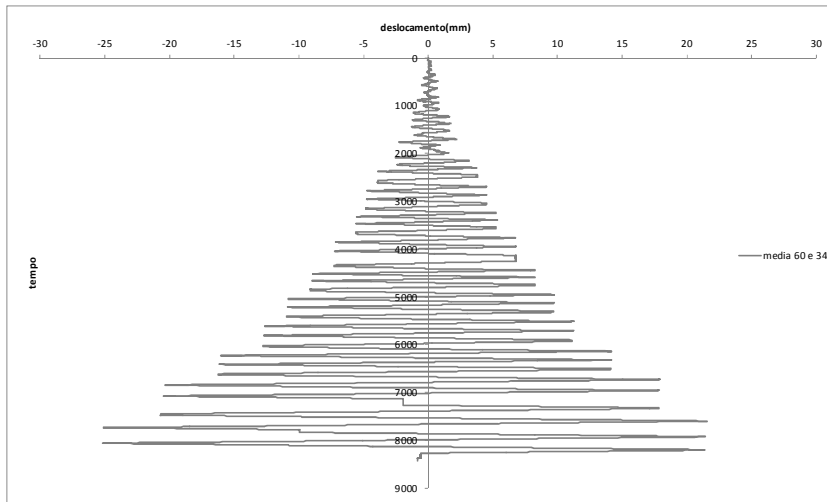
Conclui-se que houve dissipação de energia, não há perda de força quando comparada para um deslocamento no último ciclo com o ciclo seguinte e ainda para um mesmo deslocamento a queda de resistência é muito reduzida.

A partir destes dados foi possível traçar a curva bilinear e determinar os valores apresentados na tabela 4.10. A forma da envolvente determinou que se adotasse uma aproximação com rigidez pós-cedência.

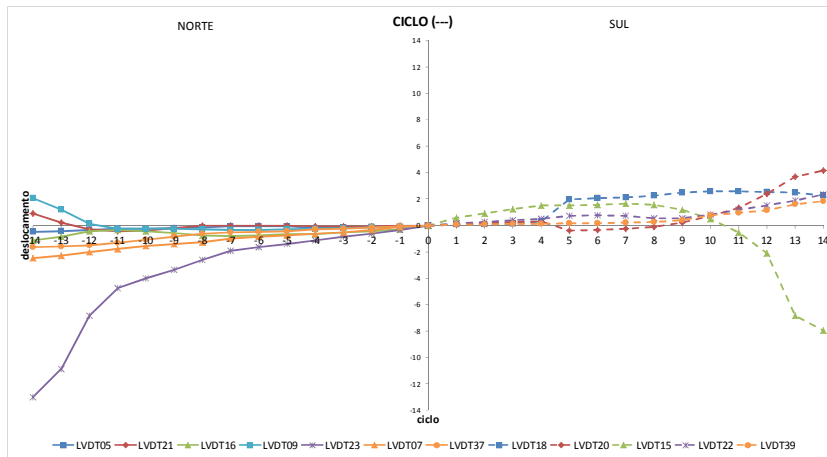
Porém, como se pode verificar pelos parâmetros calculados, existe uma diferença grande entre os valores da ductilidade para ambos os sentidos. Assim, à semelhança de casos anteriores, para os últimos ciclos positivos traçou-se uma nova envolvente, como se de uma nova parede se tratasse, obtendo um valor de 15.58 mm para o deslocamento de cedência e de 2.1 para a ductilidade.

Caso se ignore os ciclos iniciais, como em ensaios anteriores, obtém-se valores da rigidez inicial de 7693 kN/m e 7056 kN/m, para o ciclo positivo e negativo respetivamente. Para o ciclo negativo ainda se obtém um deslocamento de cedência de 4.2 mm e ductilidade de 6, valores que, comparados com os da tabela 3.10, são claramente mais aceitáveis.

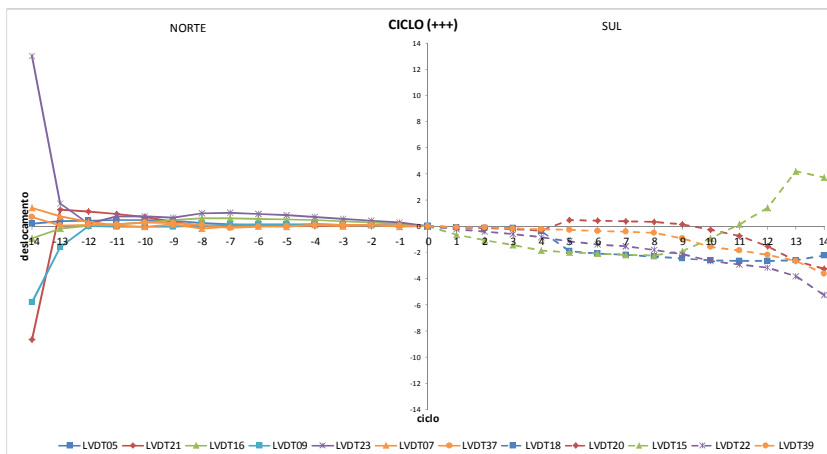
Relativamente às máximas aberturas de juntas, registam-se valores de cerca de 1.74 mm e de 4.17 mm, no sentido positivo e negativo, respetivamente (figura 4.29), excluindo resultados fora da tendência esperada, LVDTs 15 para ambos os ciclos e, 9 e 21 para o último ciclo positivo.



a)



b)



c)

Fig. 4.29 – Resposta das juntas horizontais laterais (IR4++): a) história de deslocamentos globais impostos e deslocamentos nas juntas para b) ciclos negativos e c) ciclos positivos.

Devido à rotura de algumas pedras, os gráficos das deformadas laterais complementam a informação anterior e pode-se verificar quais as pedras que influenciaram o comportamento.

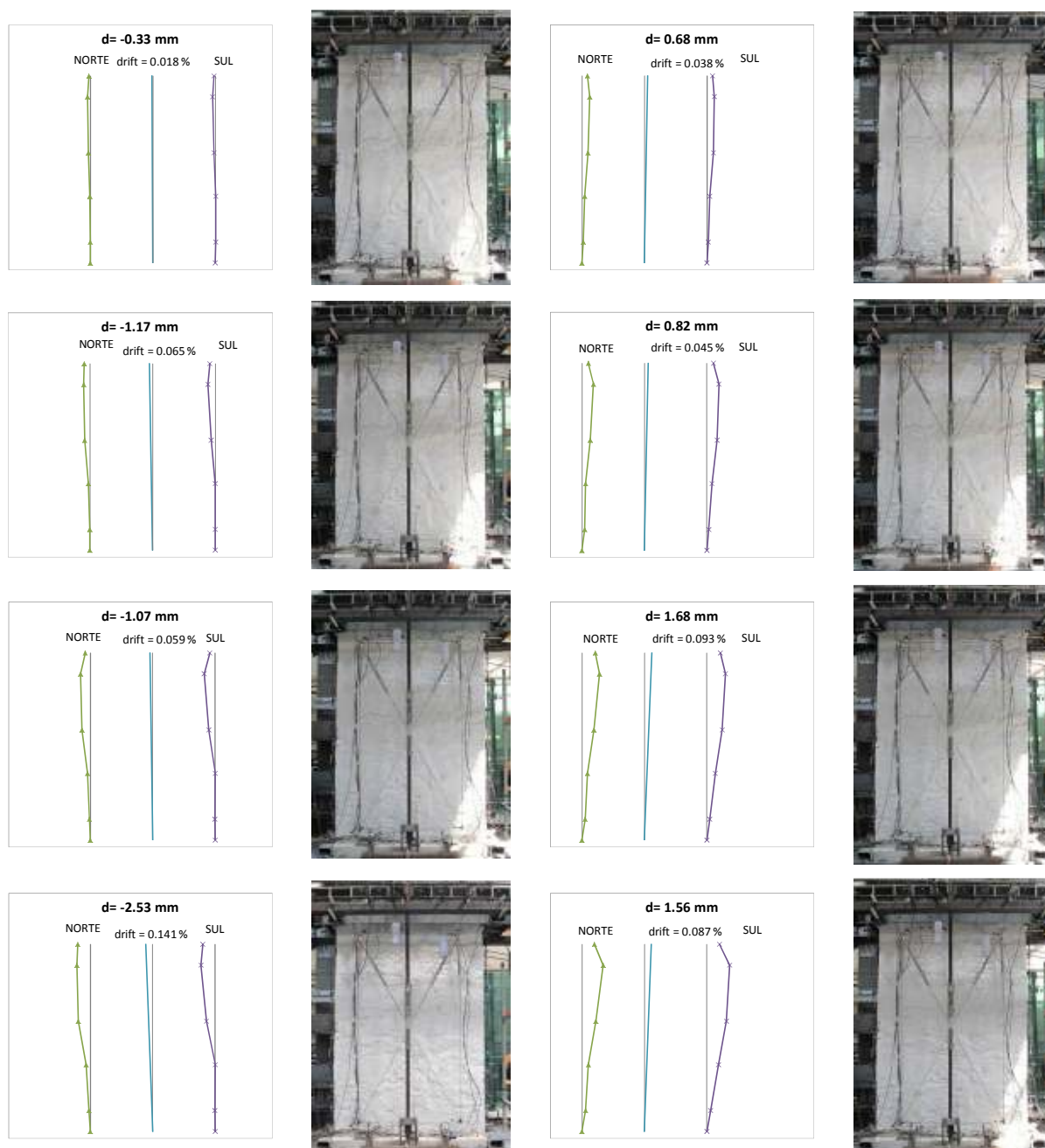


Fig. 4.30 – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, *d* em mm (IR4++ - até -2.53 mm e 1.56 mm).

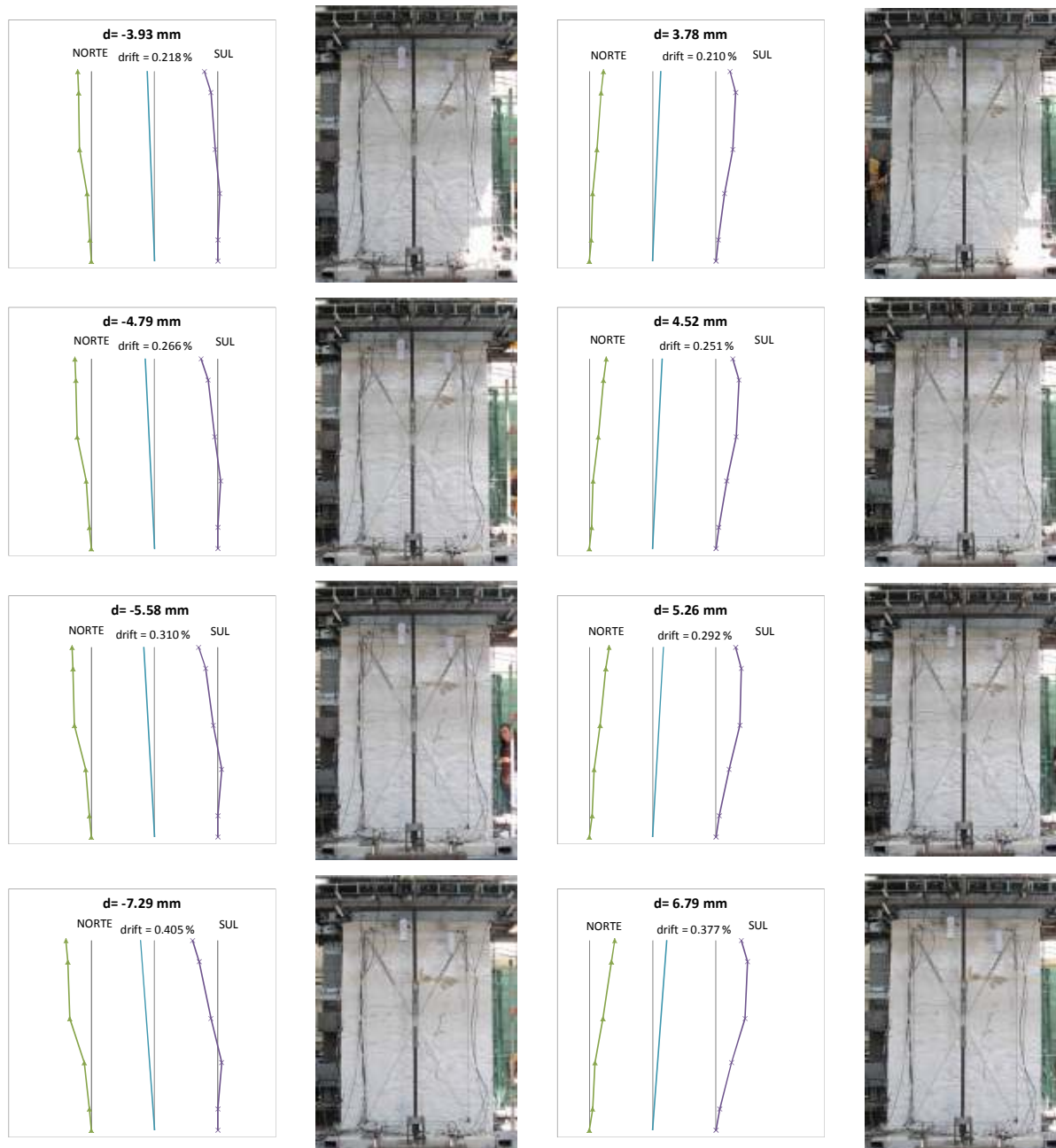


Fig. 4.30 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (IR4++ - de -2.93 mm a -7.29 mm e 3.78 mm e 6.79 mm).

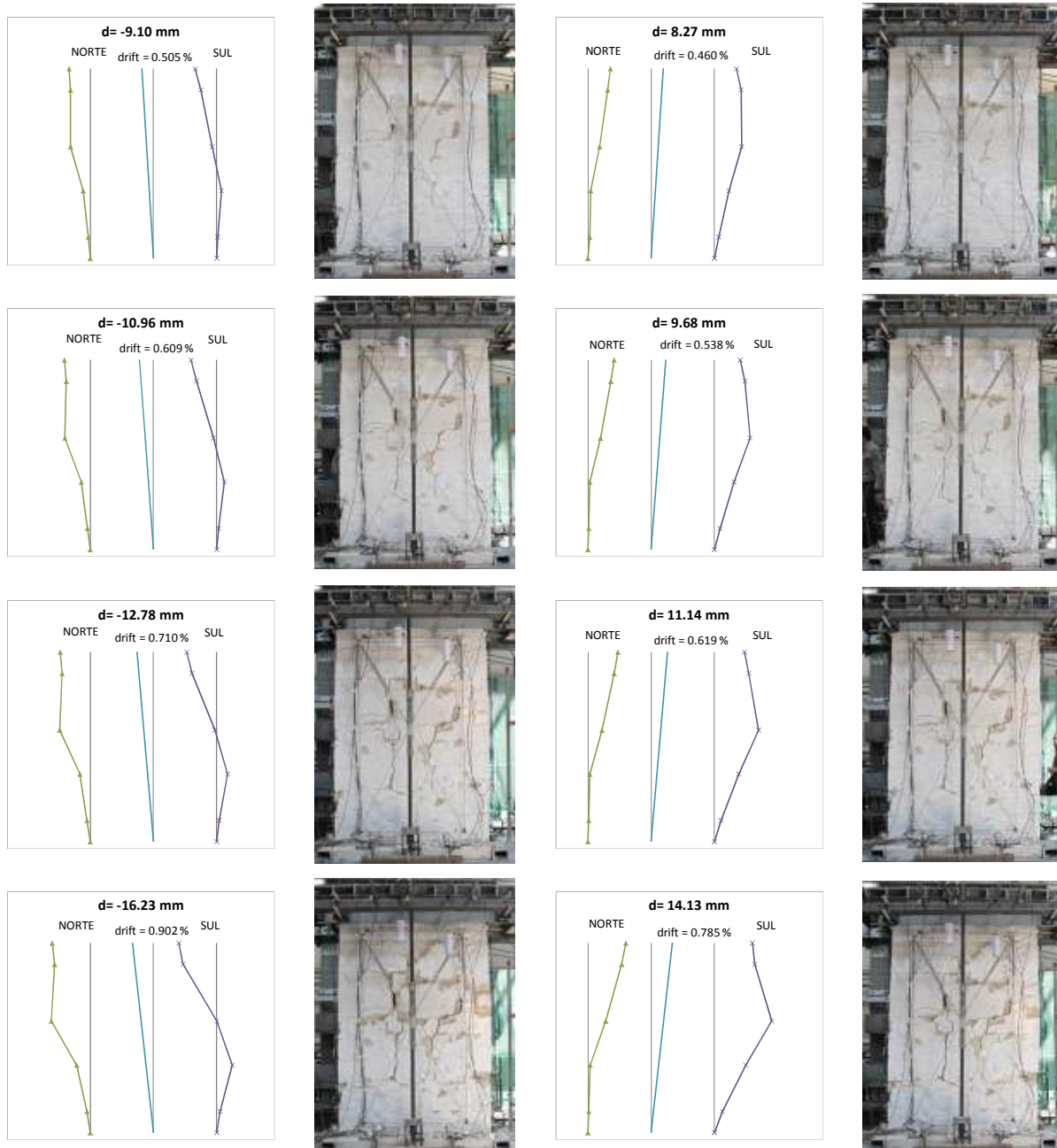


Fig. 4.30 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, *d* em mm (IR4++ - de -9.10 mm a -16.23 mm e 8.27 mm a 14.13 mm).

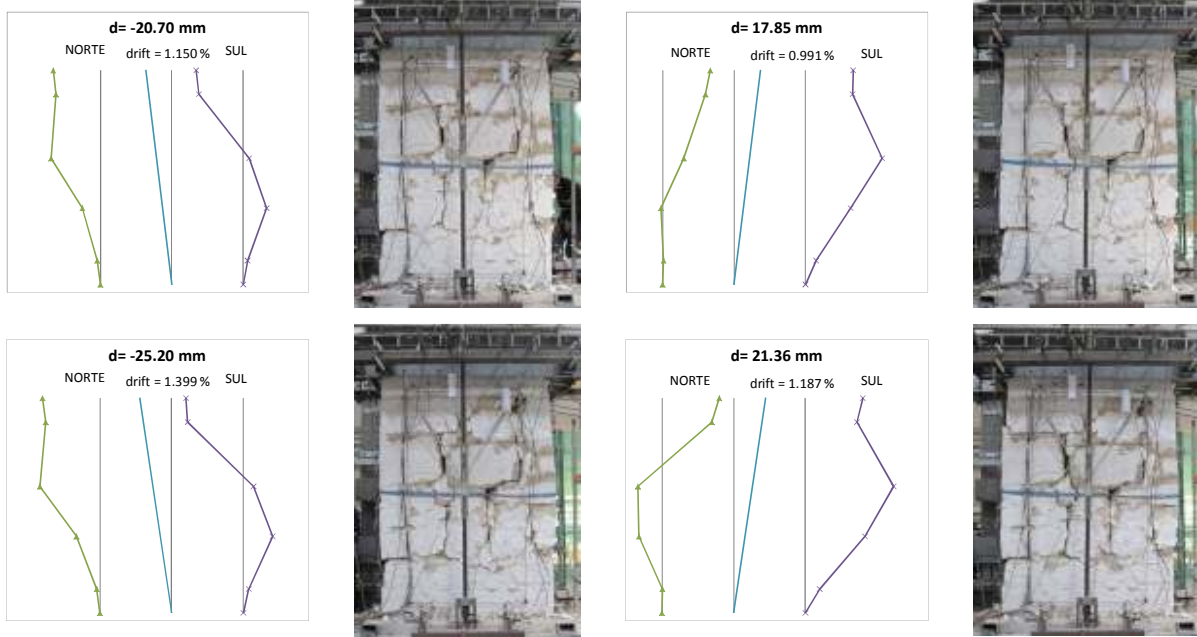
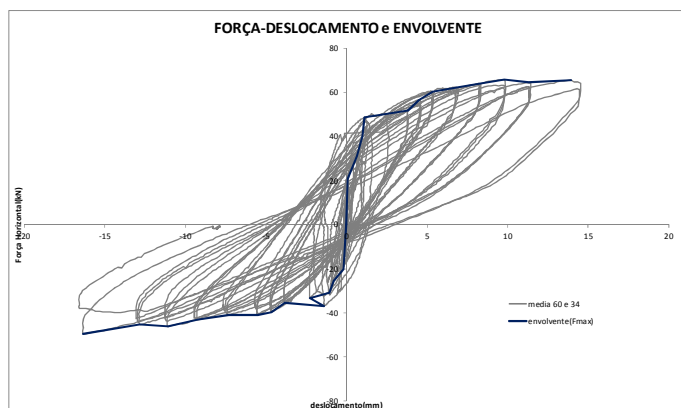


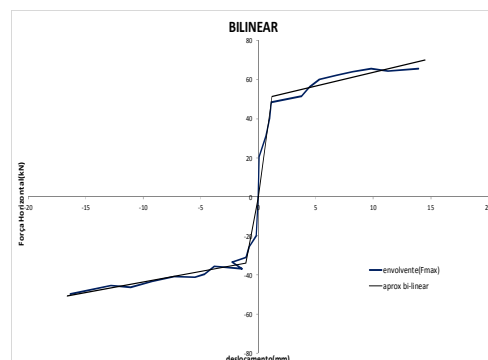
Fig. 4.30 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*,  $d$  em mm (IR4++ - de -20.70 mm a -25.20 mm e 17.85 mm a 21.36 mm).

#### 4.5.2. ENSAIO IR5++

Pela figura 4.31 pode-se ver o resumo dos resultados obtidos para a parede IR5++, com carga vertical de 300kN. Como evidenciam as figuras 4.31, d) e e), houve bastante destruição das pedras que compunham esta parede, tendo ocorrido *rocking* e rotura diagonal por corte. O ensaio foi também parado devida à instabilidade da parede.



a) Diagrama Força/Deslocamento e envoltive primeira carga



f) Envoltive de primeira carga e aproximação bilinear



b) d inicial-



c) d inicial+



d) d max-

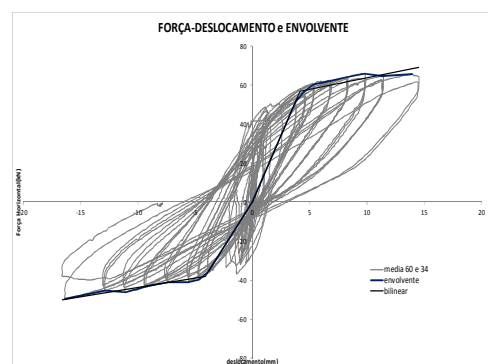


e) d max+

Tabela 4.11. – Parâmetros obtidos da envoltive (IR5++)

	$F_{max}$ [kN]	$d_{max}$ [mm]	$d_y$ [mm]	$\mu$	$K_e$ [kN/m]
+	65.6	14.5	1.2	12.1	43353
-	-46.3	-16.6	-1.1	15.5	31169

g) Resumo de parâmetros globais



h) Envoltive desprezando ciclos iniciais

Fig. 4.31 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (IR5++): a) diagrama força-deslocamento, b) a e) fotografias em posições deformadas extremas, f) detalhe e g) parâmetros da envoltive, h) envoltive desprezando ciclos iniciais.

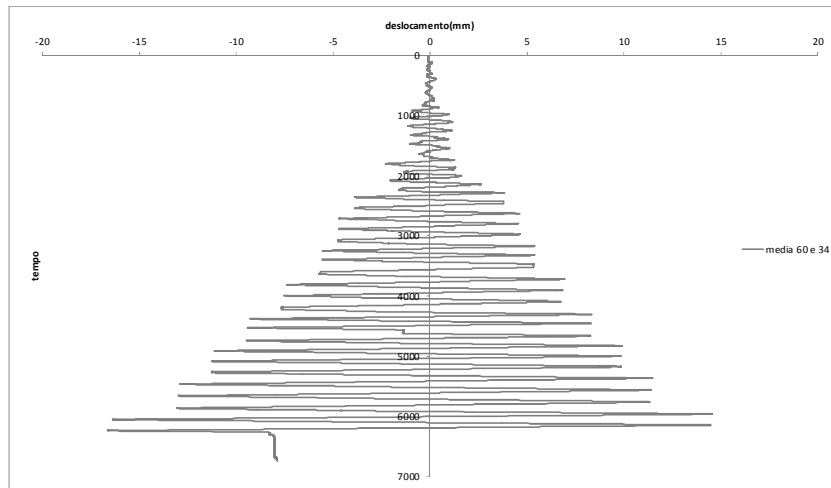
Neste ensaio na aplicação da carga vertical houve abertura de fendas. Neste tipo de paredes notou-se que houve esmagamento e rotura de algumas pedras. Pelo diagrama da figura 4.31 a) conclui-se que houve dissipação de energia e ainda para um mesmo deslocamento a queda de resistência é muito reduzida.

Neste tipo de geometria a deterioração de pedras mais pequenas influenciam o comportamento pois reorganizam-se e empurram outras.

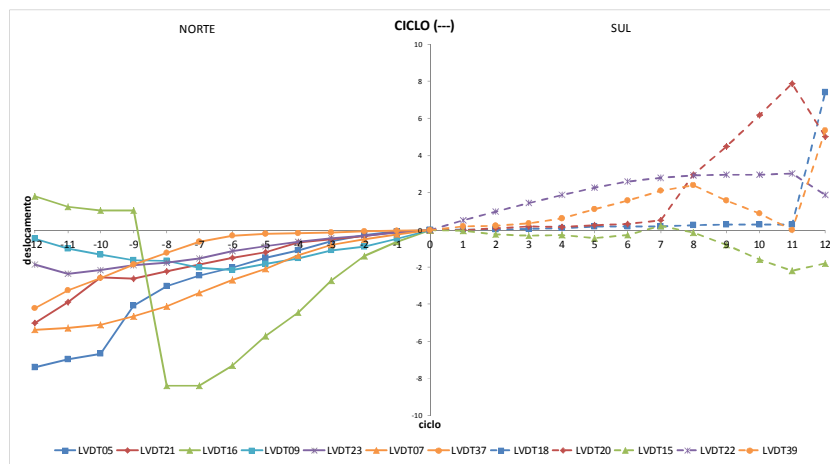
Relativamente à aproximação bilinear da envolvente real, foi considerada rigidez pós-cedência, a partir do que foi possível determinar os valores apresentados na tabela 4.11. Como se pode verificar pelos parâmetros calculados, existe alguma diferença entre os valores da força máxima atingida e da rigidez, no entanto, os da ductilidade e deslocamento de cedência são muito próximos.

Como já tratado em ensaios anteriores, ao desprezar os ciclos iniciais procura-se uma aproximação mais realista dos valores atingidos pela parede. Obtém-se então novos valores de rigidez elástica de 13639 kN/m e 9262 kN/m, para o sentido positivo e negativo, respetivamente, e um deslocamento de cedência em módulo praticamente igual de 4.16 mm e -4.12 mm. A ductilidade toma o valor de 3.5 para o sentido positivo e 4.0 para o negativo, portanto mais baixos que os calculados pelo método sistemático adotado e mais expetáveis para este tipo de parede.

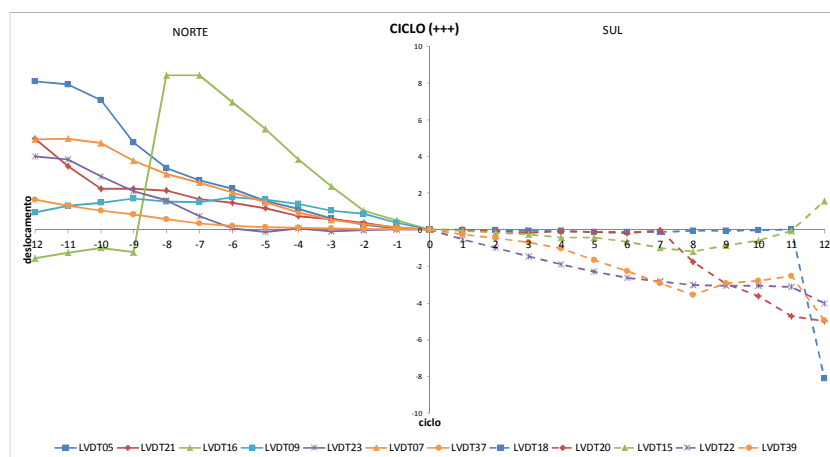
Na figura 4.32 apresenta-se a resposta das juntas laterais; excluindo resultados fora da tendência esperada, LVDTs 16 para ambos os ciclos e o 15 para os negativos, registam-se máximas aberturas de juntas de cerca de 8.09 mm e de 7.88 mm, no sentido positivo e negativo, respetivamente.



a)



b)



c)

Fig. 4.32 – Resposta das juntas horizontais laterais (IR5++): a) história de deslocamentos globais impostos e deslocamentos nas juntas para b) ciclos negativos e c) ciclos positivos.

Pela análise do diagrama verifica-se uma mistura de *rocking* e deslizamento e os gráficos das deformadas laterais complementam essa informação.

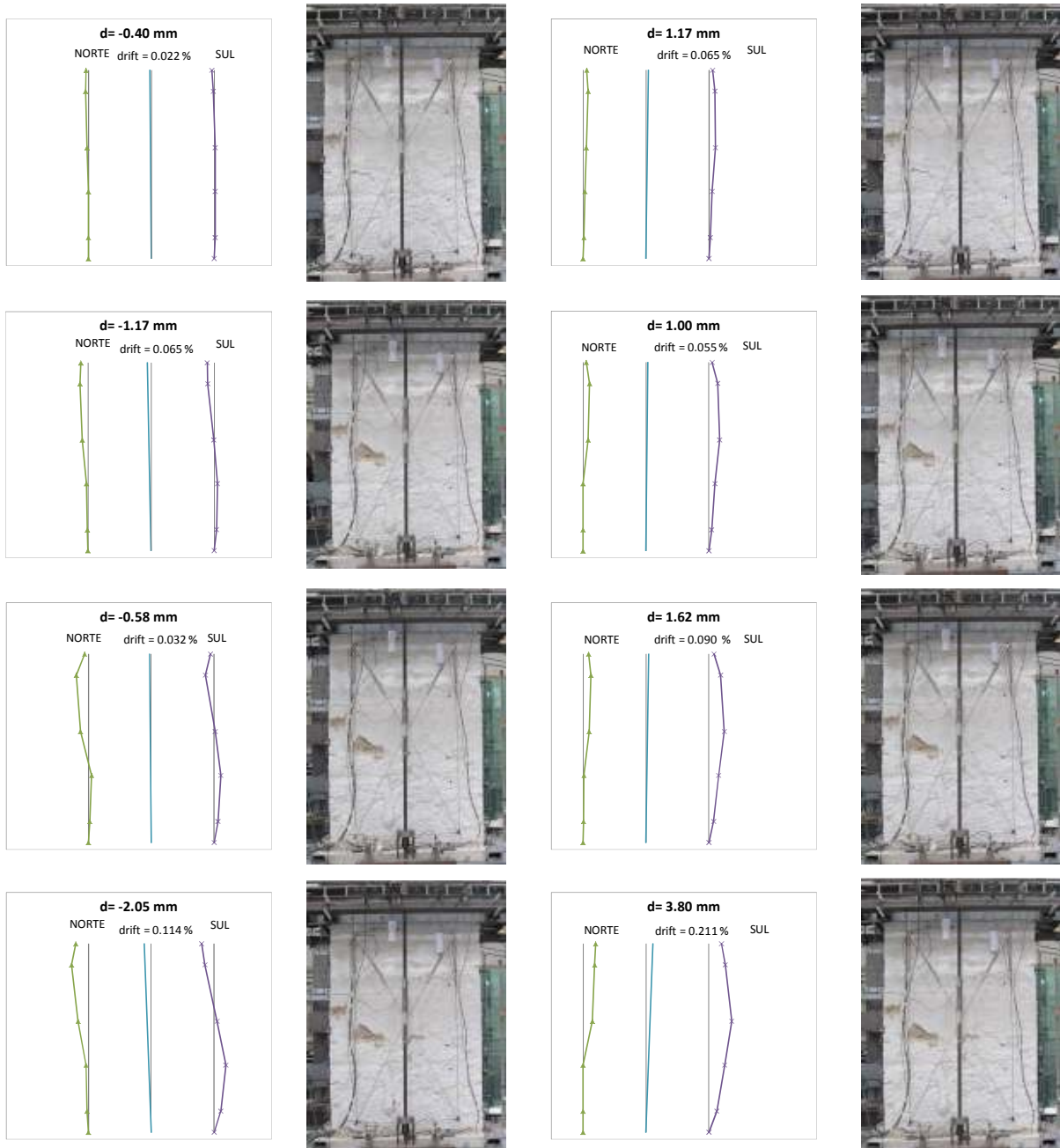


Fig. 4.33 – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (IR5++ - até -2.05 mm e 3.80 mm).

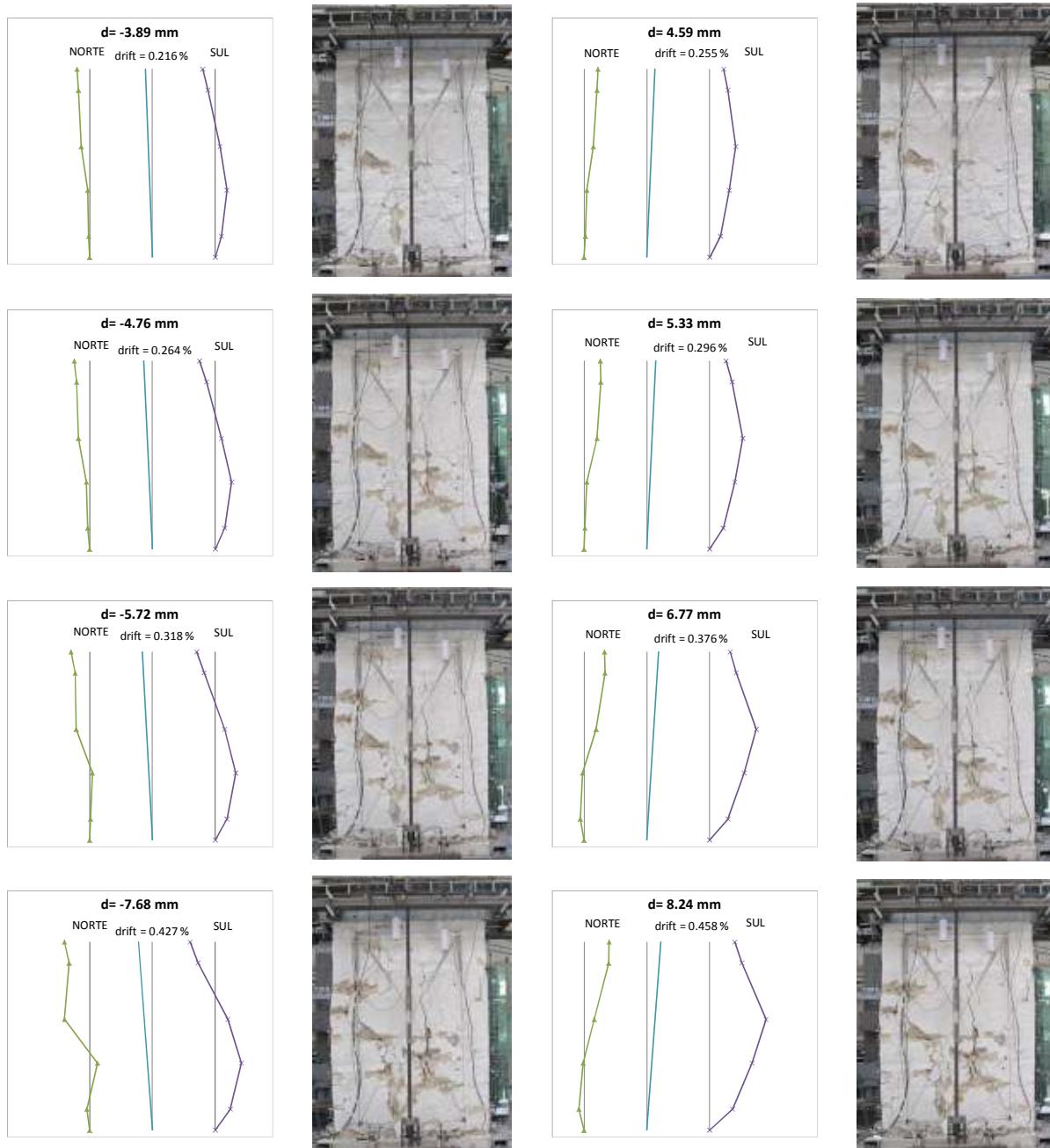


Fig. 4.33 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, *d* em mm (IR5++ - de -3.89 mm a -7.68 mm e 4.59 mm a 8.24 mm).

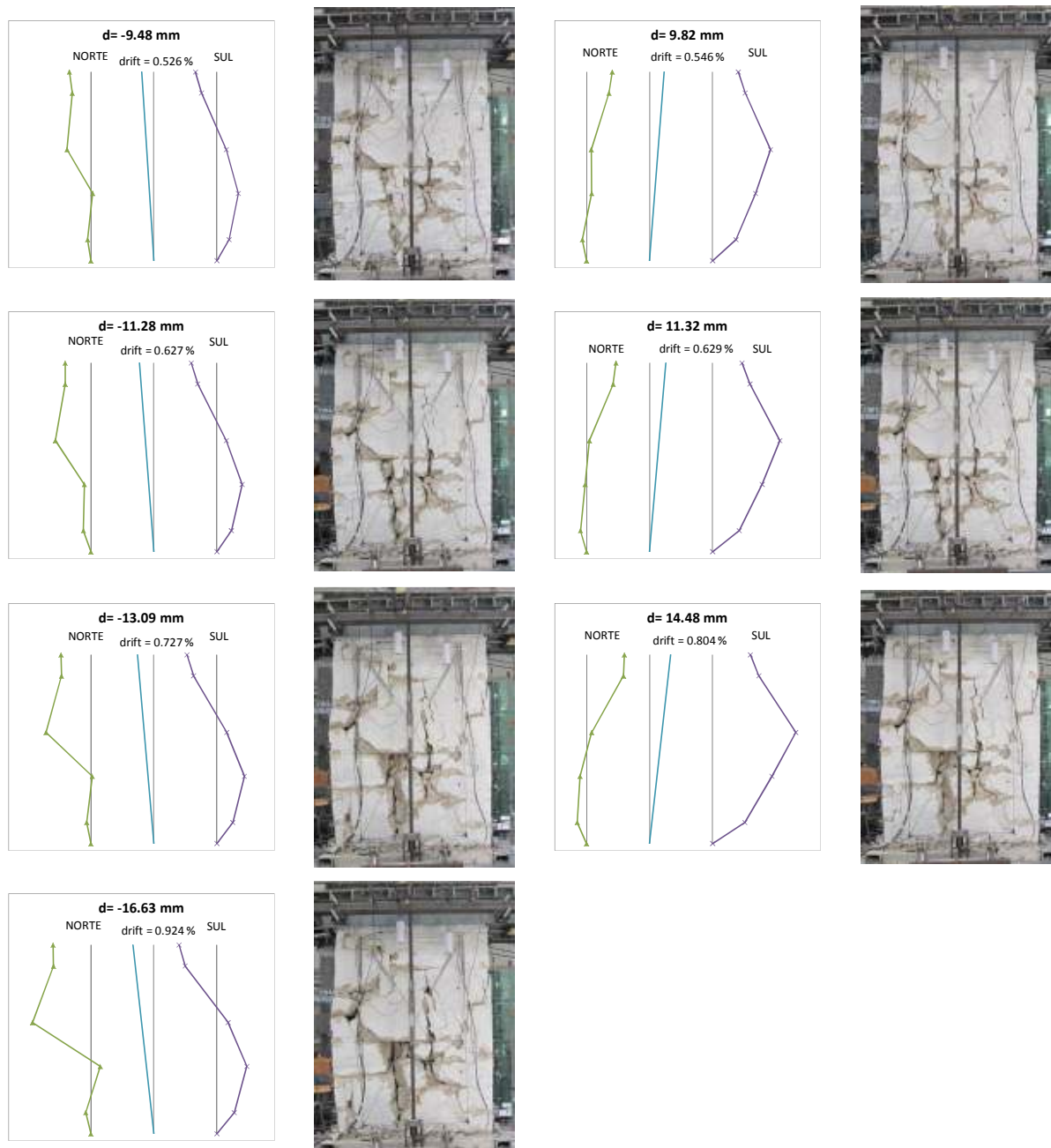
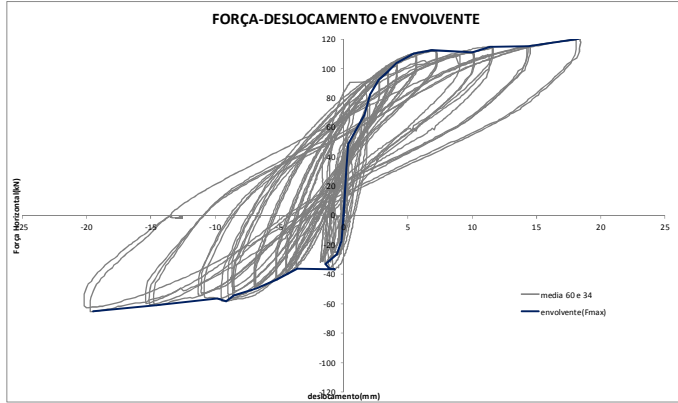


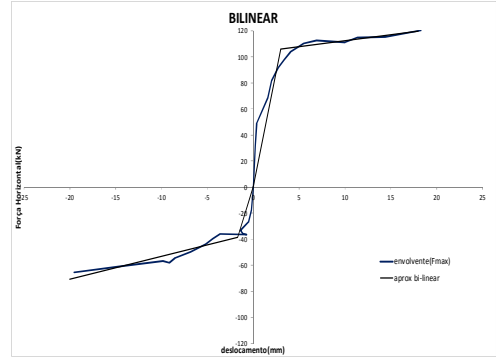
Fig. 4.33 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, *d* em mm (IR5++ - de -9.48 mm a -16.63 mm e 9.82 mm a 14.48 mm).

4.5.3. ENSAIO IR6++

Com esta parede foram encerrados os ensaios realizados para este estudo, ilustrando-se na figura 4.34 o resumo dos resultados obtidos para uma carga axial de 450kN. Tal como nos dois casos anteriores, as figuras 4.34 d) e e) evidenciam grande destruição das pedras que compunham esta parede, tendo ocorrido *rocking* e deslizamento; a paragem deste ensaio foi devida à instabilidade da parede.



a) Diagrama Força/Deslocamento e envolvente primeira carga



f) Envolvente de primeira carga e aproximação bilinear



b) d inicial-



c) d inicial+



d) d max-

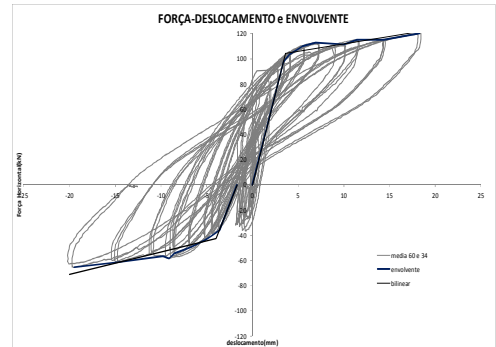


e) d max+

Tabela 4.12. – Parâmetros obtidos da envolvente (IR6++)

	$F_{max}$ [kN]	$d_{max}$ [mm]	$d_y$ [mm]	$\mu$	$K_e$ [kN/m]
+	120.3	18.0	3.0	6.0	30700
-	-65.3	-20.0	-1.7	11.8	29471

g) Resumo de parâmetros globais



h) Envolvente desprezando ciclos iniciais

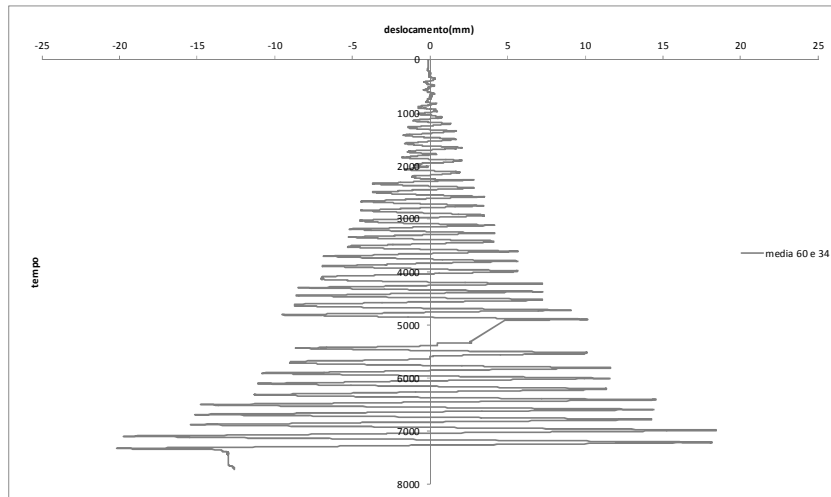
Fig. 4.34 – Resumo geral do comportamento durante o ensaio (IR6++): a) diagrama força-deslocamento, b) a e) fotografias em posições deformadas extremas, f) detalhe e g) parâmetros da envolvente, h) envolvente desprezando ciclos iniciais.

Conclui-se que houve dissipação de energia e ainda para um mesmo deslocamento a queda de resistência é muito reduzida. A rotura de pedras maiores dá-se devido ao contacto mais localizado que existe entre elas.

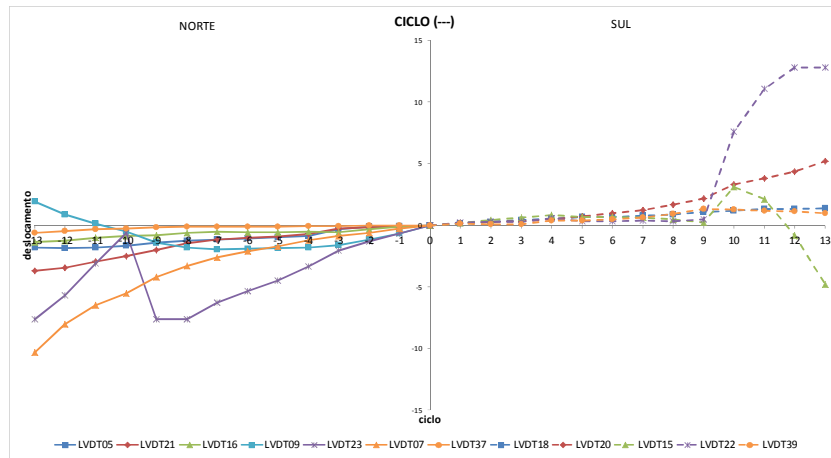
O ajuste da curva bilinear com rigidez pós-cedência foi realizado à semelhança dos casos anteriores, tornando possível determinar os valores apresentados na tabela 4.12. Como se pode verificar pelos parâmetros calculados, existe uma diferença entre os valores da força máxima atingida, em virtude de maior debilidade da face norte da parede; no entanto, os valores da rigidez inicial são muito aproximados para ambos os sentidos.

Devido ao estranho comportamento inicial, procurou-se fazer uma nova aproximação que consistiu em desprezar os ciclos iniciais e considerar que o primeiro troço é paralelo ao crescimento inicial da força, porque se iniciasse em zero daria valores de rigidez menores do que na realidade seria. Verifica-se nesse caso que os valores da rigidez são inferiores, 28795 kN/m e 18785 kN/m para o sentido positivo e negativo, respetivamente. Os deslocamentos de cedência têm valores muito próximos, de 3.62 mm para o ciclo positivo e de -3.97 mm para o negativo, enquanto a ductilidade toma o valor de 5.0 para ambos os sentidos.

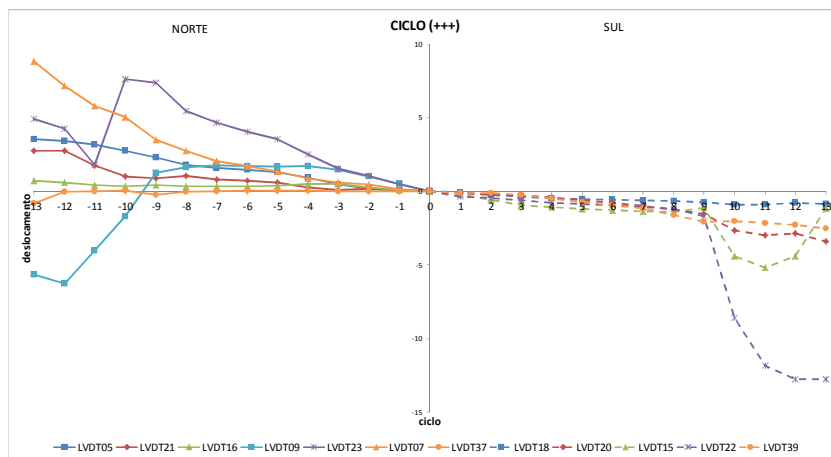
Na figura 4.35 apresenta-se a resposta das juntas laterais, expurgando resultados anómalos, LVDT 9 para ambos os ciclos, da qual se registam máximas aberturas de juntas de cerca de 8.81 mm e de 5.20 mm, no sentido positivo e negativo, respetivamente.



a)



b)



c)

Fig. 4.35 – Resposta das juntas horizontais laterais (IR6++): a) história de deslocamentos globais impostos e deslocamentos nas juntas para b) ciclos negativos e c) ciclos positivos.

Na análise diagrama confirma-se que houve aqui, tal como no ensaio anterior, uma mistura de *rocking* com deslizamento, apesar de aqui o deslizamento ser mais notório, pois a carga vertical é maior e para complementar esta informação apresenta-se os gráficos das deformadas laterais.

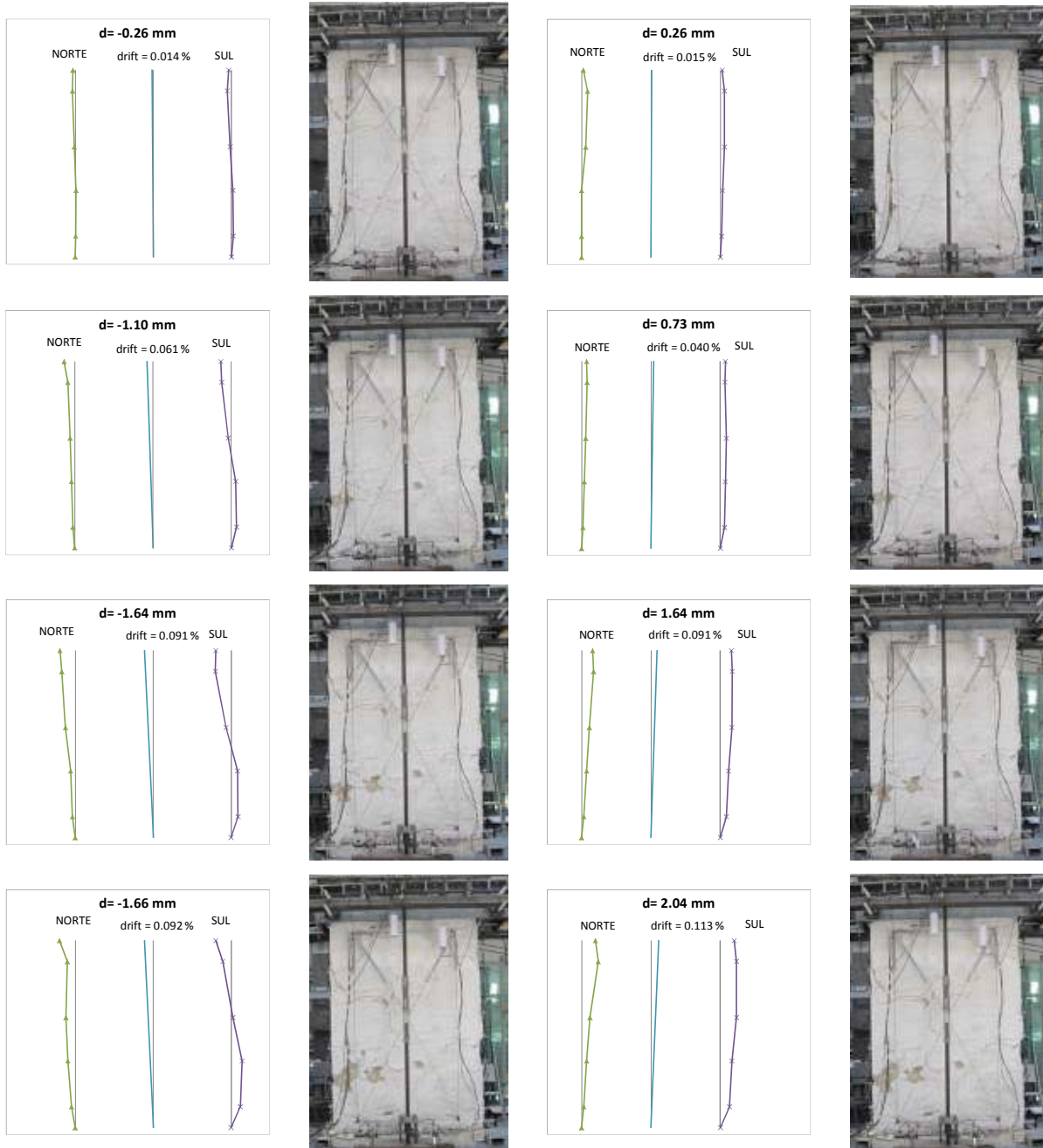


Fig. 4.36 – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (IR6++ - até -1.66 mm e 2.04 mm).

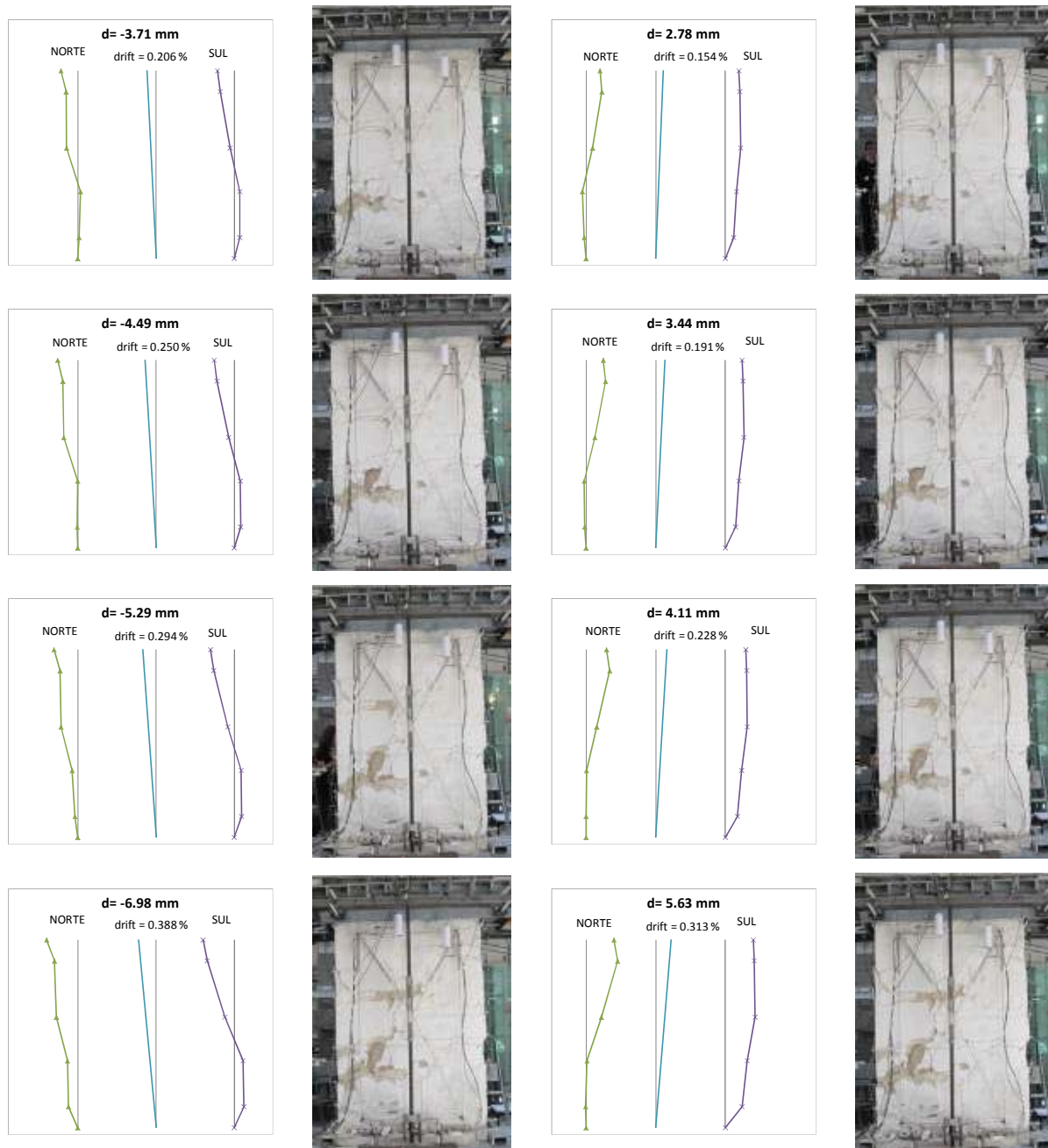


Fig. 4.36 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (IR6++ - de -3.71 mm a -6.98 mm e 2.78 mm a 5.63 mm).

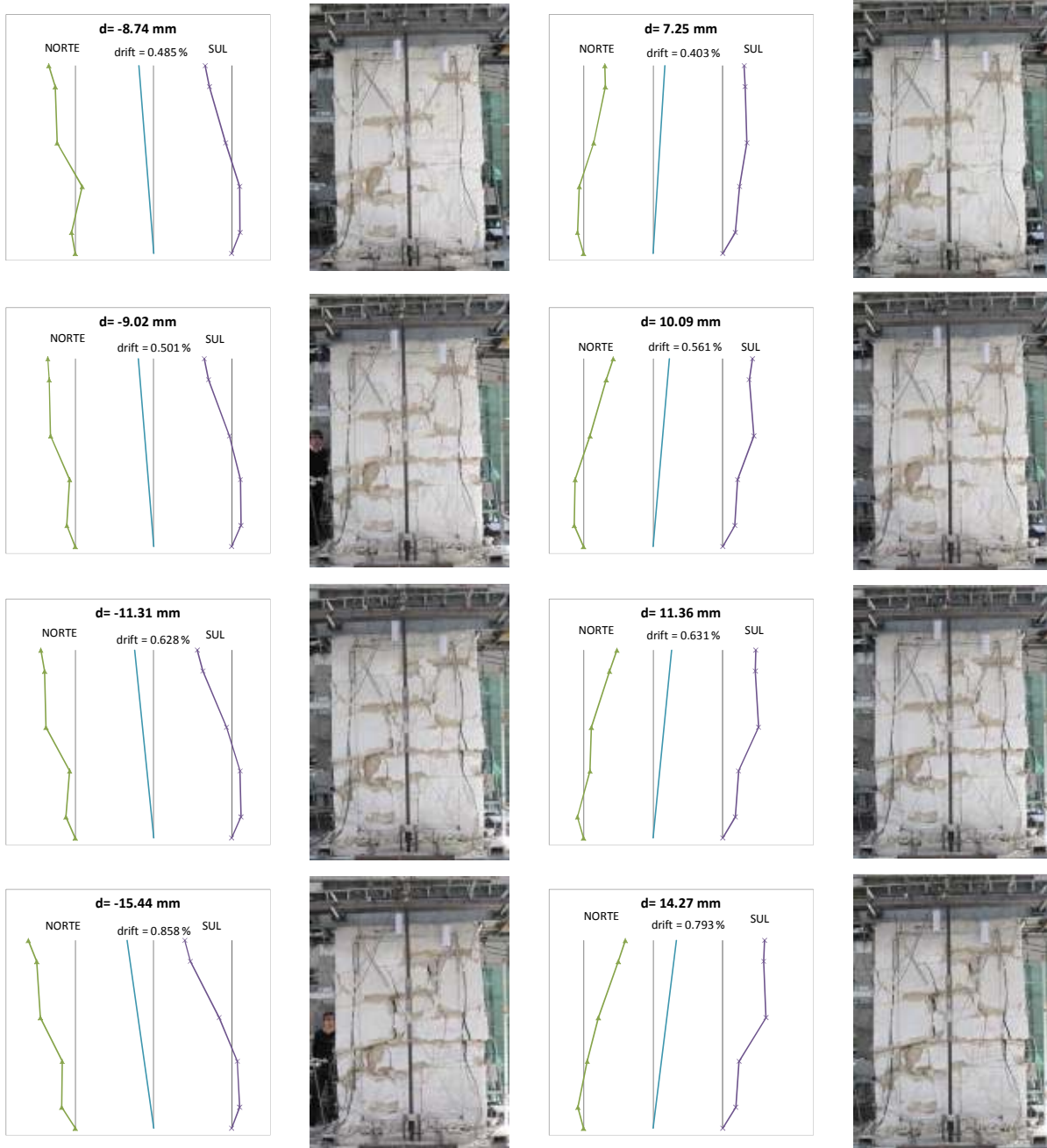


Fig. 4.36 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (IR6++ - de -8.74 mm a -15.44 mm e 7.25 mm a 14.27 mm).

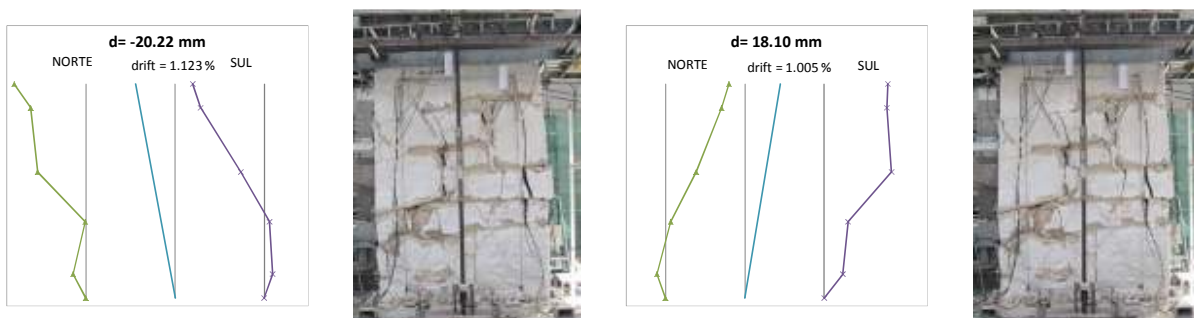


Fig. 4.36 (cont.) – Deformadas laterais e correspondentes *drifts*, d em mm (IR6++ - -20.22 mm e 18.10 mm).

## 4.6. SÍNTESE DE RESULTADOS

Para concluir este estudo apresenta-se de seguida uma síntese comparativa dos resultados processados de modo a procurar cumprir os objetivos propostos para esta investigação.

### 4.6.1. RESULTADOS GLOBAIS

No que concerne aos resultados globais, merece especial referência as dificuldades sentidas em traçar envolventes dos gráficos força-deslocamento, devido ao ganho de resistência de algumas paredes; este efeito poderá ser devido ao rearranjo das pedras durante o ensaio, levando a que, para atingir um dado valor de deslocamento, se necessite de uma força maior. Recorda-se que estas envolventes procuram aproximar a curva de resposta como se de um ensaio monotónico se tratasse, a fim de aferir parâmetros globais de comportamento.

A tentativa de sistematização da análise de resultados e do cálculo de parâmetros globais de resposta para as paredes estudadas, revelou a necessidade de se proceder a uma análise cuidada, porque a mesma estratégia de aproximação de curvas bilineares às envolventes de resposta dos ensaios, não serviu para todos os casos.

Ainda assim, as envolventes agrupadas por tipo de regularidade permitem uma leitura útil para a comparação dos resultados, conforme se ilustra na figura 4.37. Estes gráficos evidenciam que, como era de esperar, quanto maior é a força vertical aplicada à parede maior é a força horizontal atingida. Além disso, em boa parte dos ensaios foi observada rotura por corte, com *rocking* no início como seria de esperar.

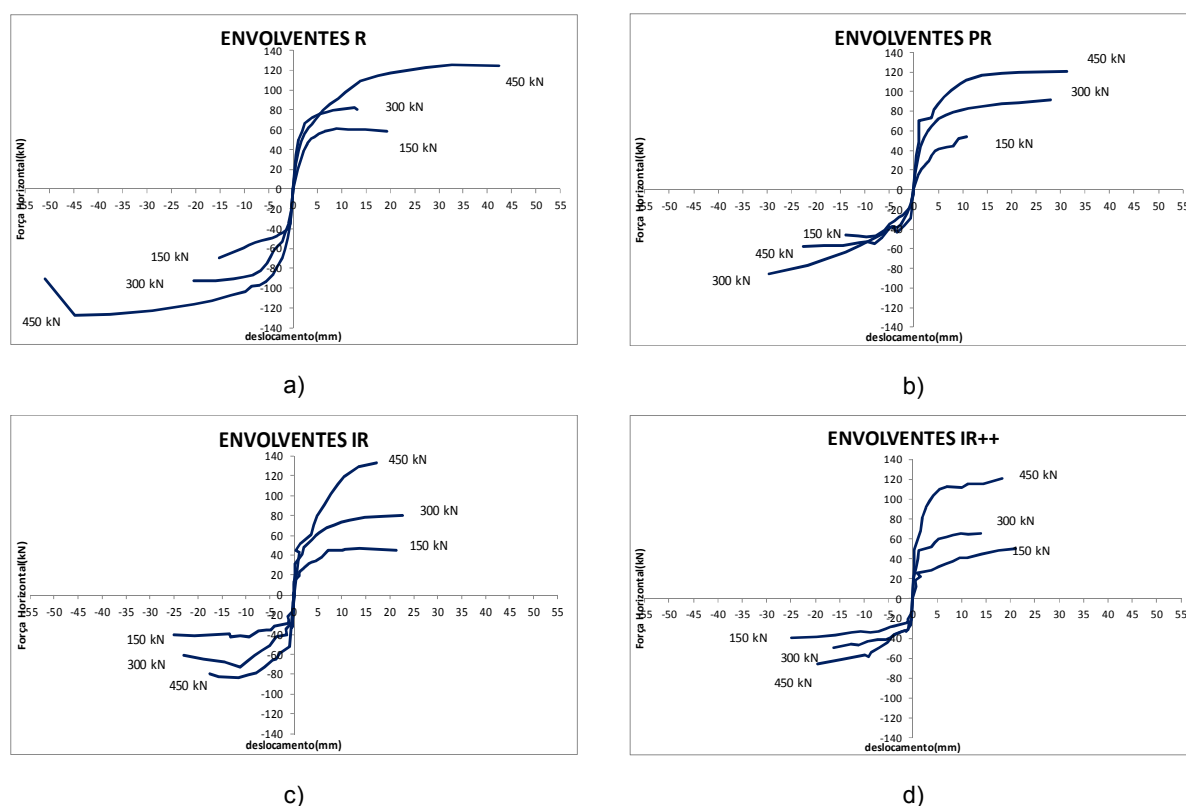
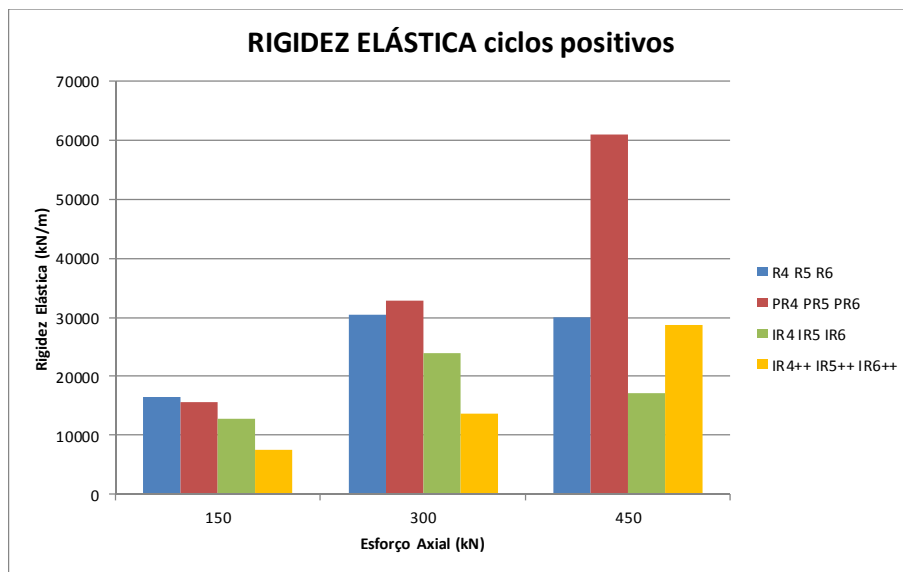


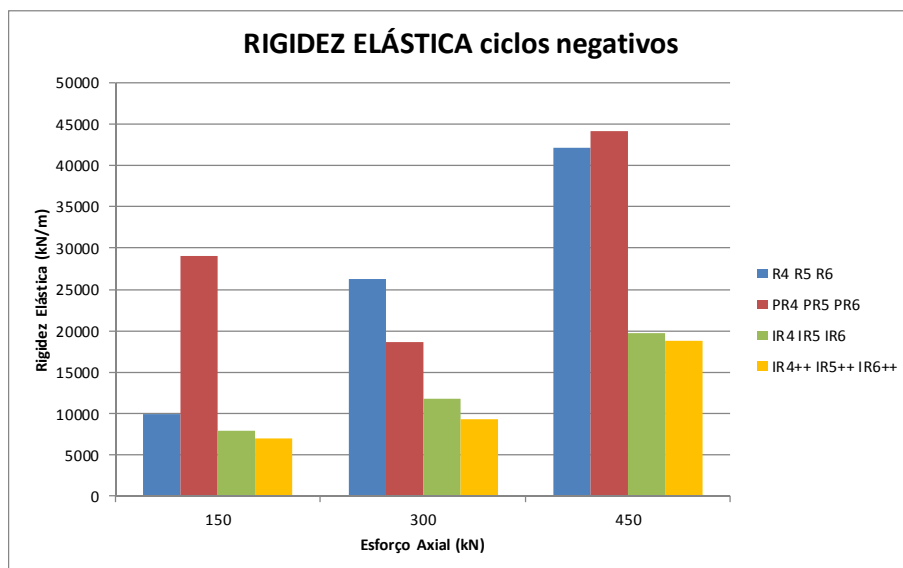
Fig. 4.37 – Envolventes dos ciclos histeréticos para os diferentes níveis de esforço axial, por tipo de parede: a) tipo R, b) tipo PR, c) tipo IR e d) tipo IR++.

Em alguns diagramas de força/deslocamento verificou-se que os ciclos iniciais tinham um comportamento estranho, originando valores da rigidez inicial muito elevados, pelo que foram analisados segundo outra abordagem desprezando estes mesmos ciclos, calculados de acordo com o ponto 4.1 deste capítulo. Com os valores assim obtidos para a rigidez inicial, notou-se uma tendência do seu crescimento para valores mais elevados de esforço axial em cada tipo de parede (figura 4.38), com exceção de apenas um caso (PR4, negativo).

Esta mesma figura evidencia ainda uma certa tendência, pese embora de forma menos sistemática, de decréscimo de rigidez com o acréscimo de irregularidade das paredes (exceção feita para os casos PR5, PR6 e IR6, nos ciclos positivos, e PR4 e IR6, nos ciclos negativos).



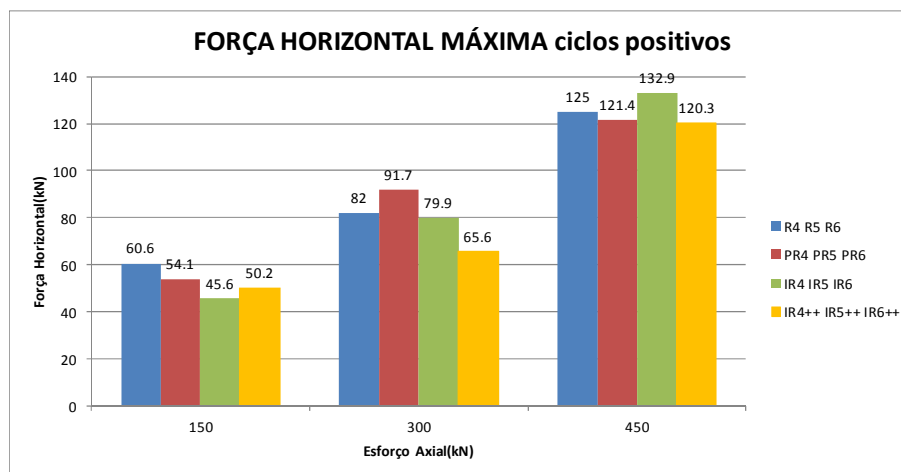
a)



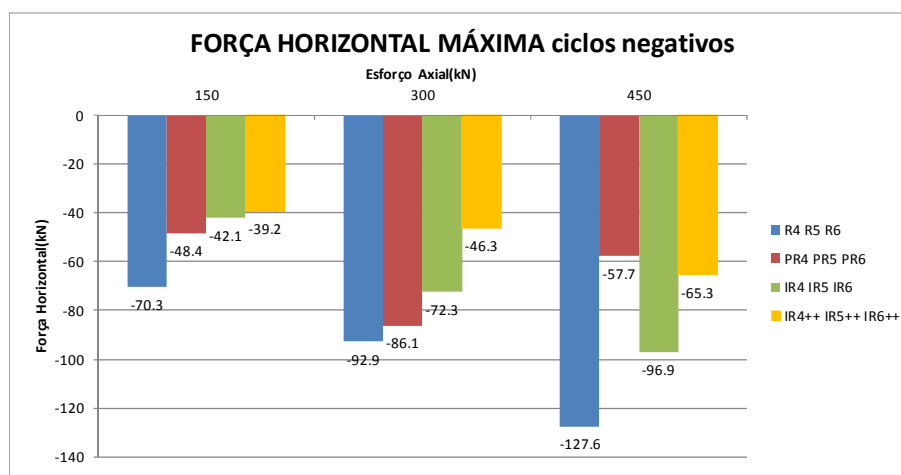
b)

Fig. 4.38 – Rigidez elástica: a) ciclos positivos e b) ciclos negativos.

Relativamente ao valor da força horizontal máxima, face à geometria das paredes, nota-se que tem tendência a ser inferior para as paredes muito irregulares. Nas paredes de geometria regular a rotura ocorreu nas juntas, dado que a argamassa tem uma resistência menor que as pedras; já nos restantes ensaios verificou-se rotura de pedras e quanto maior a irregularidade mais rotura havia.



a)

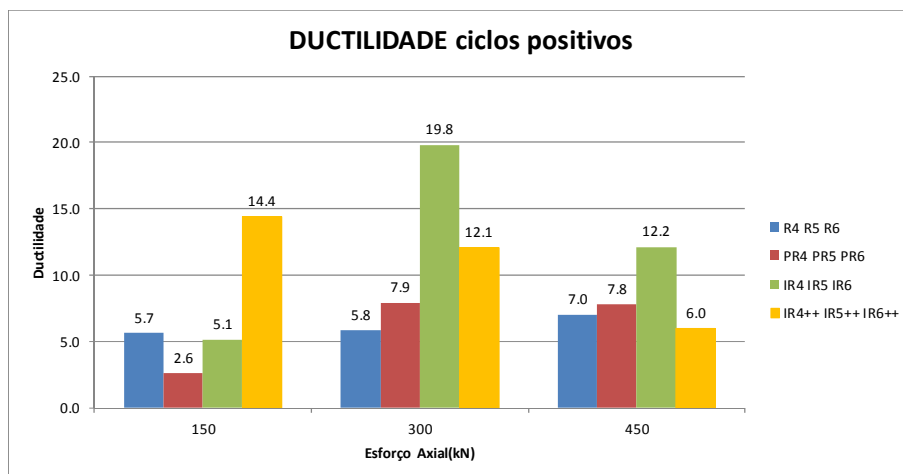


b)

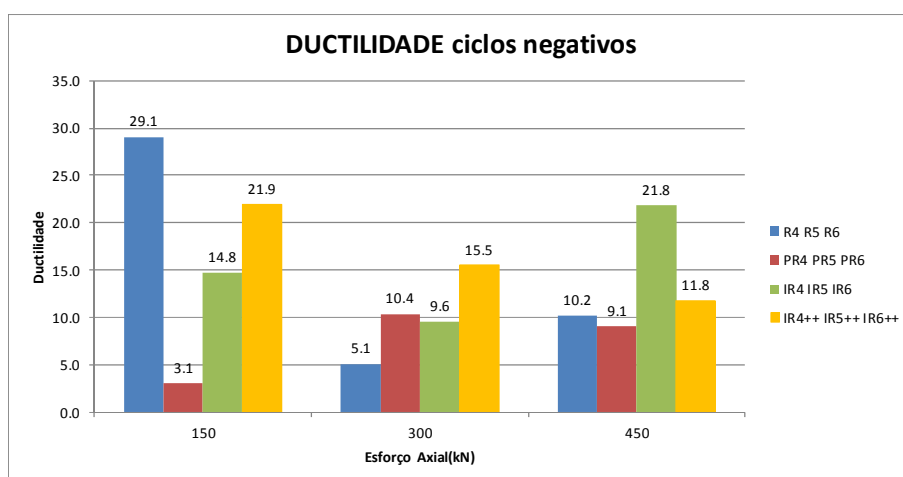
Fig. 4.39 – Variação da força horizontal máxima para a) ciclos positivos e b) ciclos negativos.

A ductilidade máxima é calculada a partir do deslocamento máximo atingido e o deslocamento de cedência, sendo este medido através da curva bilinear aproximada para cada ensaio. Os valores da ductilidade assim obtida para as diversas paredes e níveis da carga vertical encontram-se descritos nos gráficos ilustrados na figura 4.40.

Tal como já observado na anterior apresentação de resultados, os valores de ductilidade assim obtidos são demasiado elevados para este tipo de paredes e de construção, razão pela qual devem ser analisados com a devida precaução. Além disso, os resultados não evidenciam uma linha de tendência clara para a ductilidade máxima.



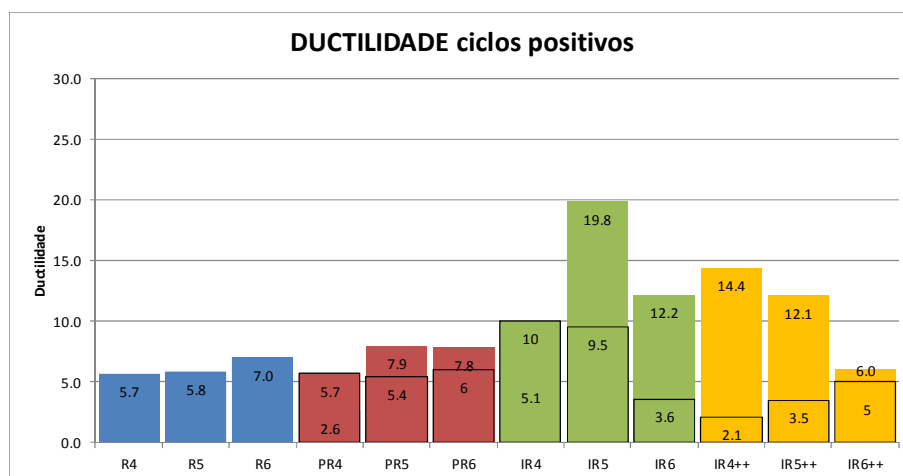
a)



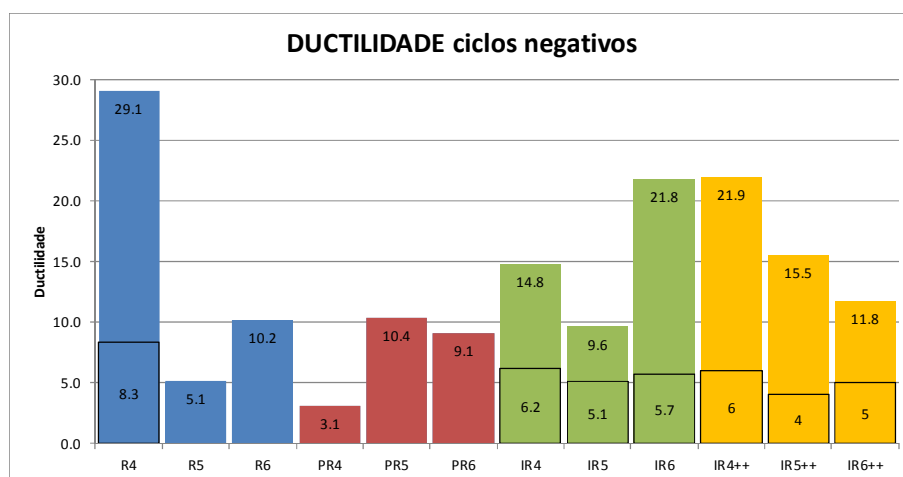
b)

Fig. 4.40 – Variação da ductilidade máxima para a) ciclos positivos e b) ciclos negativos.

No sentido de procurar obter valores de ductilidade máxima mais consentâneos com o expectável, nos subcapítulos anteriores foram realizadas correções aos valores de deslocamento de cedência e máximo, em função das particularidades de cada curva, tendo assim resultado noutros valores de ductilidade. Estes valores são apresentados na figura 4.41, em conjunto com os anteriores, sendo que o retângulo indicado por contorno a traço cheio corresponde aos novos valores corrigidos. Genericamente percebe-se que há uma clara tendência para se ter valores menores de ductilidade com as correções realizadas, o que enquadra melhor os resultados obtidos no expectável para estas paredes (pese embora alguns casos com valores de ductilidade ainda elevados).



a)



b)

Fig. 4.41 – Valores originais e corrigidos da ductilidade máxima para a) ciclos positivos e b) ciclos negativos. (Valores corrigidos em contorno a traço cheio)

Uma melhor comparação da resistência e ductilidade, pode ser conseguida agrupando as envolventes de acordo com o seu esforço axial para assim poder determinar qual o valor de deslocamento atingido em todos os ensaios bem como a força que lhe está associada e proceder a comparações adicionais.

Assim, na figura 4.42 são apresentados os conjuntos de envolventes por nível de esforço axial, das quais se pode extrair o valor da força para o menor dos deslocamentos máximos atingidos para cada nível de carga axial aplicado, para ser possível a comparação entre os diferentes tipos de paredes.

Dessa seleção de forças para deslocamentos concordantes, resultou que para os ensaios em que o esforço vertical foi de 150kN o valor do deslocamento considerado foi aproximadamente de 11 mm e -14 mm, para ciclos positivos e negativos respetivamente. Para o segundo nível aplicado, de 300kN, o valor de deslocamentos analisado foi aproximadamente de 14 mm e -17 mm, para ciclos positivos e negativos respetivamente e quando o valor da carga axial foi de 450kN os valores de deslocamento corresponderam a 18 mm e -19 mm.

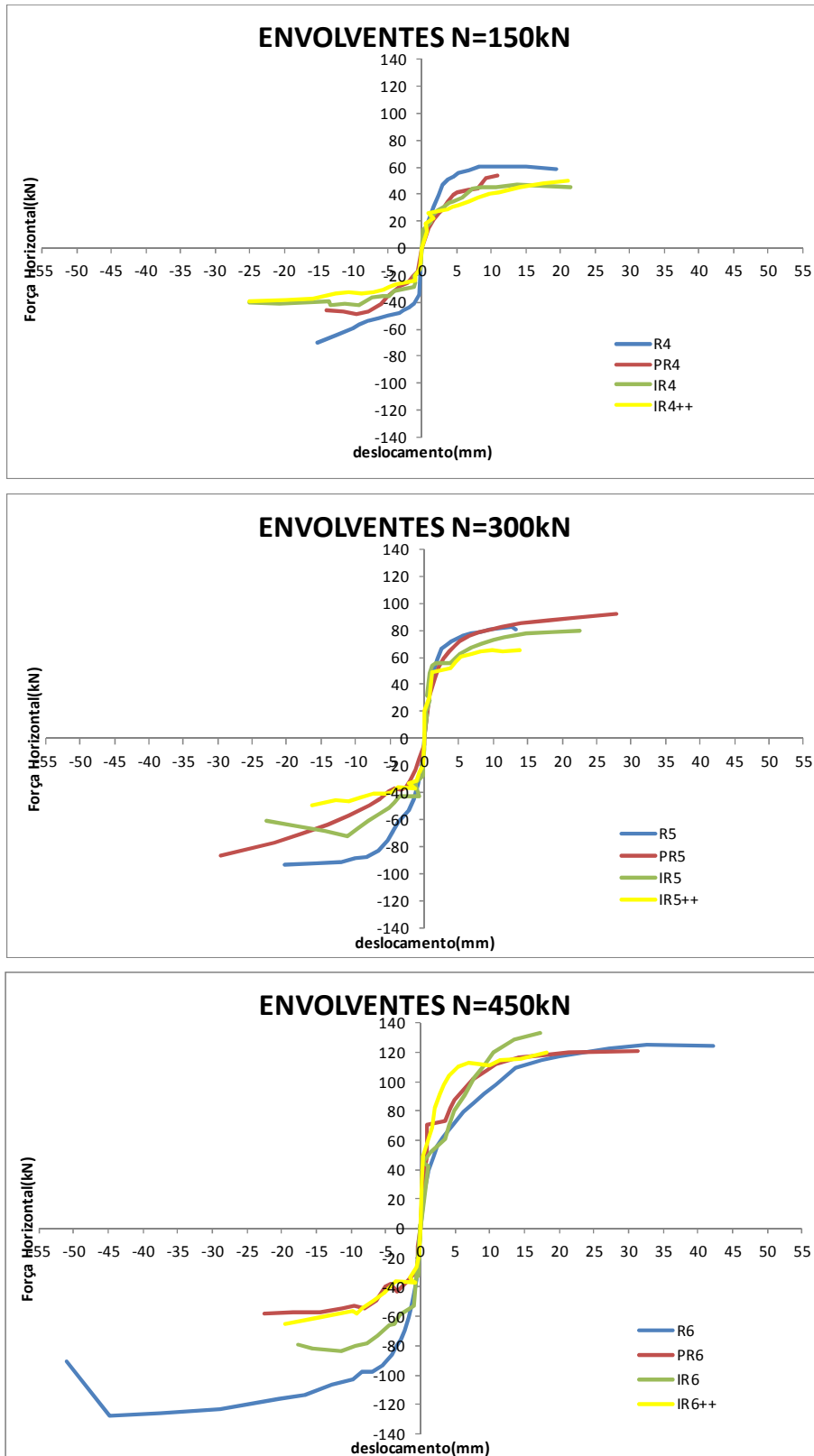
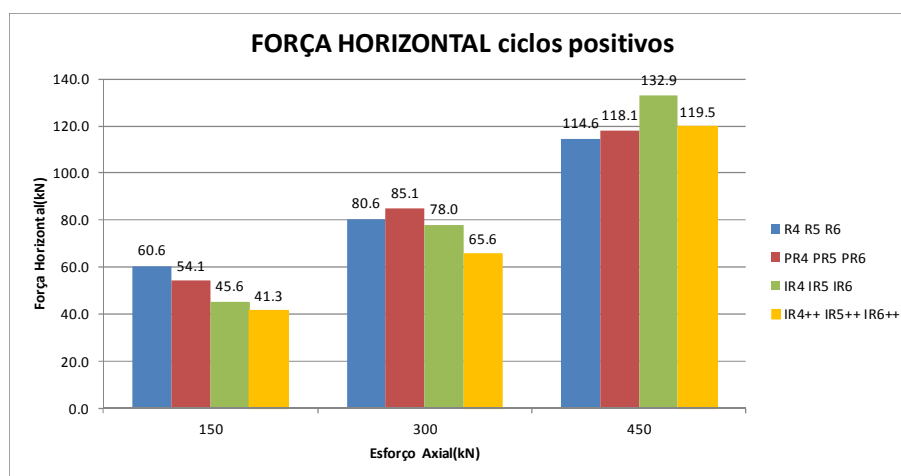
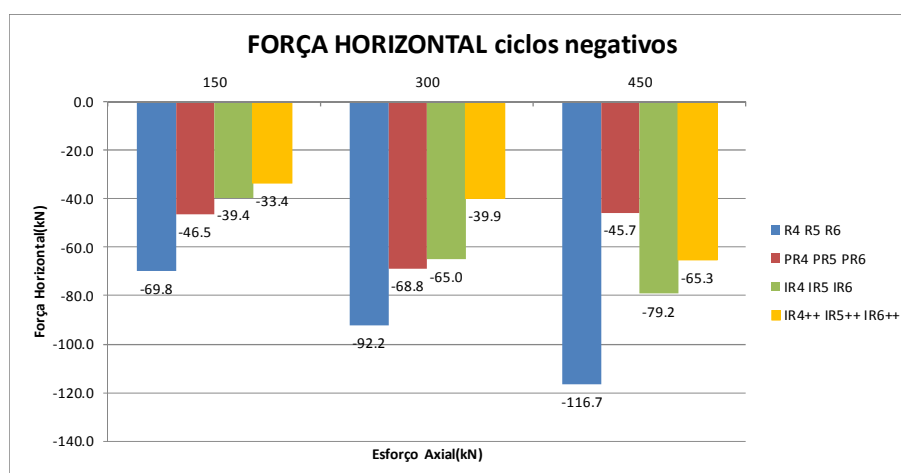


Fig. 4.42 – Envolventes dos ciclos histeréticos por nível de esforço axial.

Na figura 4.43 são então apresentados novos gráficos de variação de forças atingidas para os níveis de deslocamentos semelhantes atrás mencionados.



a)

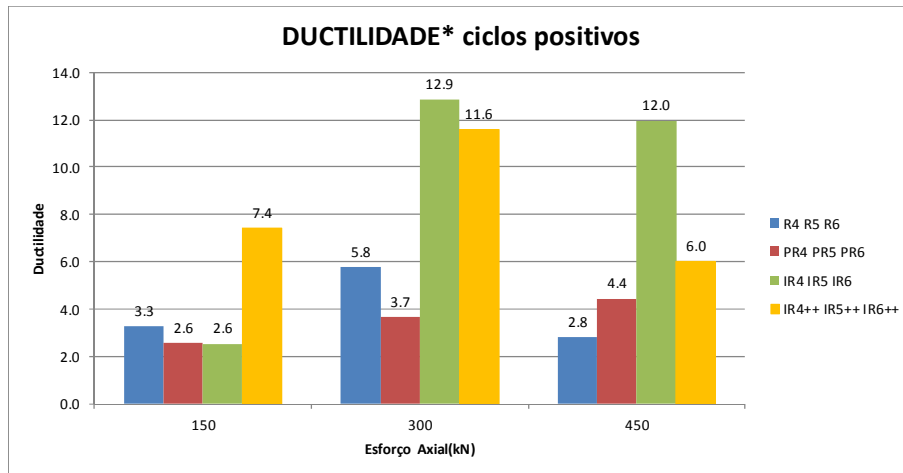


b)

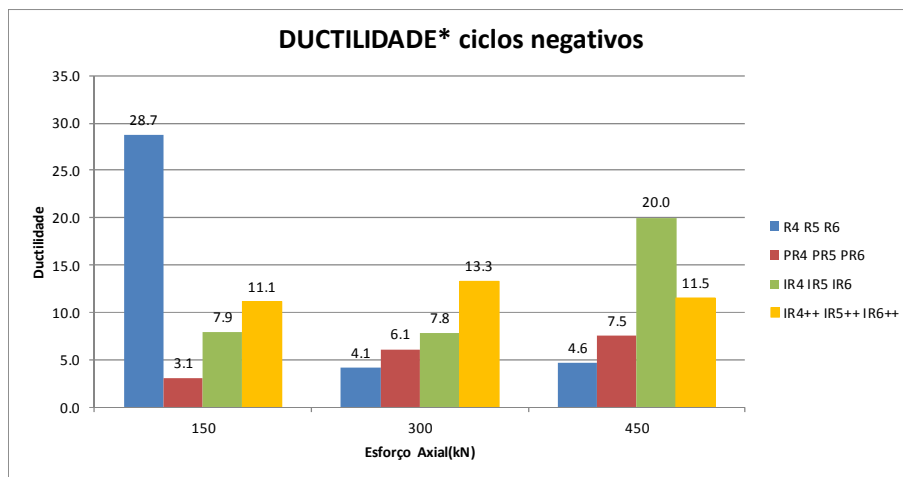
Fig. 4.43 – Variação da força horizontal atingida para níveis semelhantes de deslocamentos: a) ciclos positivos e b) ciclos negativos.

Novamente pode-se concluir que, de um modo geral (com algumas exceções para o nível de máxima carga vertical), a força atingida vai diminuindo conforme a irregularidade das paredes e também, de modo mais sistemático, com a redução da força vertical.

De modo idêntico procedeu-se ao cálculo da ductilidade atingida em correspondência com as forças laterais descritas na figura 4.43, tendo-se elaborado os gráficos incluídos na figura 4.44, dos quais se conclui que, embora de forma não sistemática, a ductilidade tende a ser maior nas paredes de geometria muito irregular, evidenciando capacidade de não perder força enquanto se deformam.



a)



b)

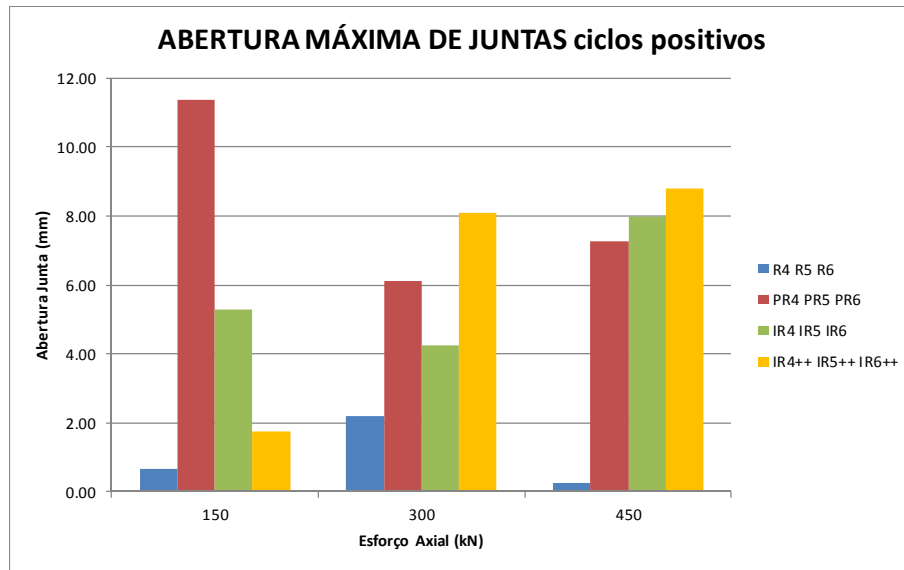
Fig. 4.44 – Variação da ductilidade para níveis semelhantes de deslocamentos: a) ciclos positivos e b) ciclos negativos.

#### 4.6.2. RESULTADOS LOCAIS

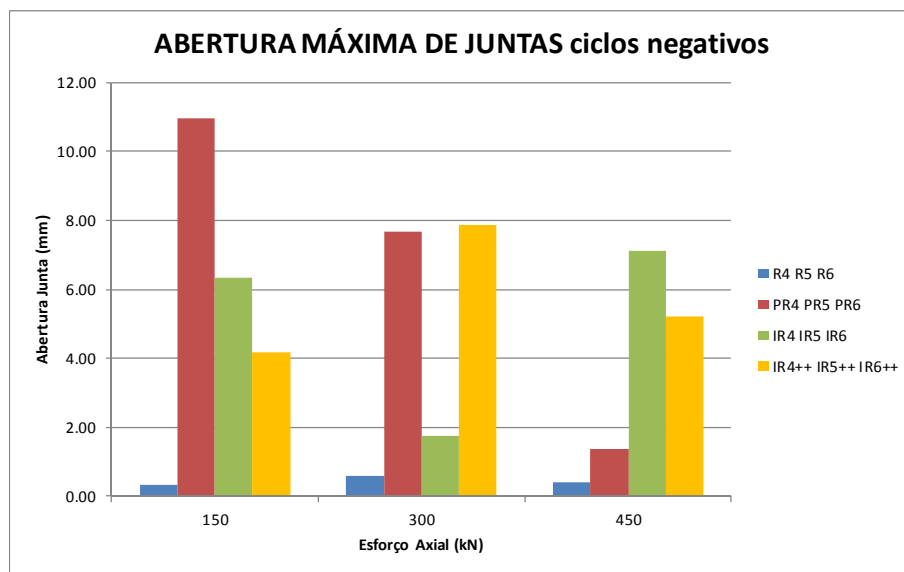
Quando o comportamento é de flexão, verifica-se uma maior abertura das juntas laterais e com o estudo realizado foi possível perceber qual a junta com maior abertura que, por vezes, não é possível detetar durante o ensaio. Porém, notou-se que é necessário algum cuidado no uso destes dados, porque a leitura nem sempre corresponde com o esperado, devido ao deslizamento entre pedras que provoca erros nas leituras obtidas diretamente dos sensores.

Expurgando então os resultados anómalos, é possível resumir os valores máximos de abertura de juntas para as diversas tipologias de parede e níveis de esforço axial, conforme se ilustra na figura 4.45, donde se conclui que para os ciclos positivos a abertura das juntas é maior nas paredes irregulares, quando o esforço axial é maior, enquanto para o menor esforço vertical a parede parcialmente regular é que obtém maior abertura de juntas, verificando-se o mesmo para os ciclos negativos. Para as paredes parcialmente regulares existe uma tendência de quanto maior é o esforço axial menor é a abertura da junta, para os ciclos negativos, passando-se o contrário para as paredes

irregulares nos ciclos positivos. Nas restantes não se verifica nenhuma tendência, pois a abertura de juntas é influenciada pelo comportamento da parede durante o ensaio.



a)



b)

Fig. 4.45 – Variação da abertura máxima de juntas (mm) para: a) ciclos positivos e b) ciclos negativos.

No que se refere aos perfis de deslocamentos laterais das paredes conclui-se que são importantes para a compreensão do comportamento das paredes durante o ensaio, pois é visível quando existe deslizamento ou flexão e a que deslocamento corresponde esse estado.



# 5

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1. RESUMO DAS CONCLUSÕES PRINCIPAIS

Com a realização desta dissertação completou-se mais um estudo sobre paredes de alvenaria de pedra, incidindo em ensaios ao corte com compressão de várias tipologias de paredes. Estes ensaios têm como objetivo o aprofundamento do conhecimento deste tipo de paredes, sendo necessário ainda a realização de mais ensaios, deste e de outras tipologias de paredes, para desta forma abranger e aumentar o conhecimento e tornar menos subjetivo a utilização destes recursos na construção.

Com o levantamento geométrico da parede construída em laboratório foi possível perceber os métodos construtivos mais comuns utilizados na construção das paredes de alvenaria de pedra e permitiu o conhecimento da variedade de geometrias de pedras usadas.

O acompanhamento dos ensaios em laboratório permitiu perceber o comportamento deste tipo de paredes e verificar que este depende da geometria e arranjo das pedras, tendo sido possível obter dados que permitiram o estudo do comportamento e características de cada parede para posterior comparação.

Inicialmente foi feito um tratamento dos dados para a forma de gráficos ao longo do tempo para perceber se a leitura dos transdutores seria a esperada e assim proceder a correções dos dados e do sistema de ensaio que seriam necessárias. Por exemplo, a correção de valores através de relação de ângulos foi importante para saber qual o valor real do deslocamento e colocar um sistema de guiamento longitudinal para controlar a parede quando esta tendia a sair para fora do seu plano.

Para o cálculo dos parâmetros globais de comportamento das paredes ensaiadas verificou-se que é necessário especial cuidado no uso de métodos sistemáticos, agravado pela dificuldade acrescida em traçar a envolvente monotónica e o cálculo dos parâmetros influenciada por esta.

Verificou-se rotura de pedras em quase todos os ensaios, exceto nas paredes regulares onde as pedras tinham uma forma reta em que não havia contactos pontuais, ao contrário das restantes.

O comportamento das paredes durante os ensaios veio confirmar o esperado para este tipo, isto é, *rocking* onde a força vertical era inferior, deslizamento e rotura diagonal por corte.

Com a análise dos resultados obtidos veio comprovar-se que quanto maior é a força vertical aplicada à parede maior é a força horizontal atingida, bem como a rigidez elástica.

Em relação à sua geometria observou-se que quanto maior é a irregularidade maior tende a ser a ductilidade.

## **5.2. PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Para os desenvolvimentos futuros será necessária a realização de mais ensaios com as novas paredes construídas no laboratório e uma descrição pormenorizada da sua regularidade e composição devido à diferente argamassa colocada e método construtivo. A comparação dos parâmetros calculados para este tipo de paredes com o realizado neste estudo será uma mais-valia.

O cálculo de parâmetros no estudo destas paredes ensaiadas, tal como, o módulo de elasticidade e módulo de distorção, será importante para um aprofundamento do estudo e possível comparação mais pormenorizada, de forma a distinguir melhor as diferenças devido ao tipo de geometria. Ainda é possível um estudo do carregamento vertical inicial, para desta forma perceber a influência do tamanho das pedras e da argamassa que preencha as juntas que compunham as paredes.

## BIBLIOGRAFIA

- Almeida, C. (2000). *Análise do Comportamento da Igreja do Mosteiro da Serra do Pilar sob Acções Sísmicas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Almeida, C. (2012). *Paredes de Alvenaria do Porto, Tipificação e Caracterização Experimental*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Almeida, C., Guedes, J., Arêde, A., Costa, A. (2010). *Geometrical and Mechanical Characterization of One Leaf Stone Masonry*. 8th International Masonry Conference 2010 in Dresden Germany, Dresden.
- Almeida, C., Guedes, J., Arêde, A. e Costa, A. (2010). *Caracterização de Alvenarias da cidade do Porto*. Congresso Património 2010. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Almeida, C., Costa, C.Q., Guedes, J., Arêde, A., Costa, A., Costa, A.A. (2010). *The Influence of Material Characteristics on the Mechanical Behaviour of Stone Masonry Walls*. 8th International Masonry Conference. pp. 683 - 692. Dresden, Germany.
- Almeida, C., Guedes, J.P., Arêde, A., Costa, C.Q., Costa, A. (2011). *Physical characterization and compression tests of one leaf stone masonry walls*. Construction and Building Materials 30:188-197.
- Autodesk. AutoCAD2010.
- Arêde, A., Costa, A., Costa, A. A., Oliveira, C.S., Neves, F. (2008). *Experimental In-Situ Testing of Typical Masonry Constructions of Faial Island - Azores*, Proceedings of the 14th WCEE, Beijing.
- Arêde, A. ; Costa, A.; Guedes, J. e Paupério, E. (2008). *Reforço de Estruturas de Alvenaria de Pedra - Contribuições do NCREP - FEUP*, Actas das II Jornadas de Engenharia Civil sobre Avaliação e Reabilitação das Construções Existentes, Aveiro.
- Arêde, A., Costa, A., Moreira, D., Neves, N. (2012). *Seismic Analysis and Strengthening of Pico Island Churches*, Bulletin of Earthquake Engineering 10(1): 181-209.
- Arêde, A., Costa, A., Neves, F. (Dezembro 2008). *Igreja de Nossa Senhora da Lapa no Porto - Estabilização de Padieiras Sobre Janelas das Torres na Fachada Principal e Controlo das Patologias Estruturais da Torre Nascente*, Relatório de Inspeção e Proposta de Intervenção para a Venerável irmandade de Nossa Senhora da Lapa, I.C.-NCREP.
- Costa, A., Arêde, A. (2006). *Strengthening of Structures Damaged by the Azores Earthquake of 1998*, Construction and Building Materials, Special Issue, Vol. 20 - 4, pp 252-268.
- Costa, A., Arêde, A., Coutinho, D. (Fevereiro 2009). *Castelo de Guimarães – Plano de Monitorização*, Nota Técnica para a DRCN - IGESPAR, FEUP, I.C.-NCREP.
- Costa, A. A., Arêde, A., Costa, A. (2009). *An Overview of Simple and Complex Test Setups for Experimental Assessment of Masonry Structures Concerning Seismic Behaviour*. International Review of Mechanical Engineering 3:6, 808-815.
- Costa, A.A., Arêde, A. e Costa, A. (2010). *A Avaliação do Comportamento Fora-do-Plano de Paredes de Alvenaria*. Património 2010. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Costa, A.A., Arêde, A., Costa, A., Oliveira, C.S. (2010). *In-Situ Evaluation of Strengthening Techniques to Improve the Out-of-Plane Behaviour of Stone Masonry Buildings*. 14th European Conference in Earthquake Engineering. Ohrid, Macedonia.

Costa, A. A., Arêde, A., Costa, A., Guedes, J., Oliveira, C. (2011). *In-situ cyclic tests on existing stone masonry walls and strengthening solutions*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 40(4): 449-471.

Costa, A. A., Arêde, A., Costa, A., Guedes, J., Silva, B. (2012). *Experimental Assessment, Numerical Modelling and Strengthening of a Stone Masonry Wall*. Bulletin of Earthquake Engineering 10(1): 135-159.

Costa, A., Arêde, A., Costa, C. (Julho 2005). *Projeto de Reabilitação e Reforço - Arco do Coro Alto da Igreja dos Terceiros*, Proposta para a DGEMN, FEUP, DEC-Estruturas.

Costa, A., Arêde, A., Paupério, E., Castro, J., Guedes, J., Lopes, V., Dias, T., Neves, F., Coutinho, D., Milheiro, J., Monteiro, A., Costa, A.A. (Junho 2009). *Edifício do Mercado do Bolhão – Relatório de Inspeção e Diagnóstico Estrutural*, Relatório para o Gabinete e Obras Públicas da Câmara Municipal do Porto, FEUP, LESE.

Costa, A. (2007). *Experimental testing of lateral capacity of masonry piers. An application to seismic assessment of AAC masonry buildings*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Sísmica, Università degli Studi di Pavia.

Costa, A. (2012). *Seismic Assessment of the Out-of-Plane Performance of Traditional Stone Masonry Walls*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Costa, A., Arêde, A., Costa, A., Oliveira, C. (2012). *Out-of-plane behaviour of existing stone masonry buildings: experimental evaluation*. Bulletin of Earthquake Engineering 10(1): 93-111.

Costa, C., Arêde, A., Costa, A. (2010) *Numerical simulation of stone masonry arch bridges behaviour under road traffic moving loads*. 6th International Conference on Arch Bridges (ARCH'10). Fuzhou, China.

Costa, C. (2002). *Análise do Comportamento da Ponte da Lagoncinha sob do Tráfego Rodoviário*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Costa, C. (2009). *Análise Numérica e Experimental do Comportamento Estrutural de Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Costa, P. (2007). *Análise da Construção e do Comportamento de uma Ponte de Pedra*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Frumento, S., Magenes, G., Marandi, P., Calvi, G. M. (2009). *Interpretation of experimental shear tests on clay brick masonry walls and evaluation of q-factors for seismic design*. IUSS Press.

Lopes, V., Guedes, J., Paupério, E.; Arêde, A., Costa, A. (2009). *Ambient vibration testing and seismic analysis of a masonry chimney*, Journal of Building Appraisal, Vol. 5 - 2, pp 101-121.

Mota, K. (2009). *Caracterização e Tipificação in situ de paredes de alvenaria de pedra*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- Neves, N. (2004). *Identificação Dinâmica e Análise do Comportamento Sísmico de um Quarteirão Localizado na Cidade da Horta – Ilha do Faial*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Neves, N., Arêde, A., Costa, A. (2012). *Seismic Analysis of a Building Block*. Bulletin of Earthquake Engineering 10(1): 235-267
- Silva, B., Guedes, J., Arêde, A., Costa, A. (2012). *Calibration and application of a continuum damage model on the simulation of stone masonry structures. Gondar church a study case*, Bulletin of Earthquake Engineering 10(1): 211-234.
- Sousa, L. (2010). *Caracterização e parametrização de paredes portantes de alvenaria de pedra quanto à regularidade geométrica no seu plano*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Tomazevic, M. (1999). *Earthquake-resistant design of masonry buildings*. Imperial College Press
- Tomazevic, M. (2008). *Shear resistance of masonry walls and Eurocode 6: Shear versus tensile strength of masonry*. Materials and Structures.
- Vasconcelos, G. (2005). *Investigação experimental na mecânica da alvenaria de pedra: Caracterização de granitos e comportamento de paredes antigas de alvenaria de pedra*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Minho.

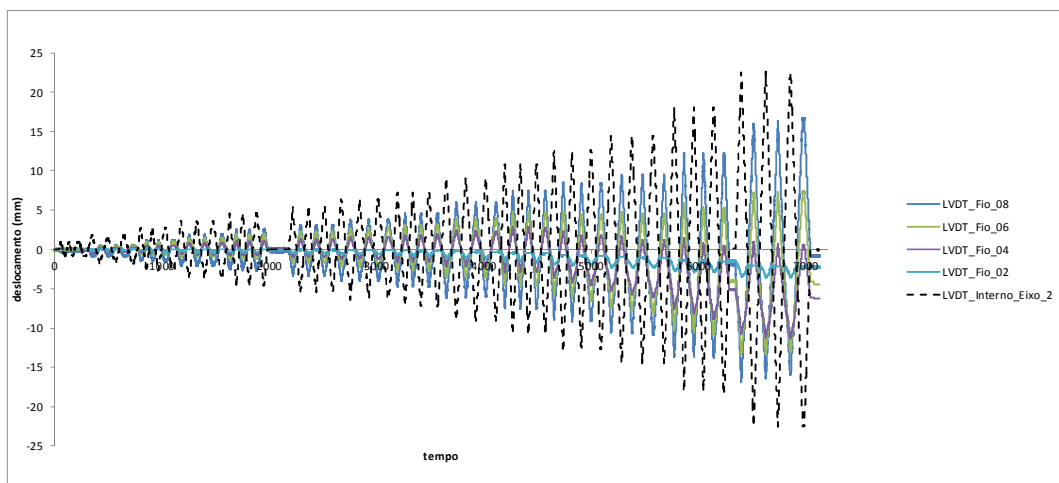
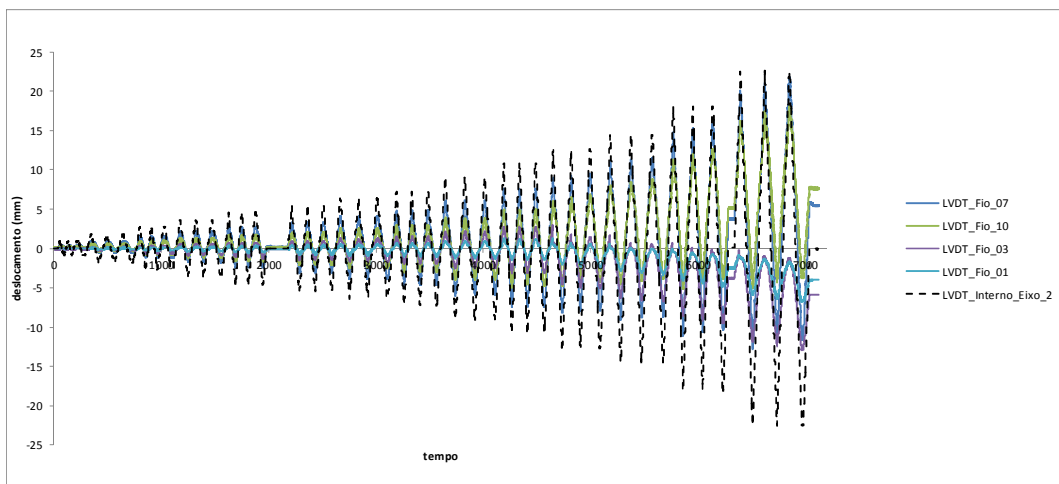
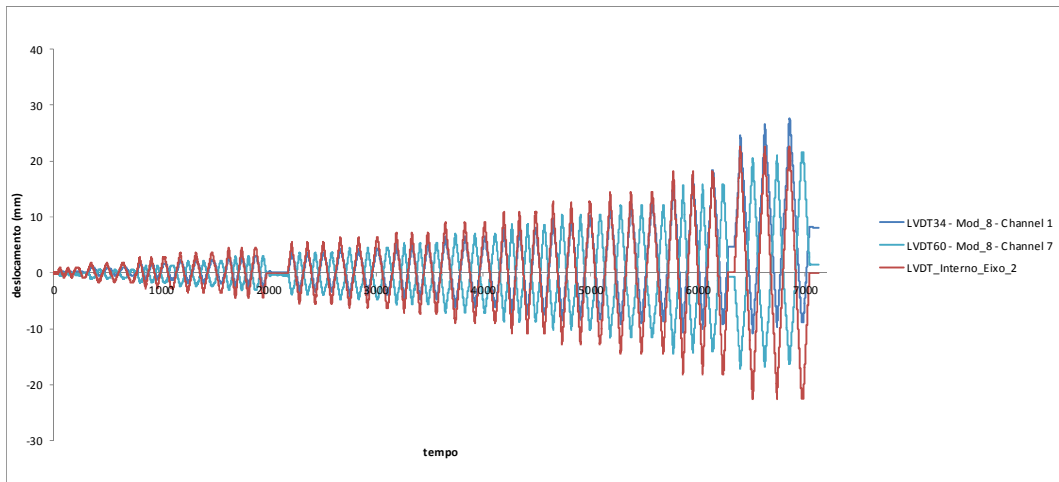


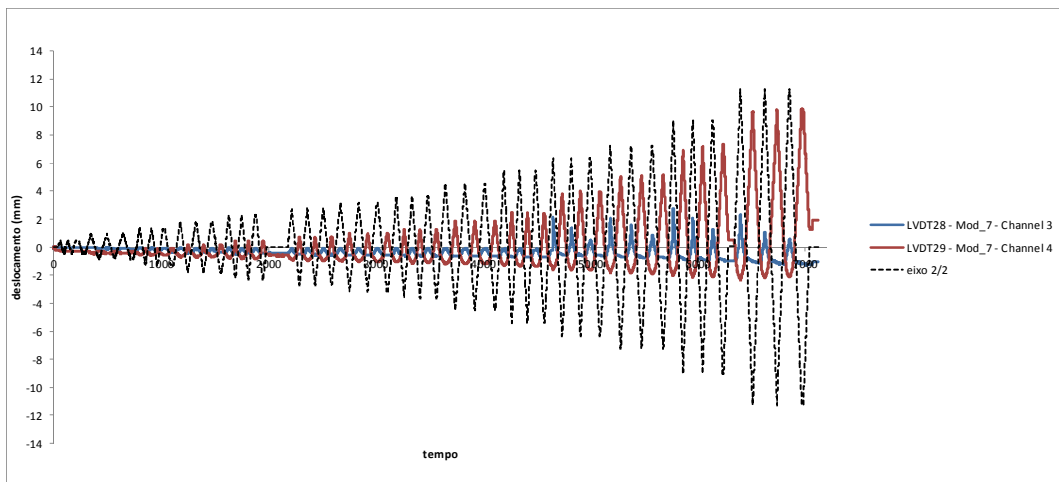
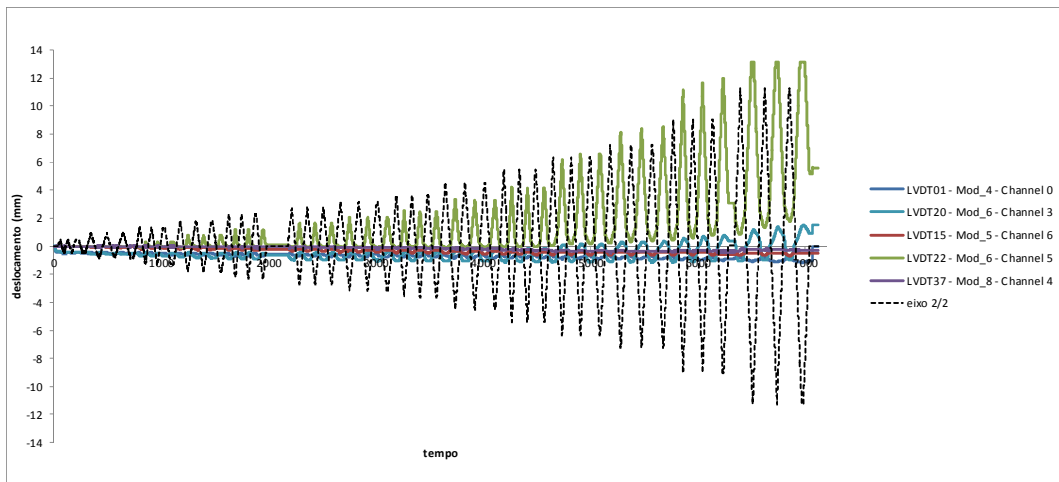
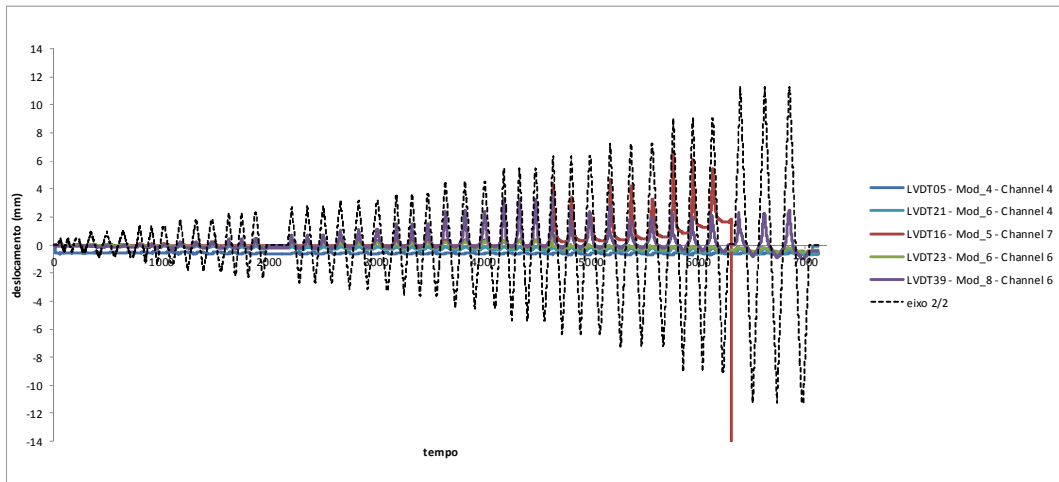
**A1**

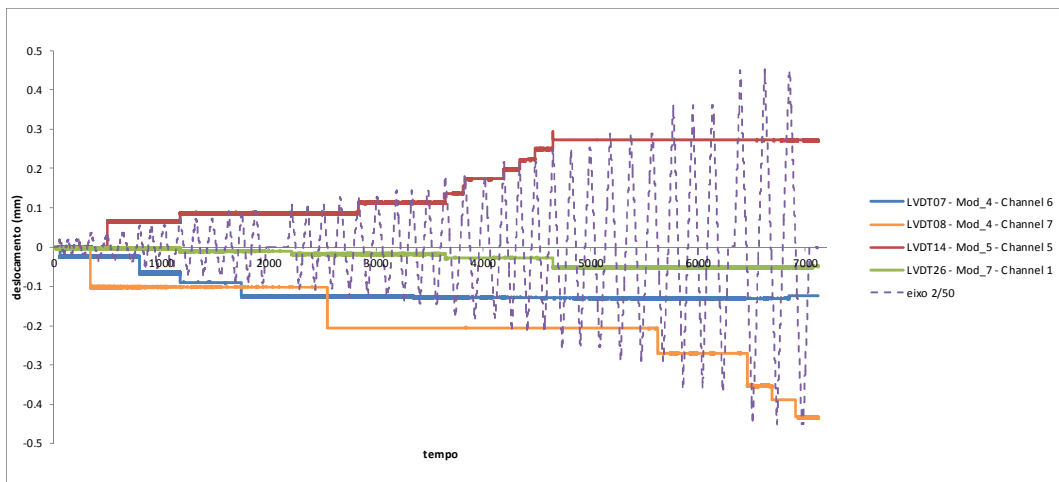
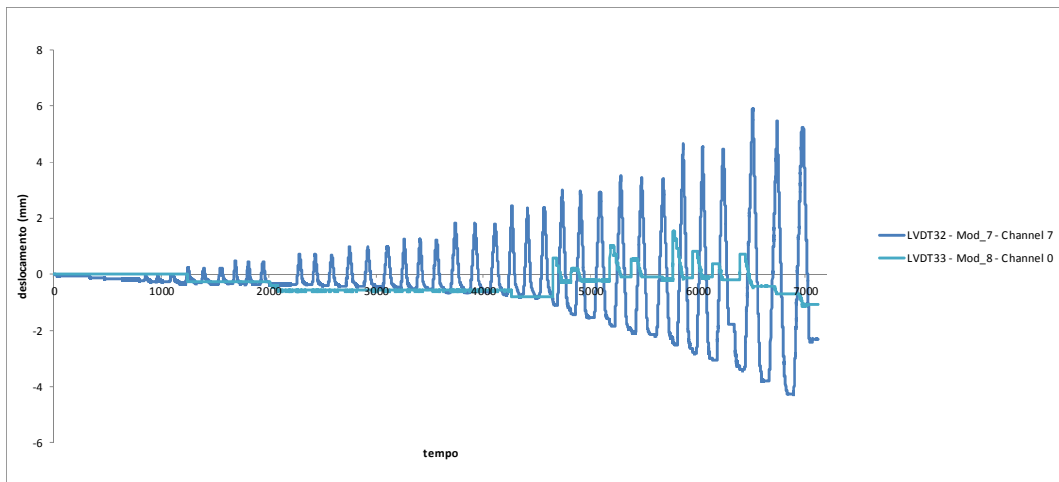
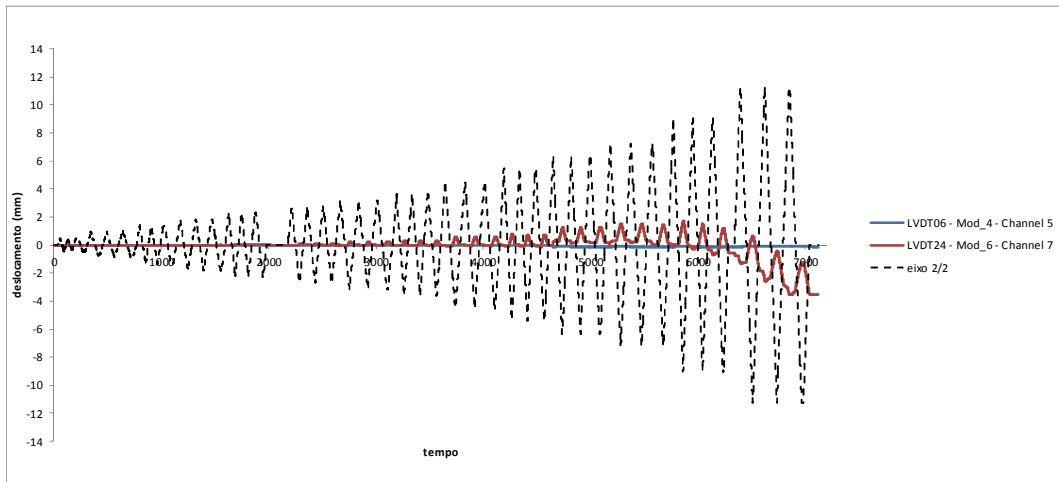
**GRÁFICOS DOS DADOS OBTIDOS**

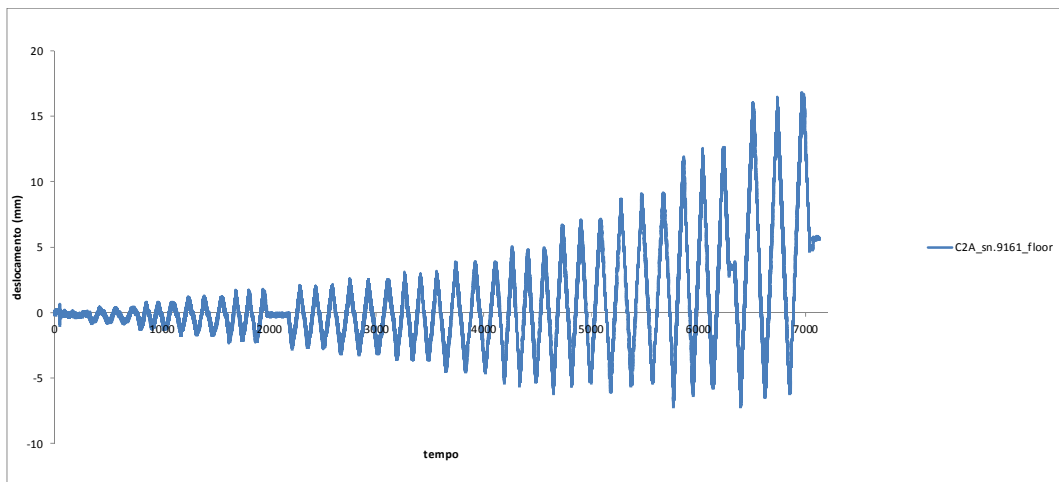
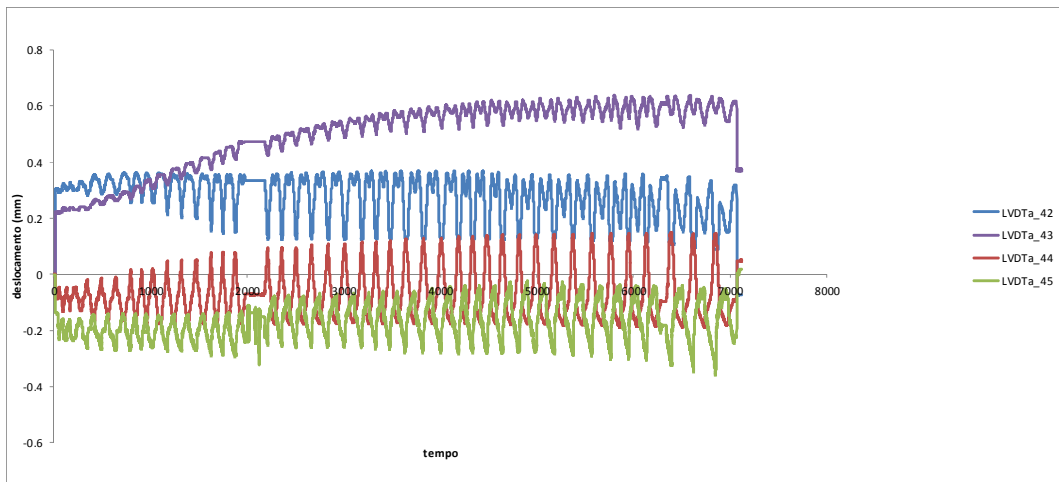
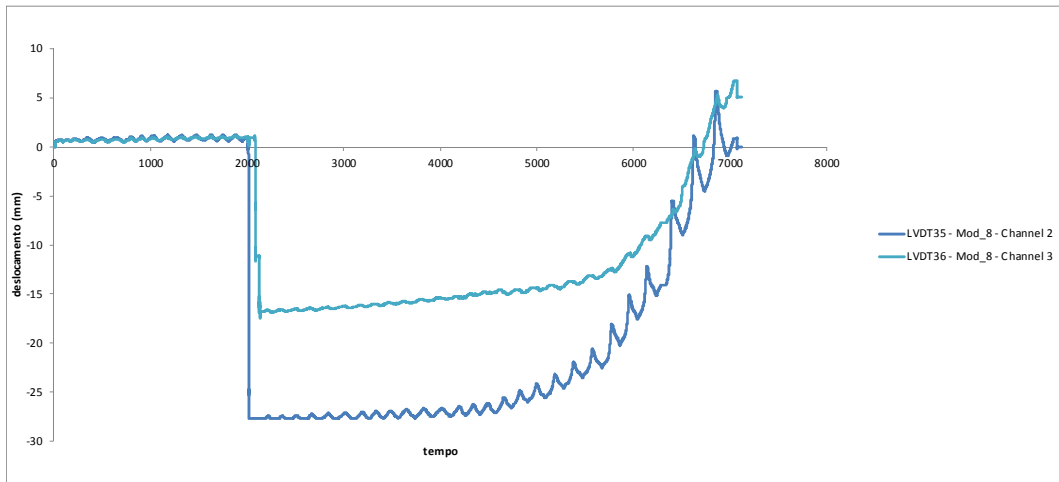


Ensaio R4

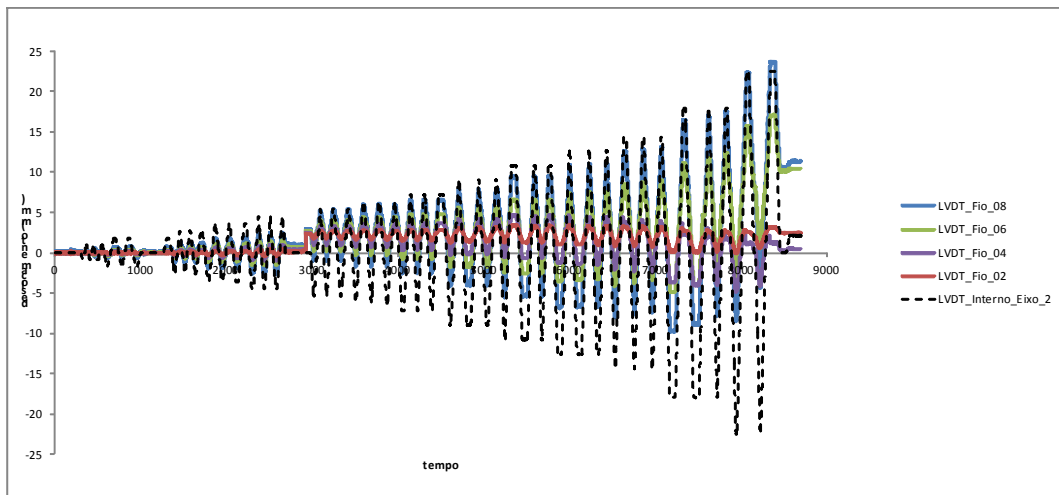
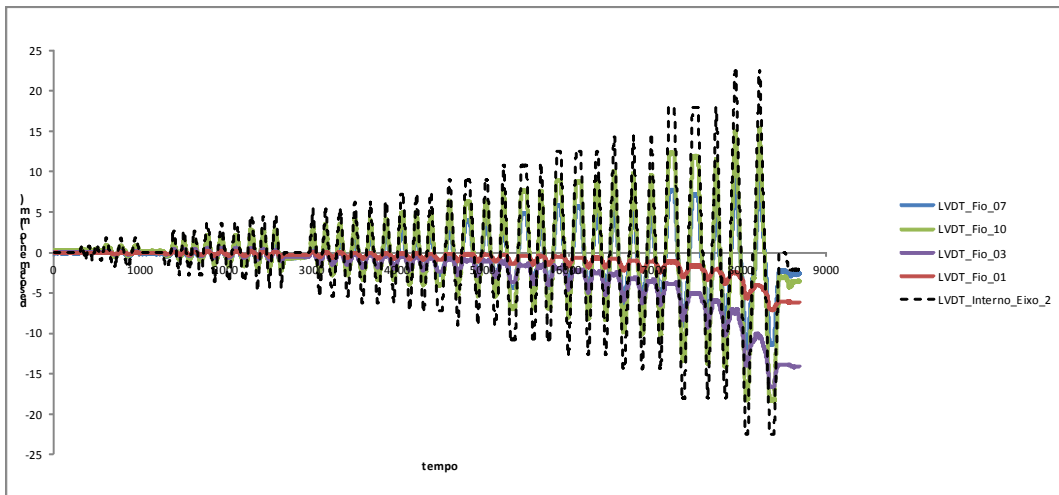
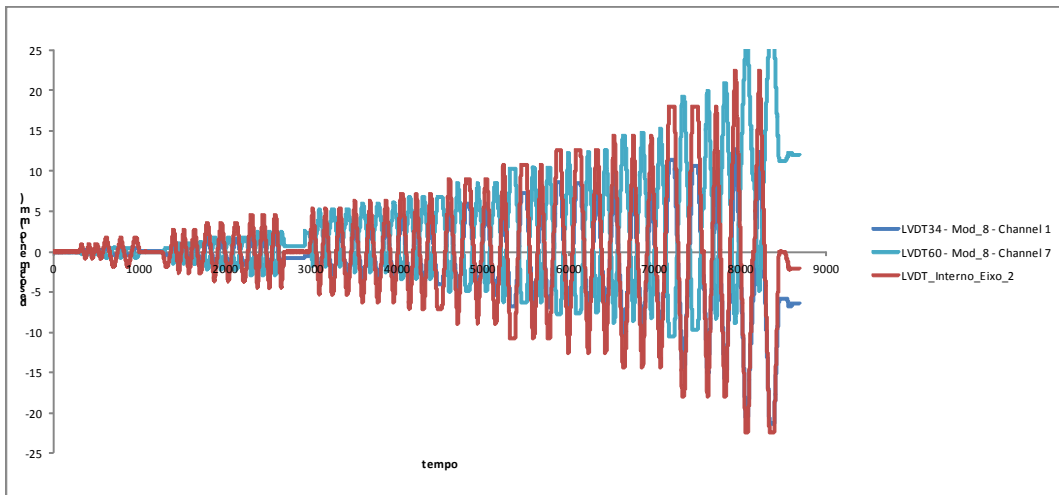


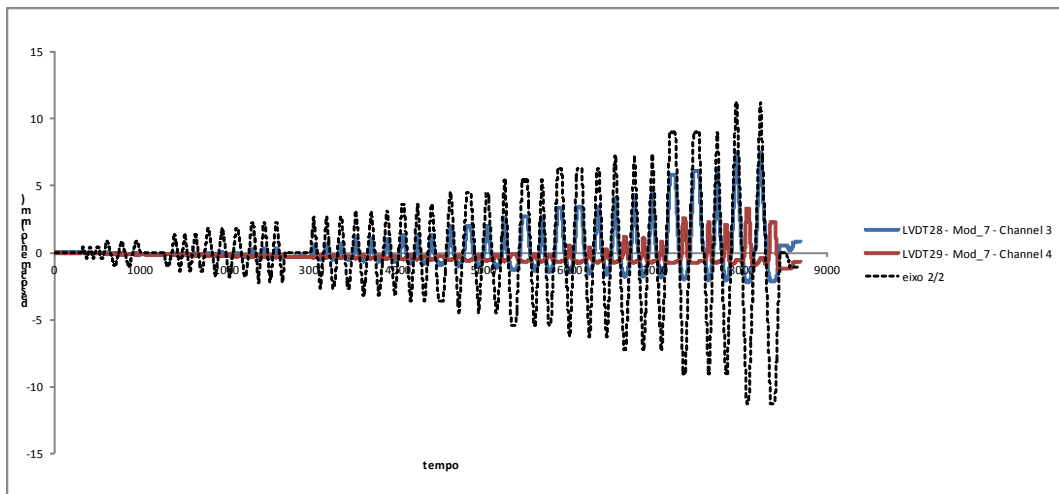
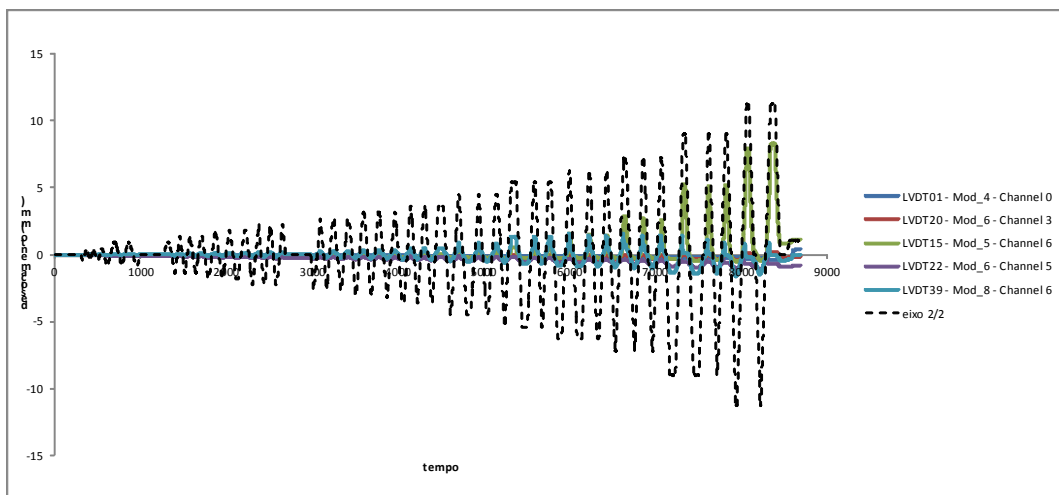
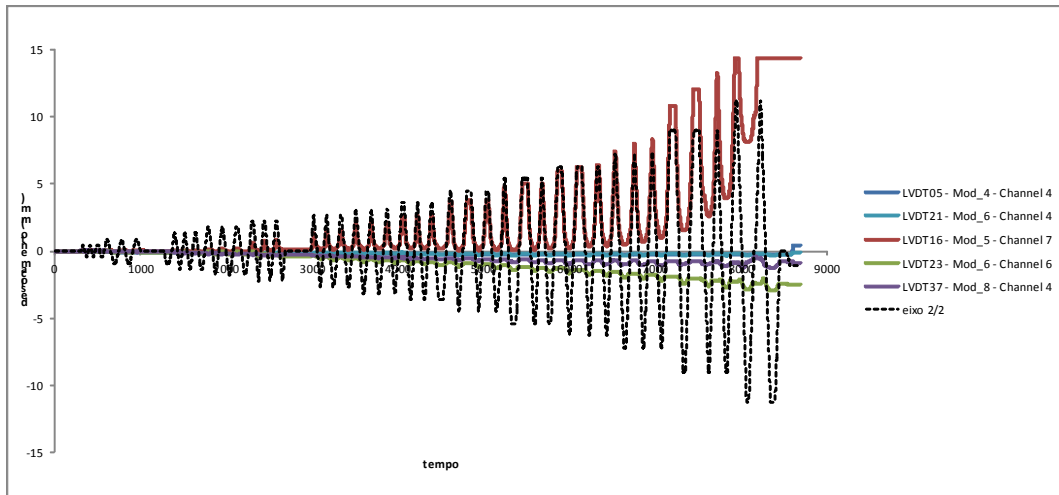


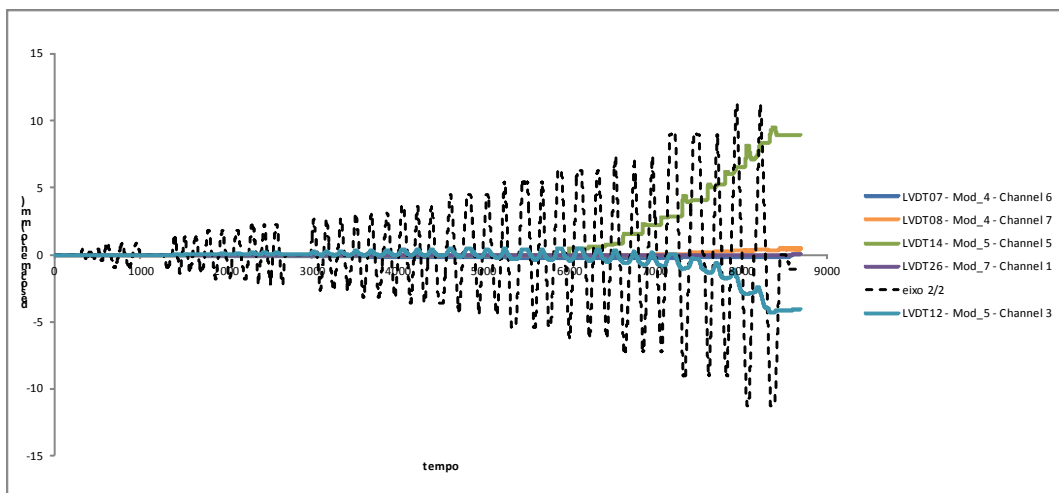
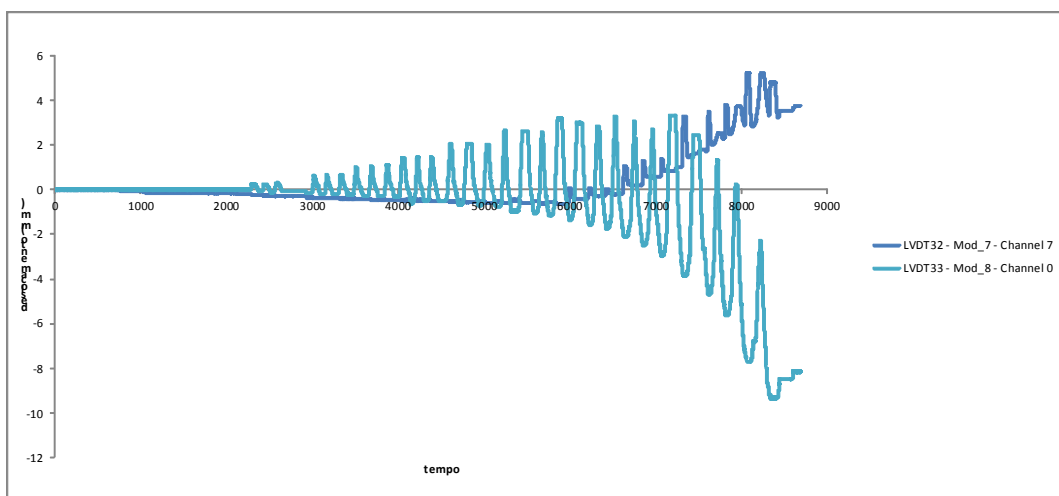
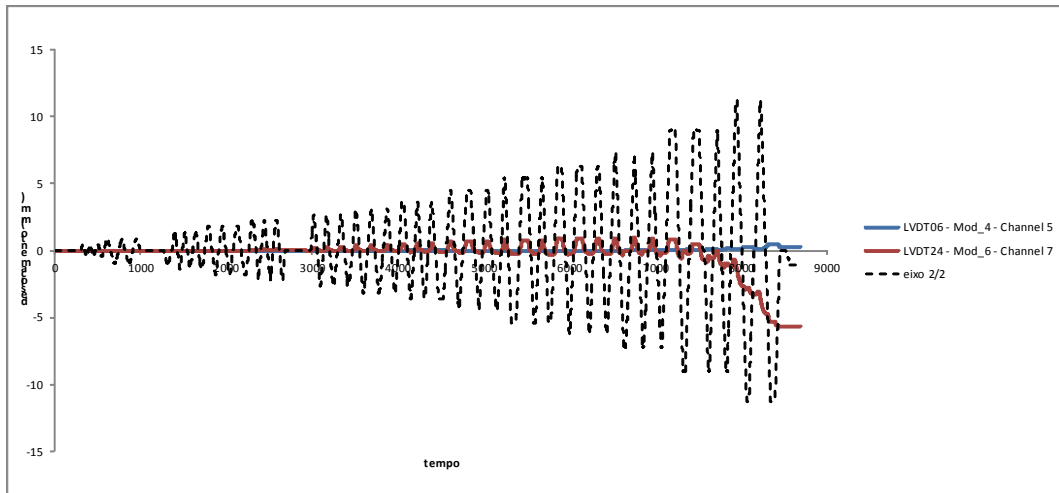


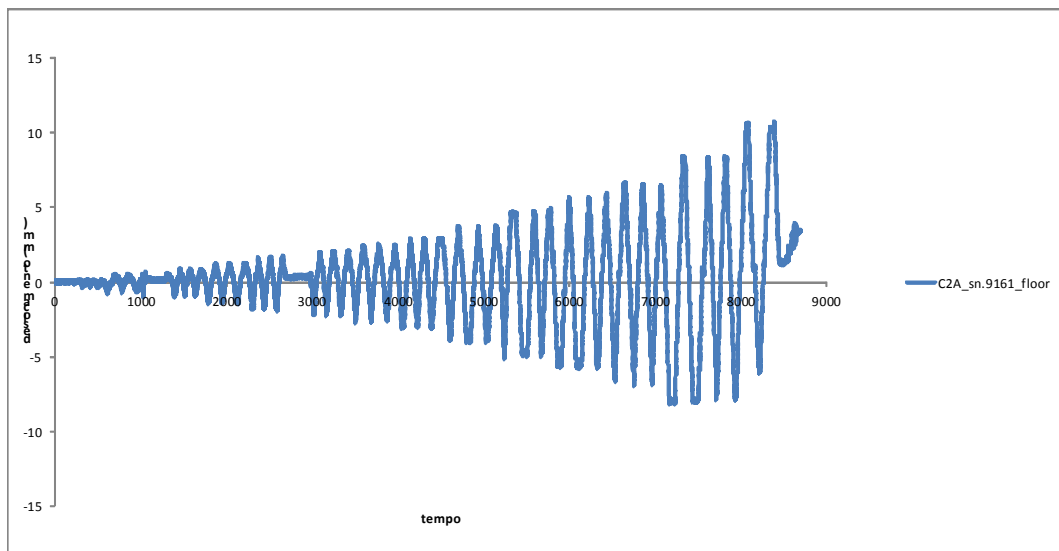
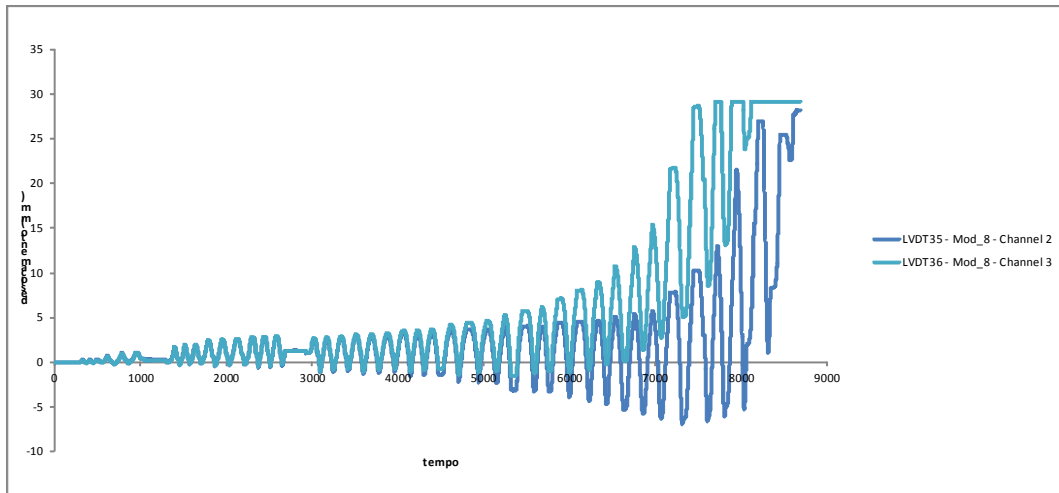


Ensaio R5

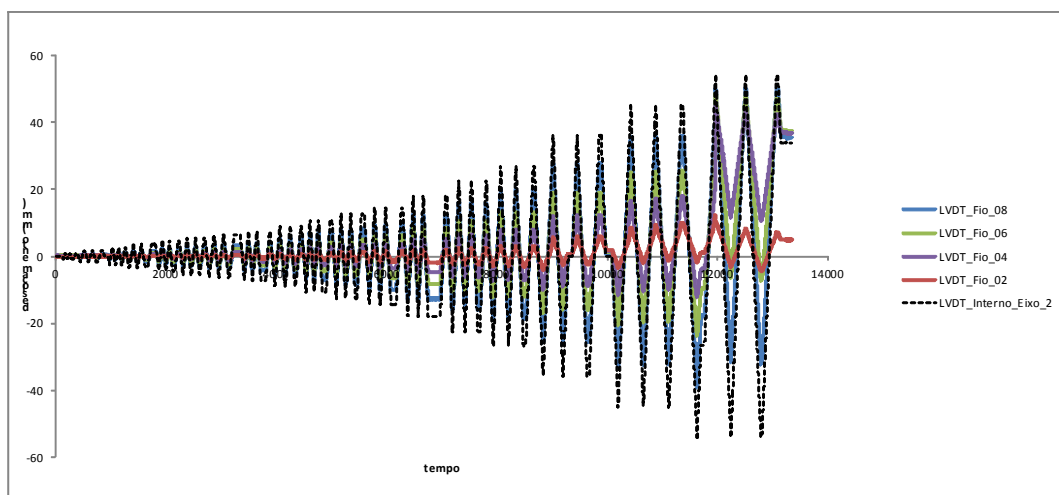
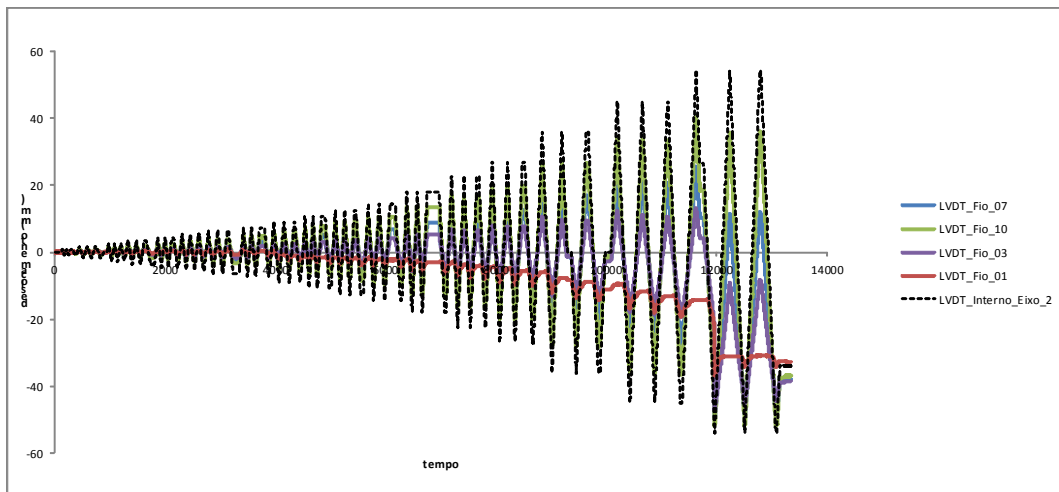
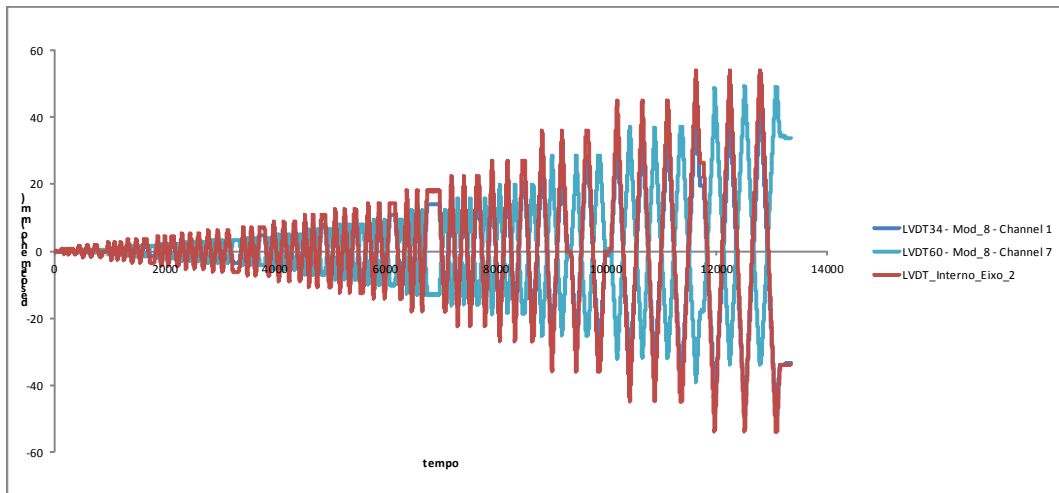


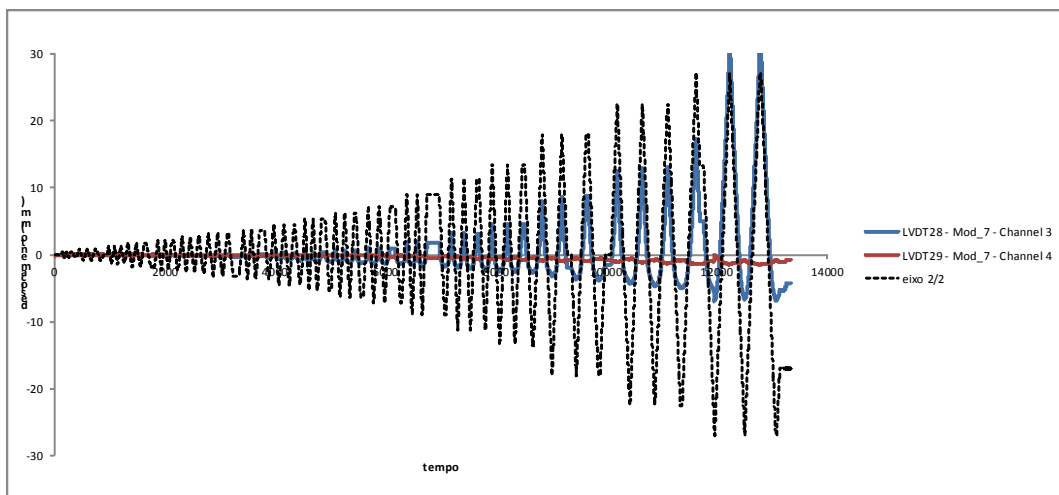
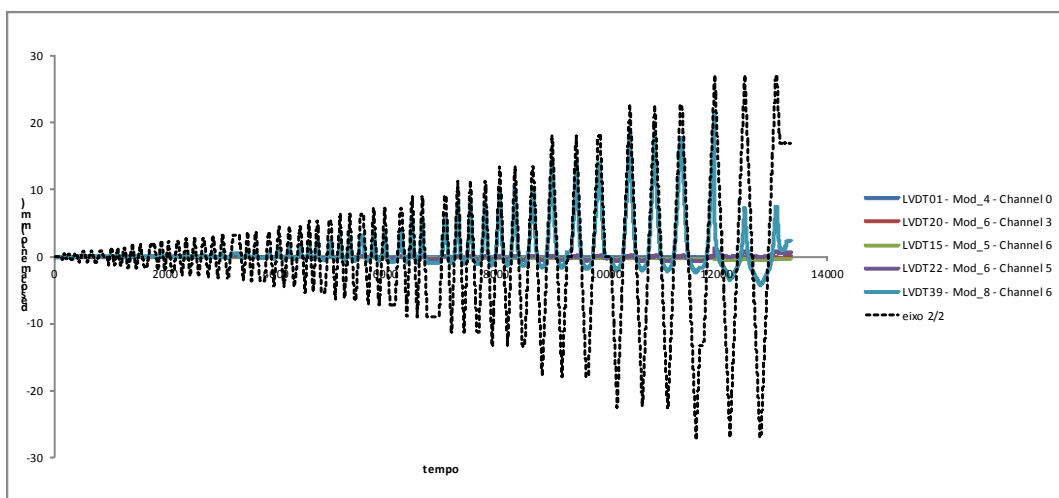
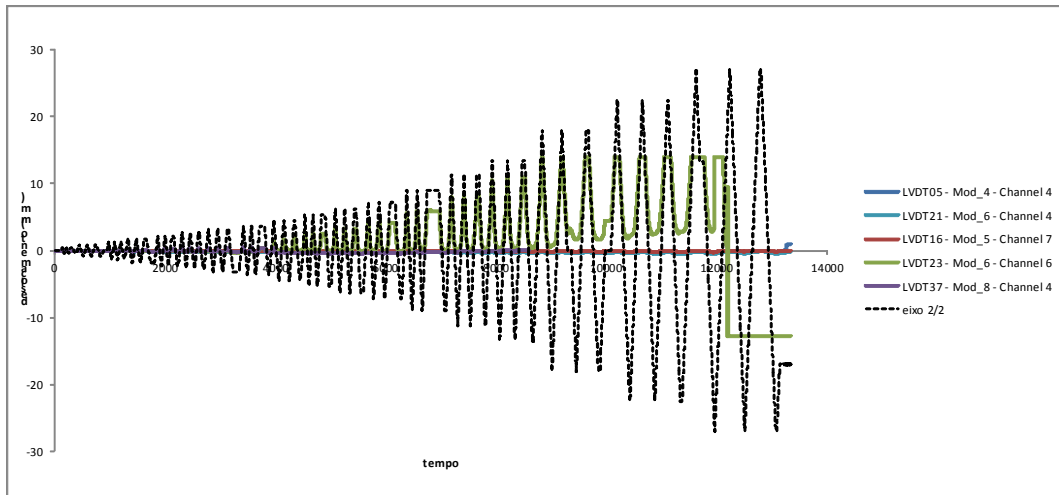


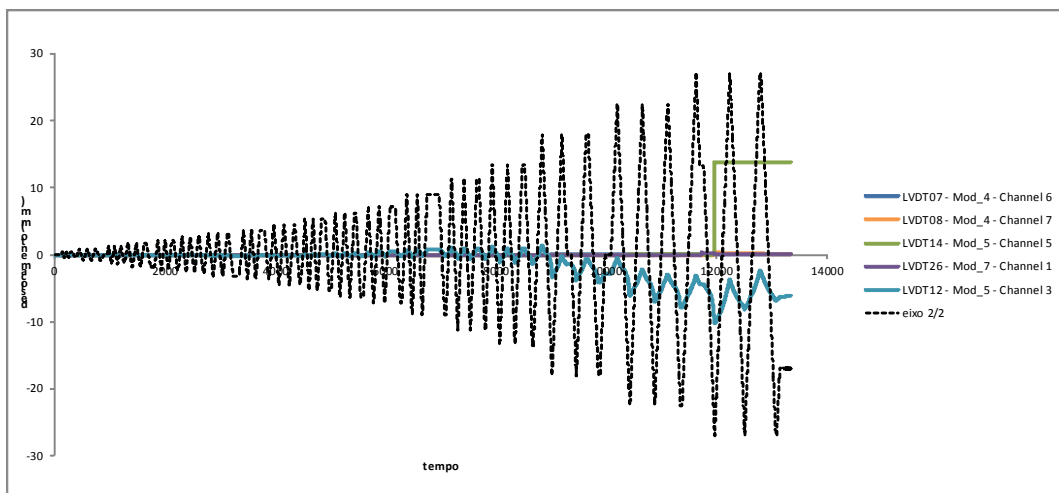
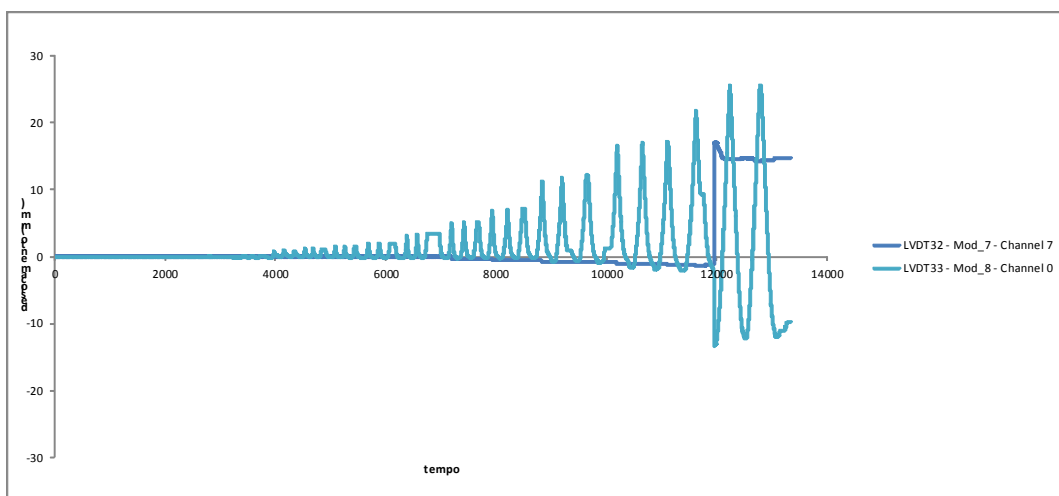
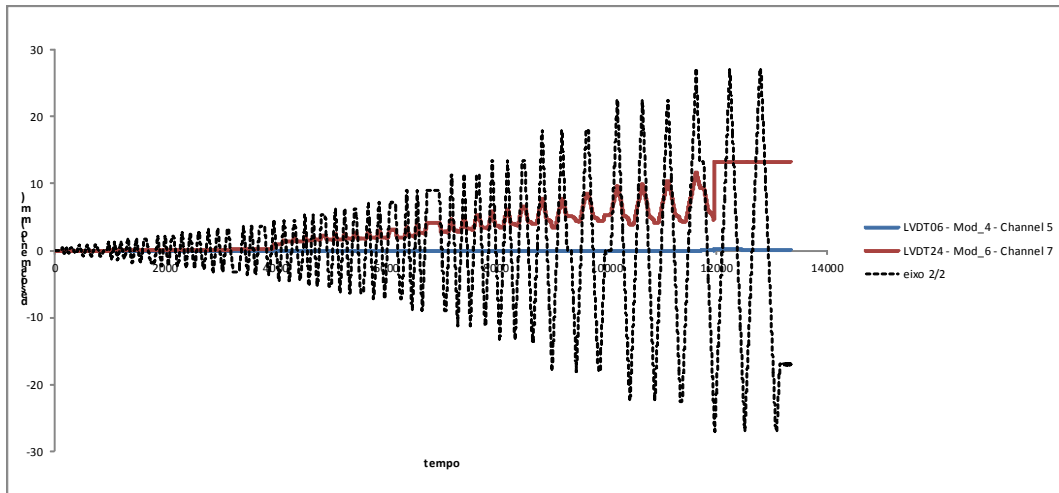


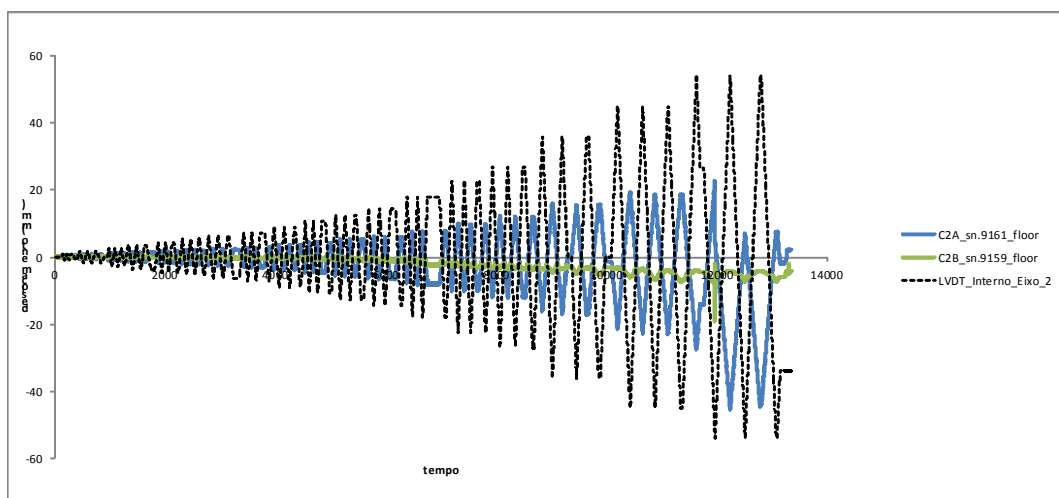
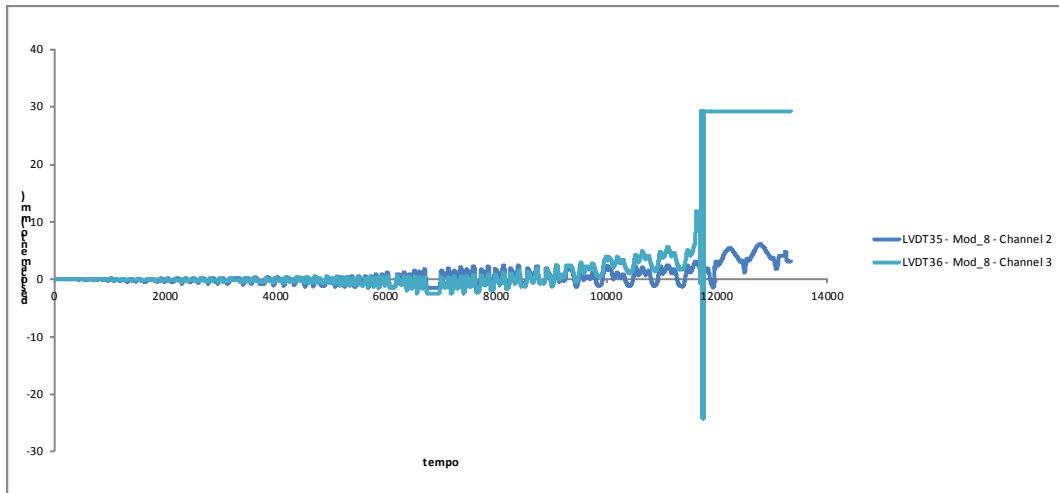


Ensaio R6

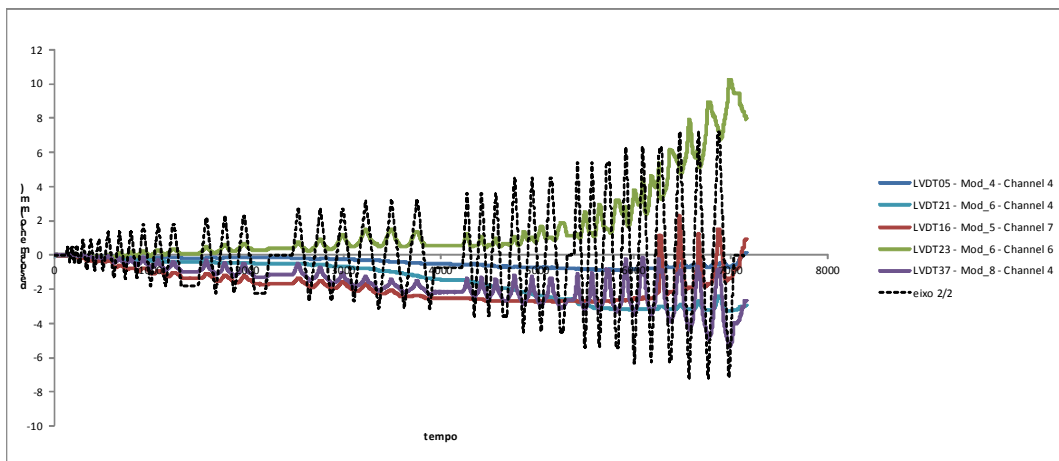
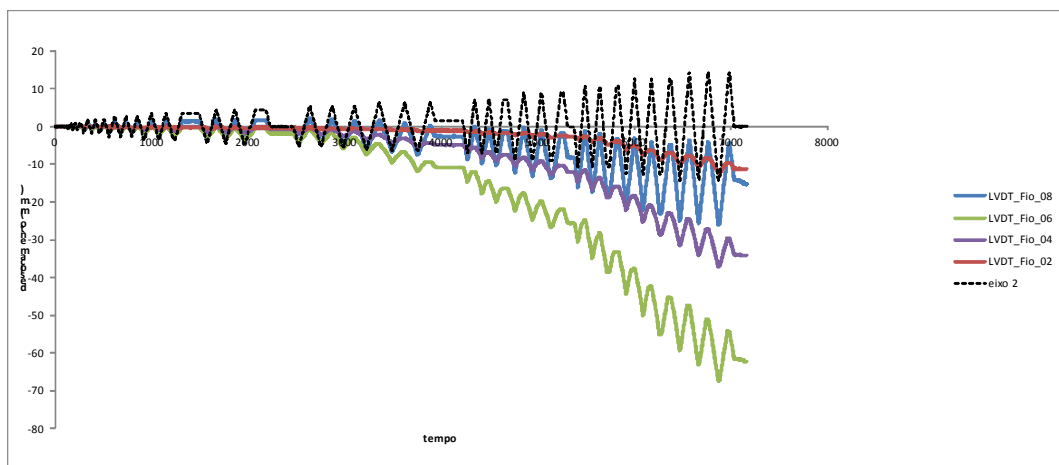
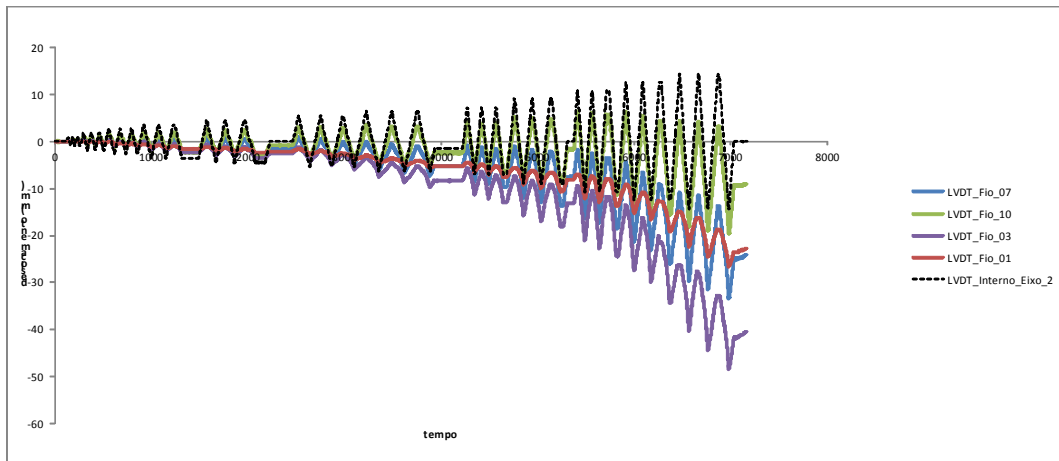


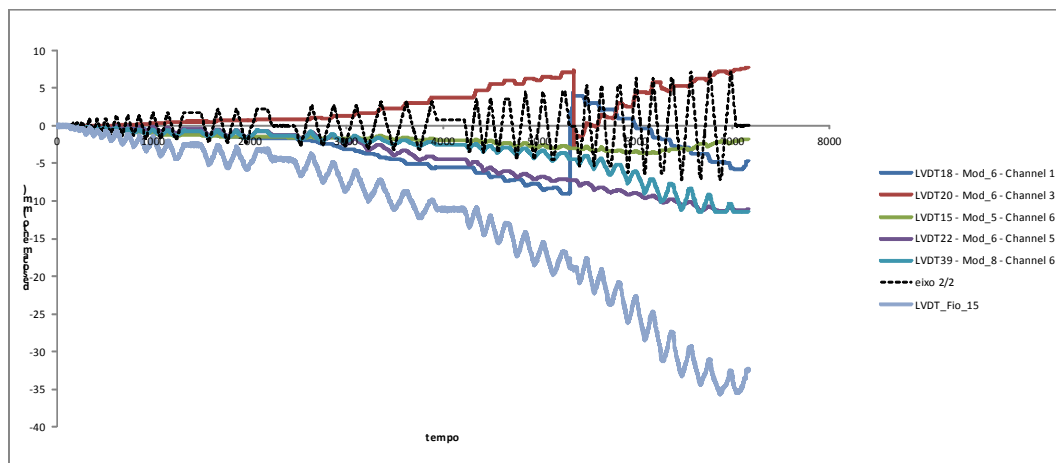
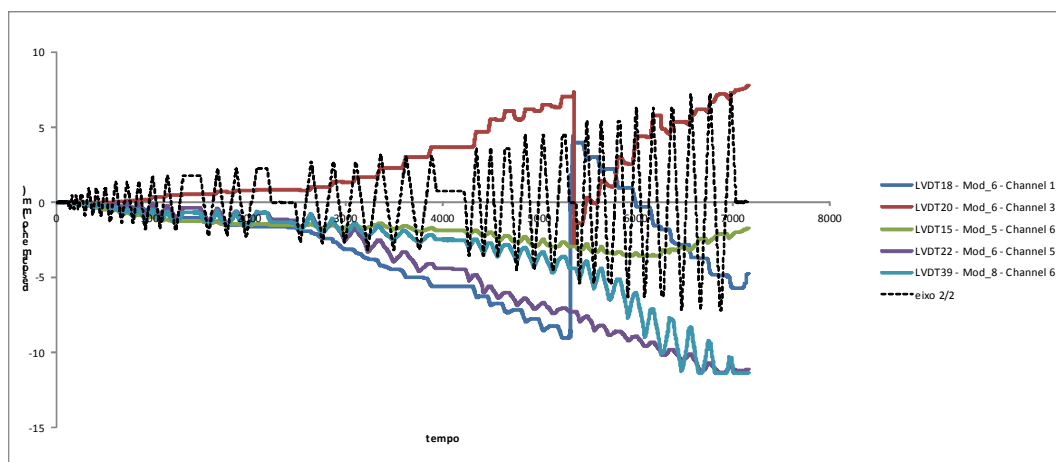
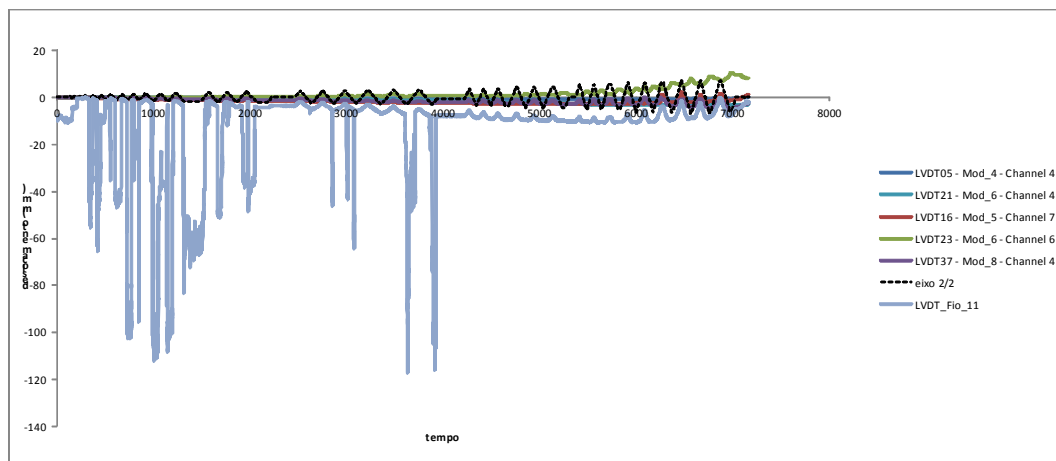


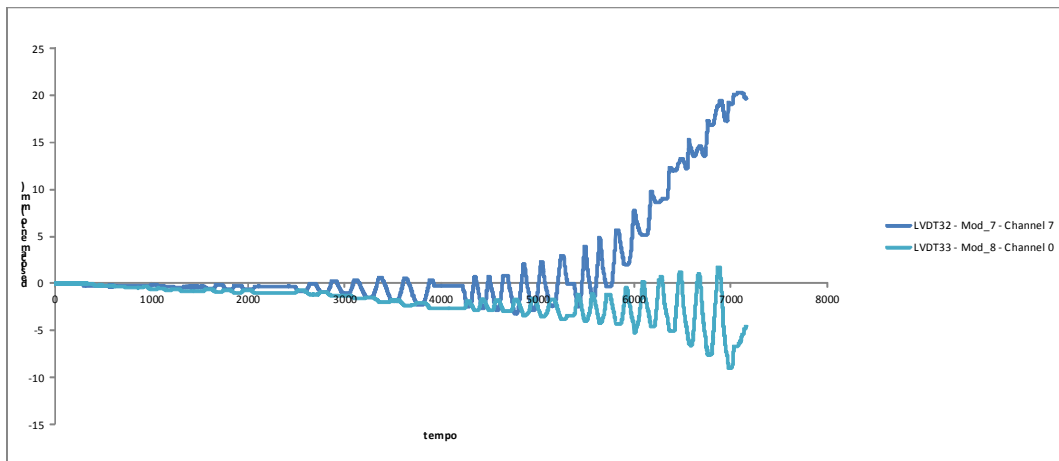
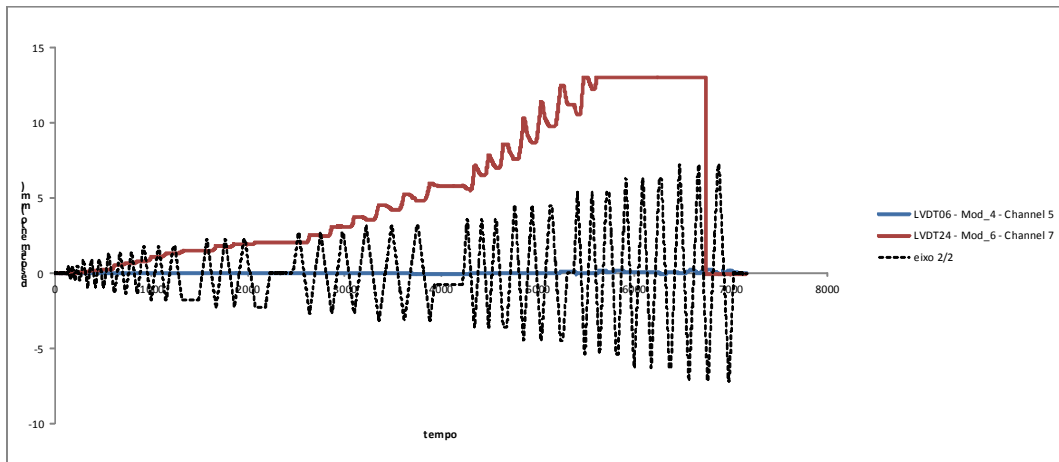
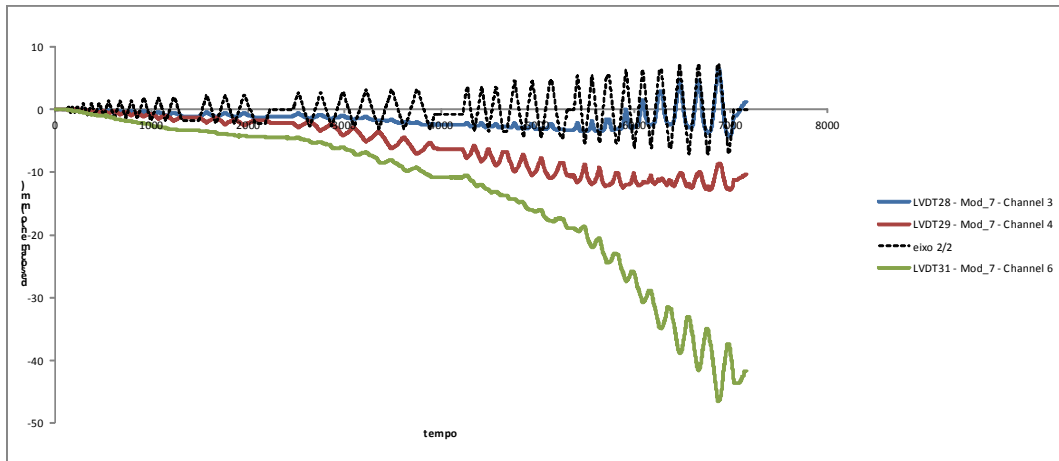


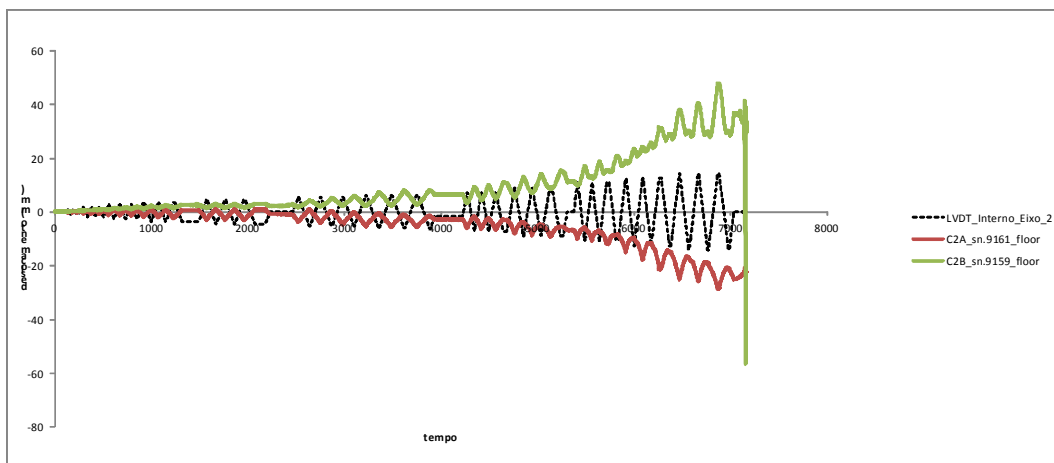
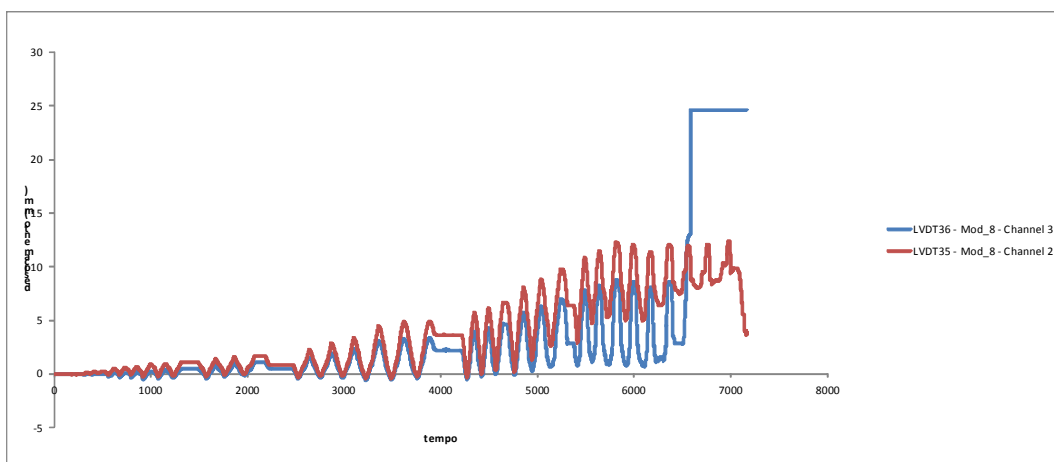
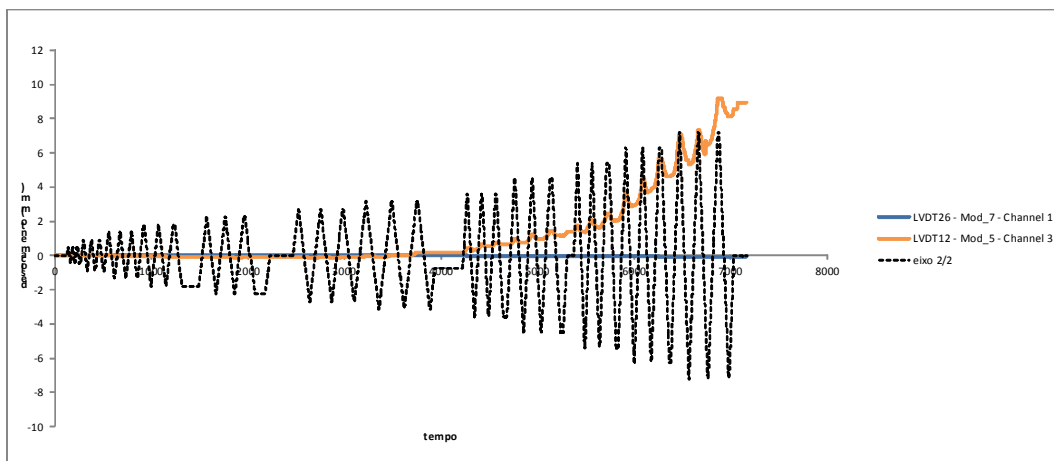


Ensaio PR4

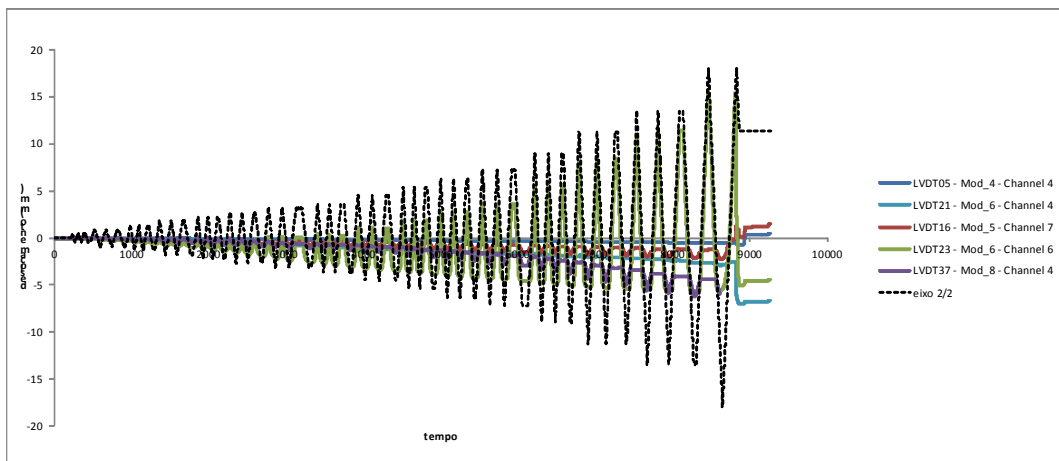
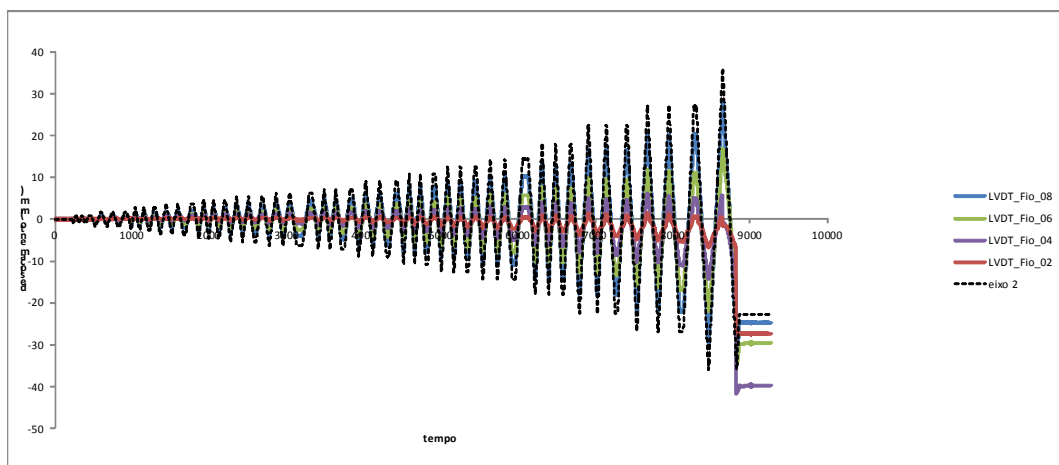
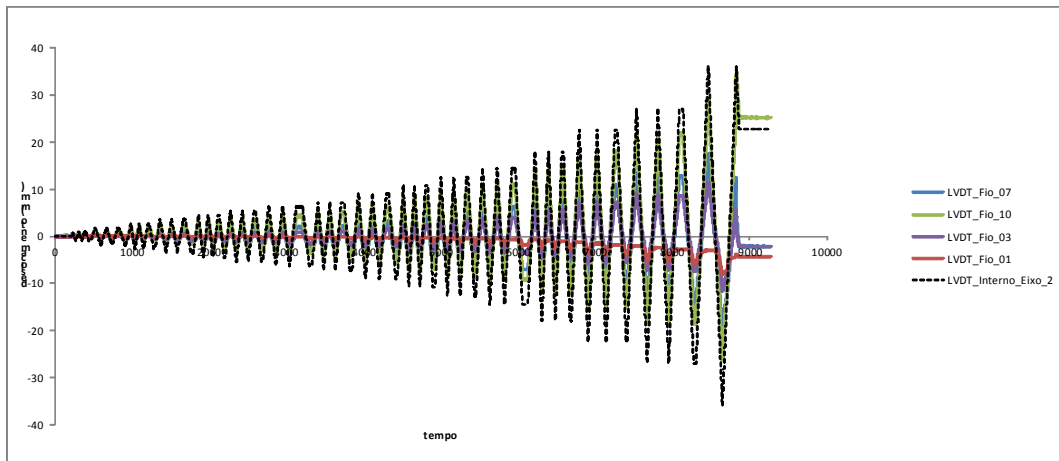


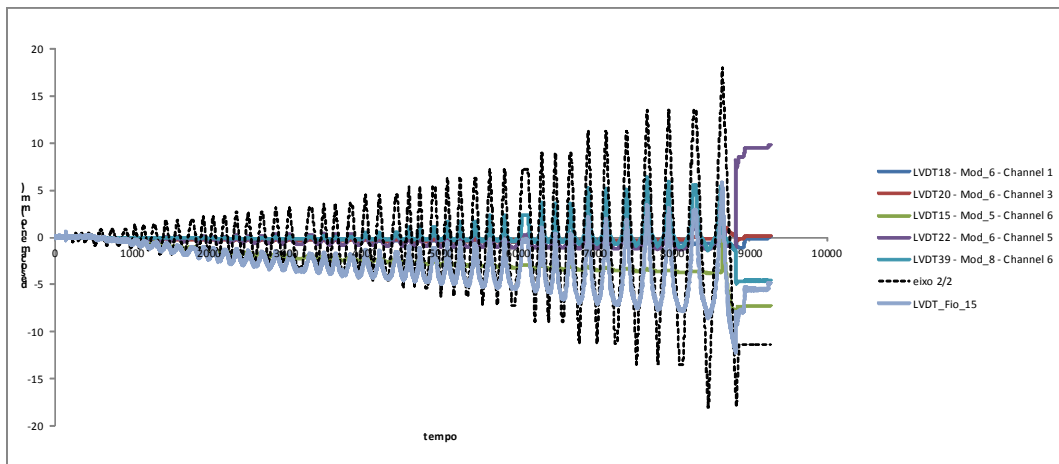
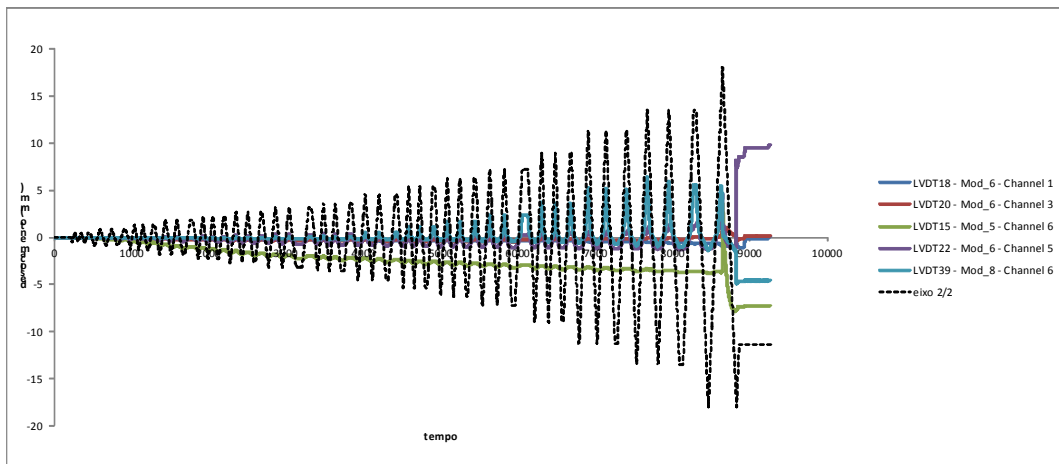
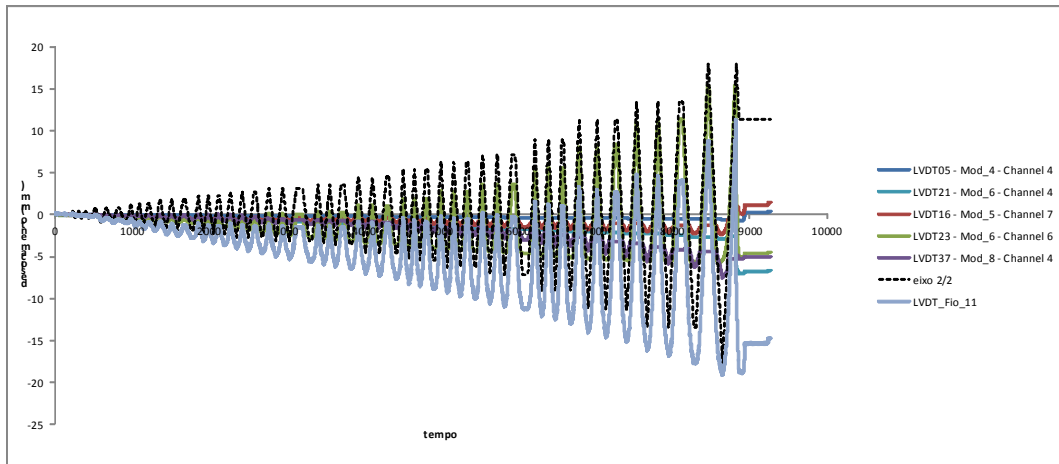


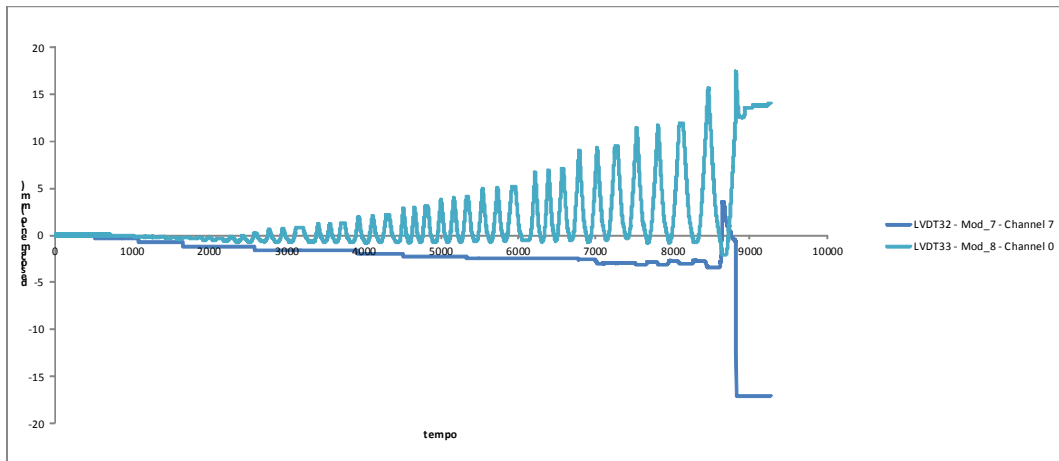
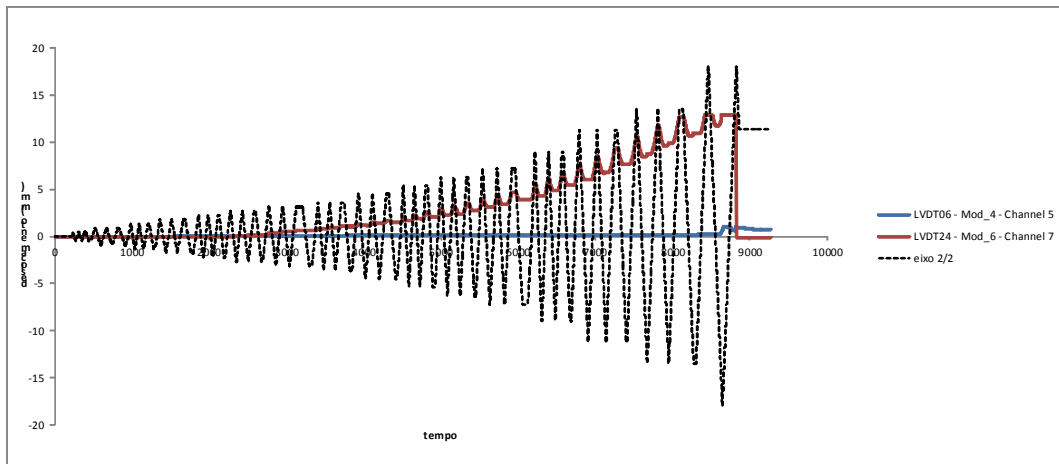
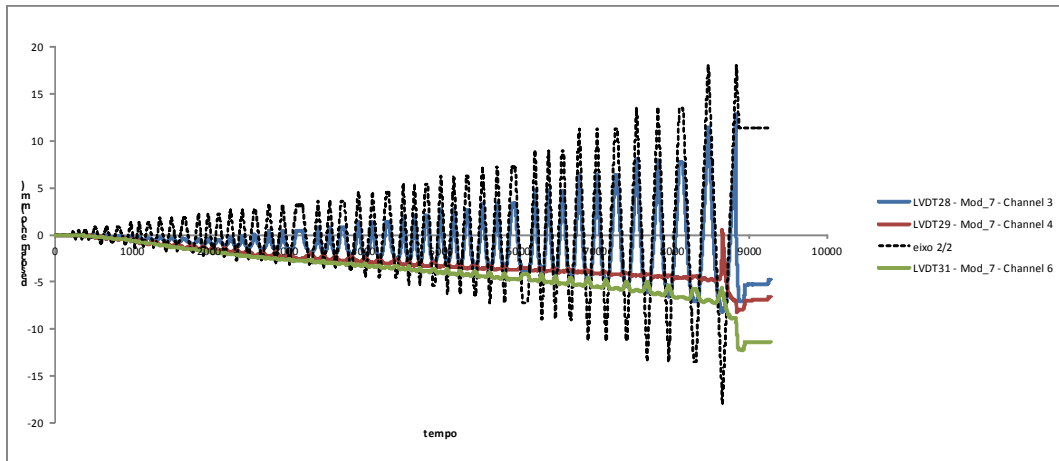


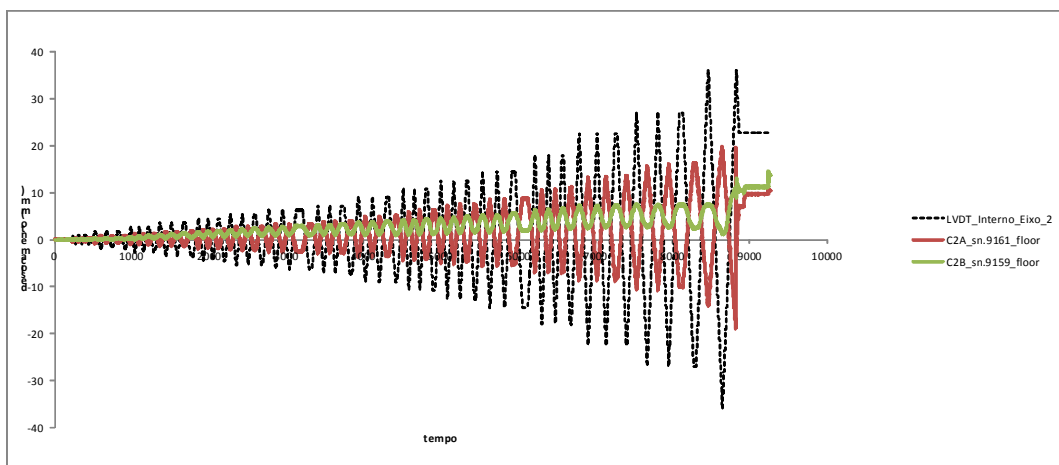
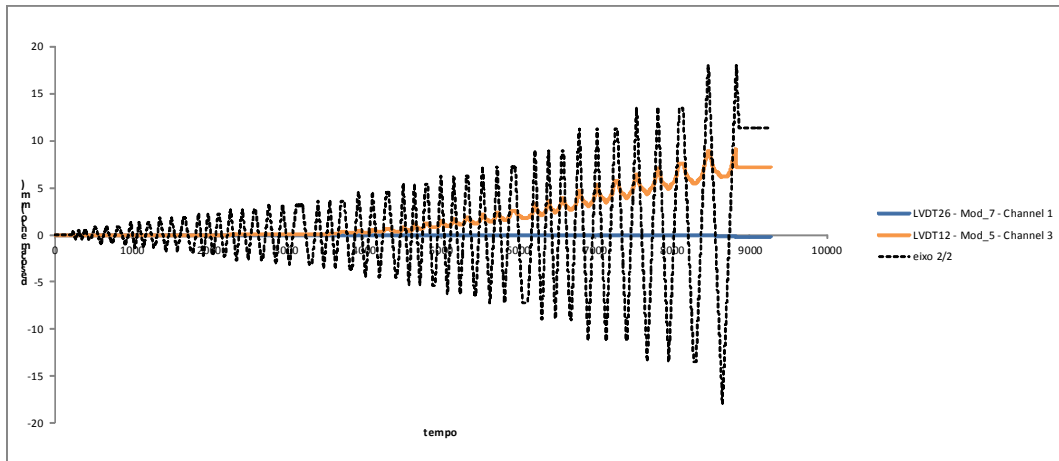


Ensaio PR5

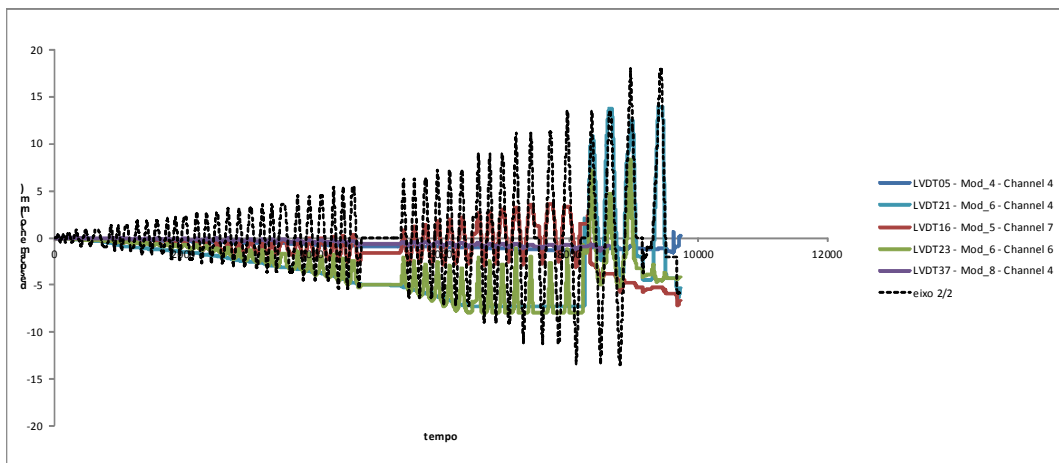
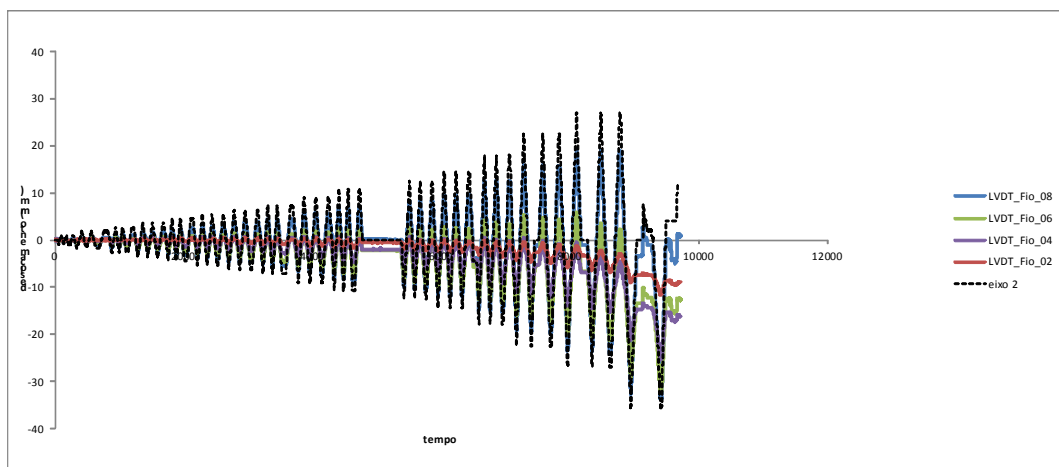
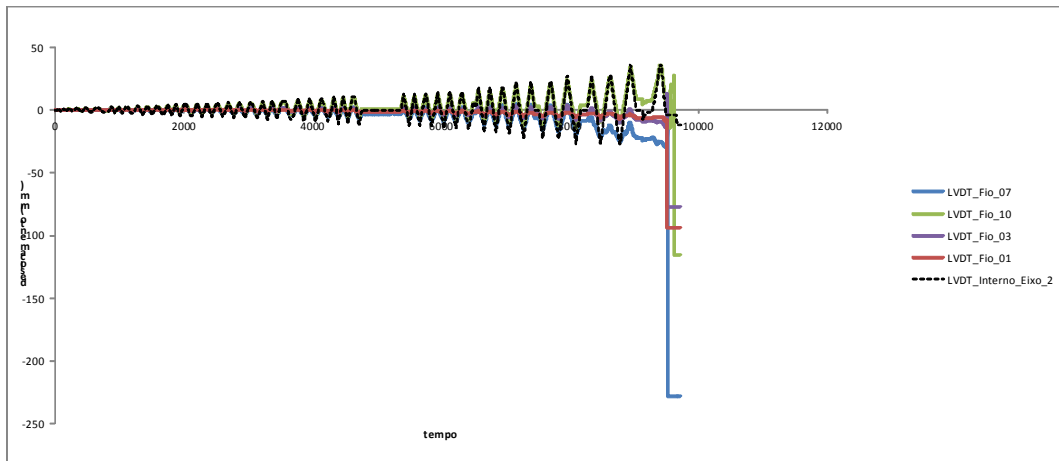


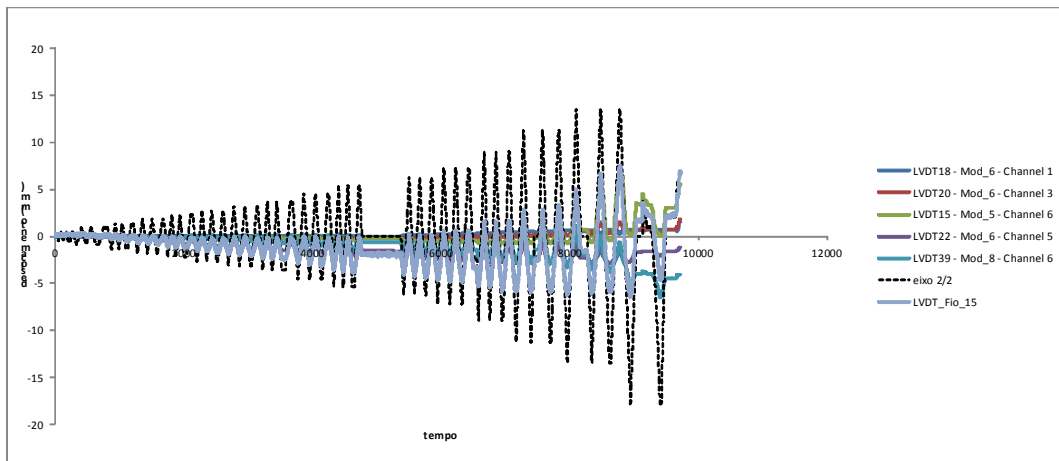
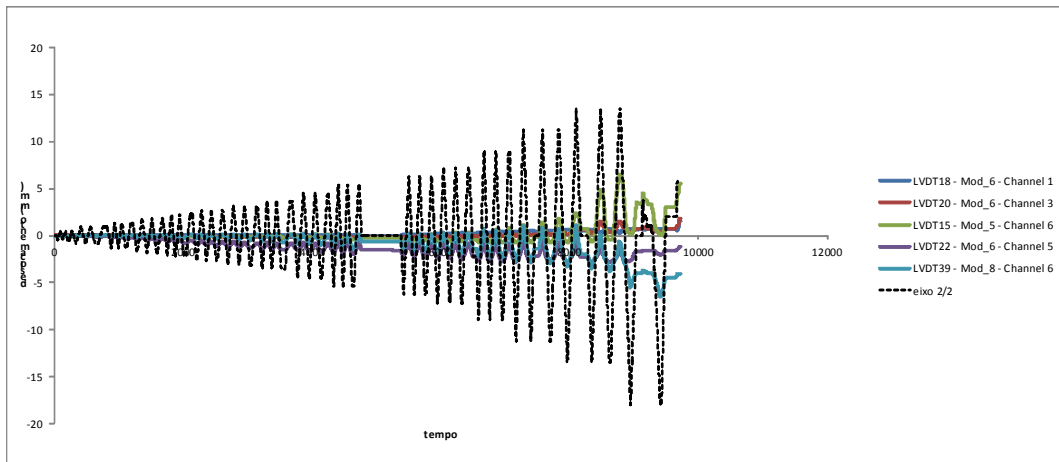
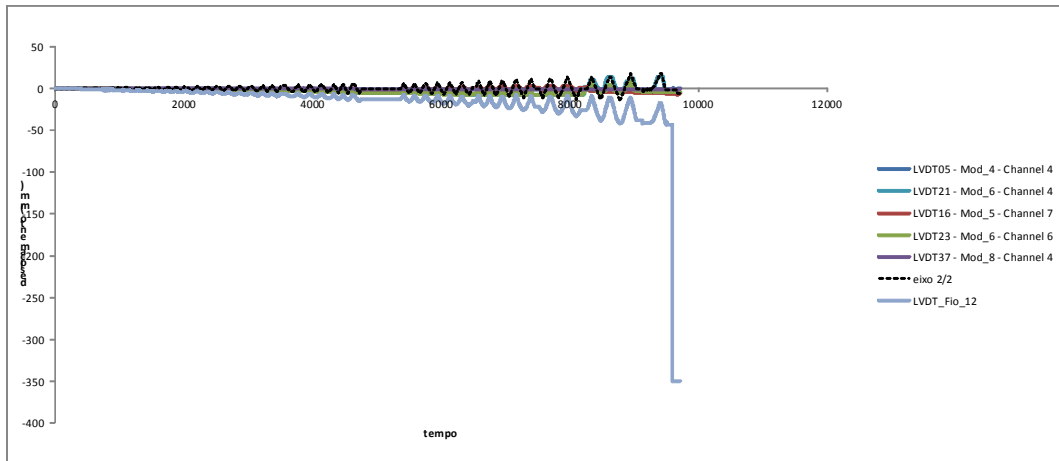


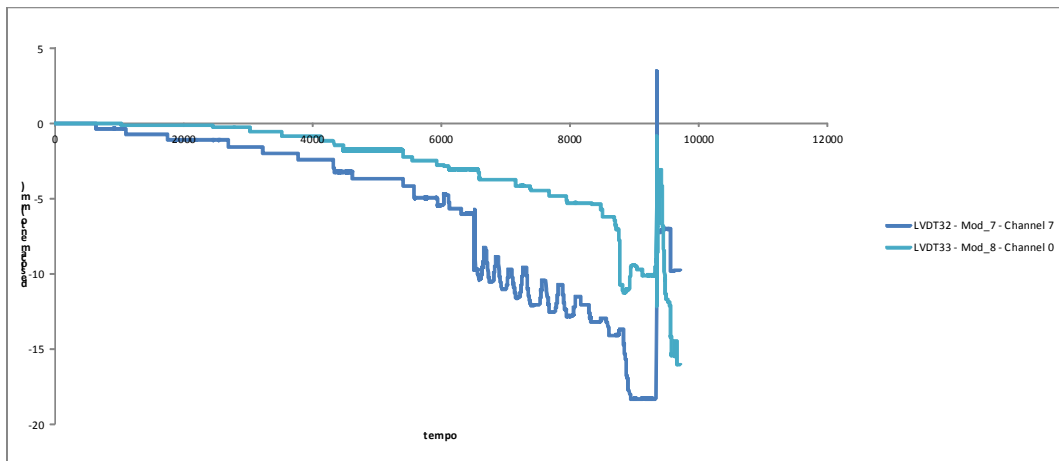
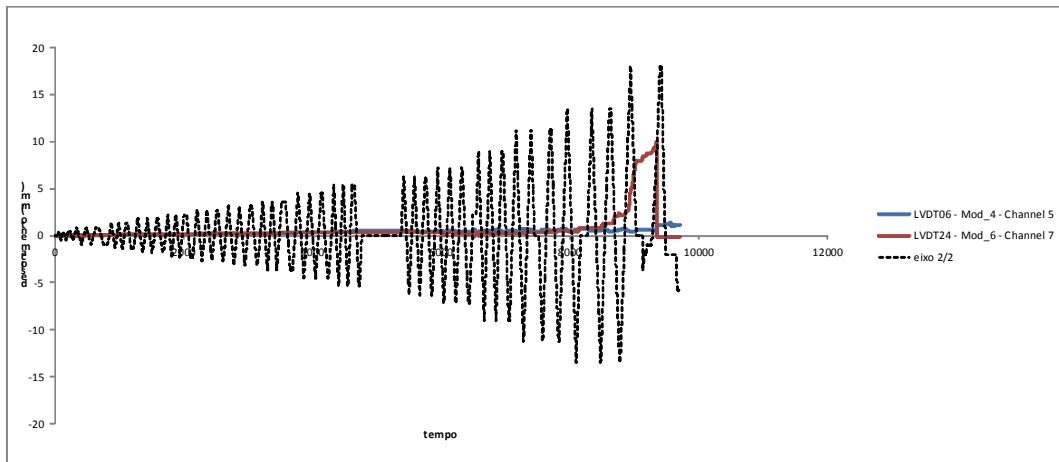
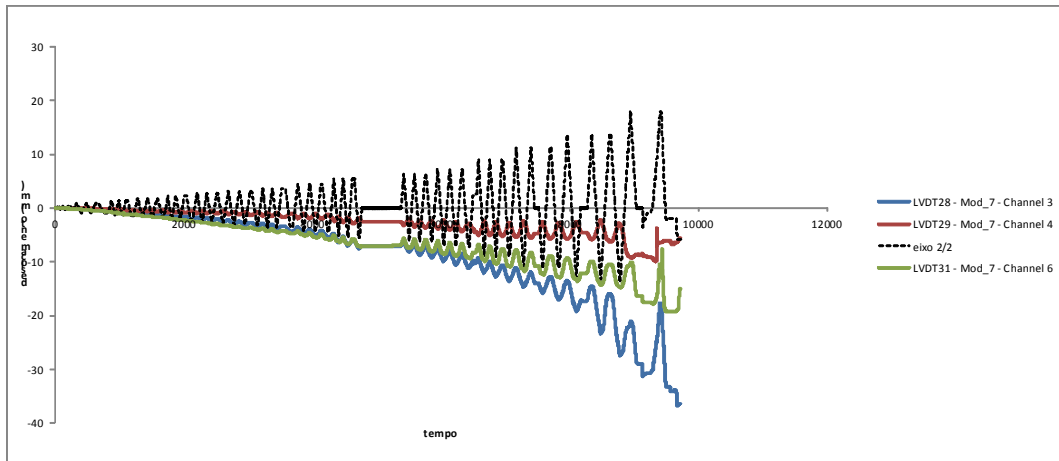


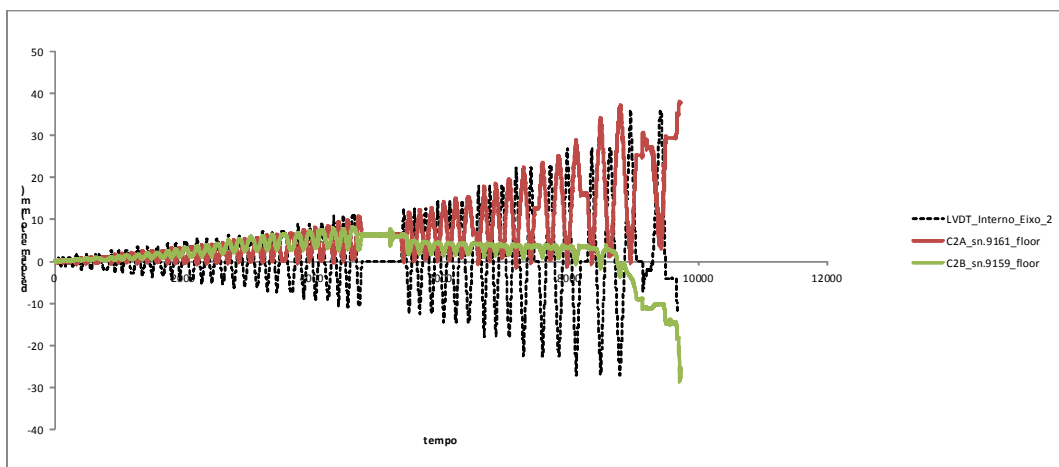
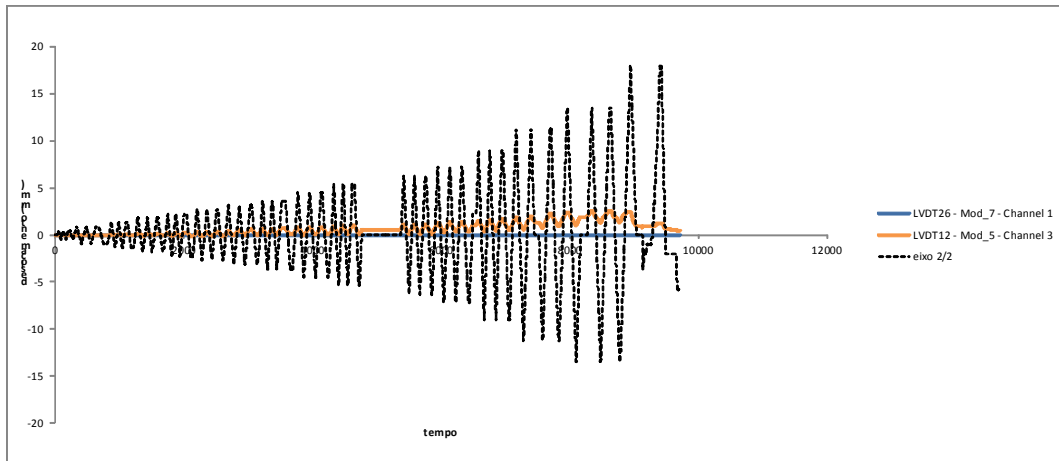


Ensaio PR6

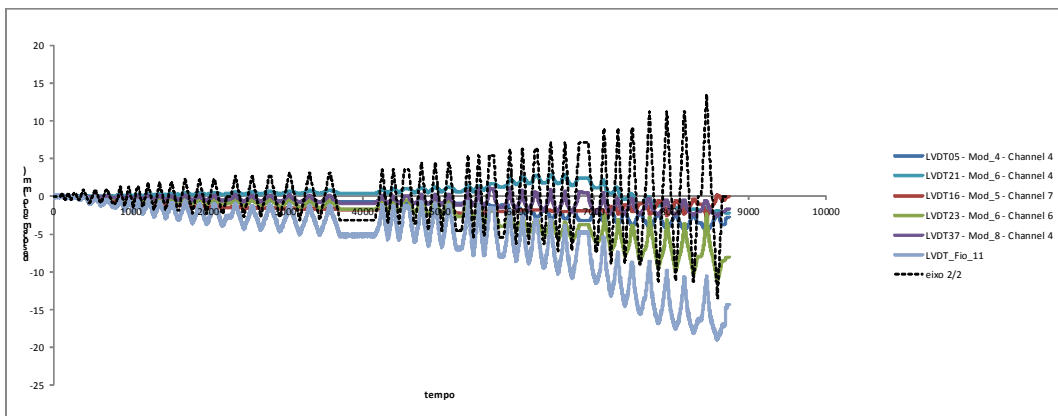
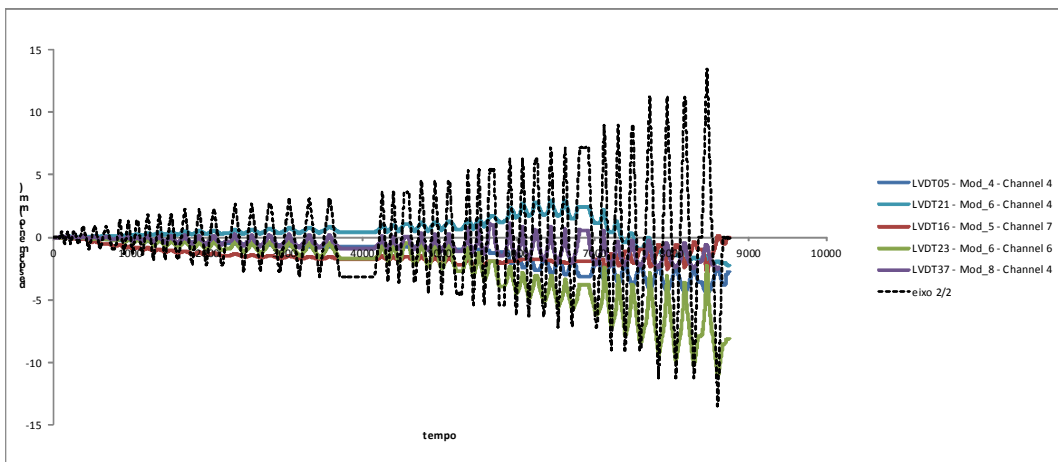
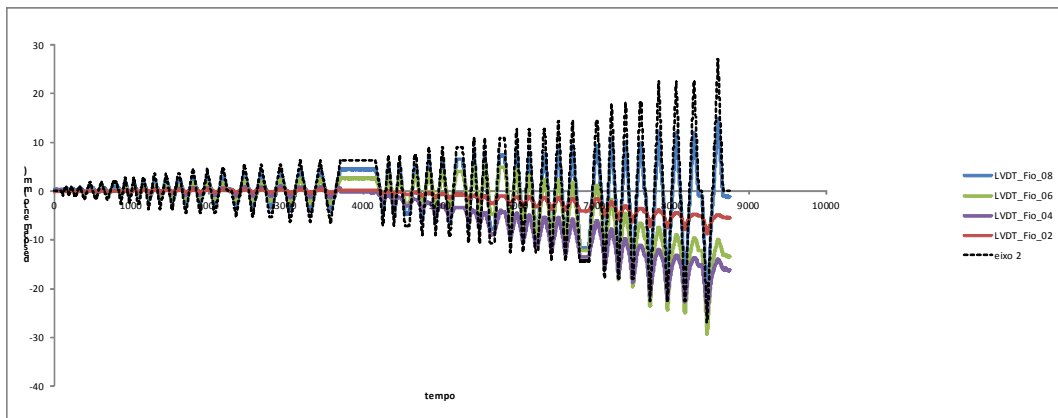
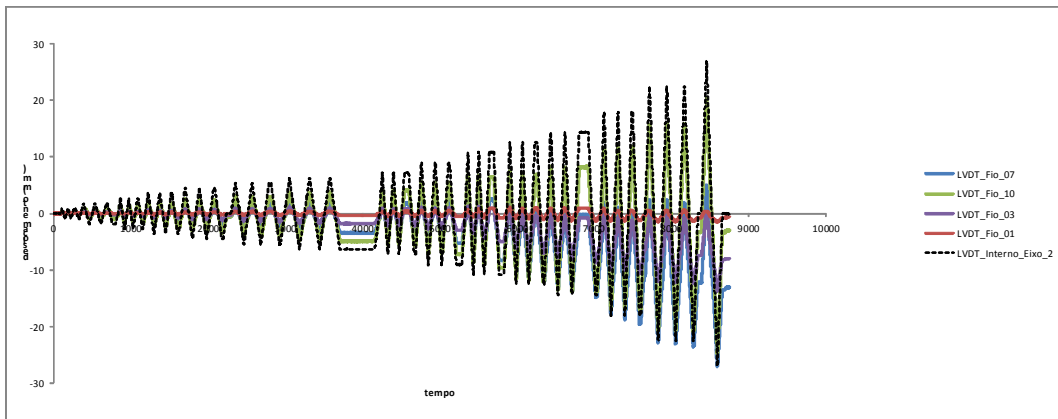


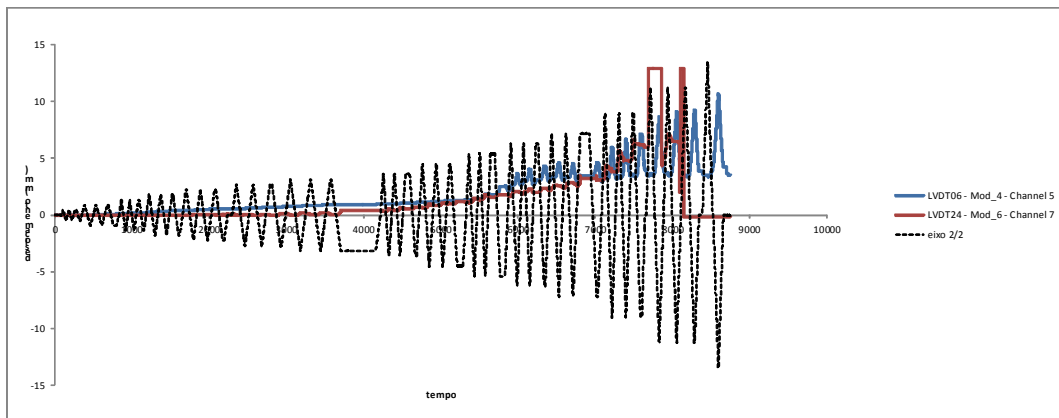
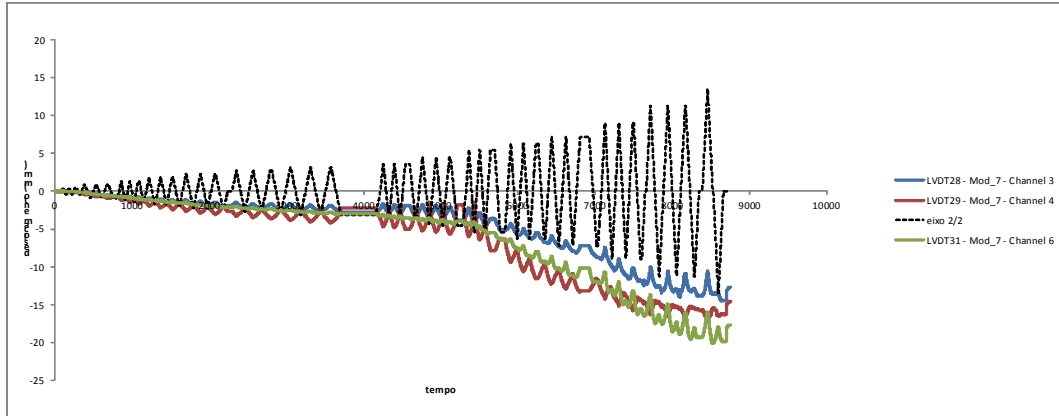
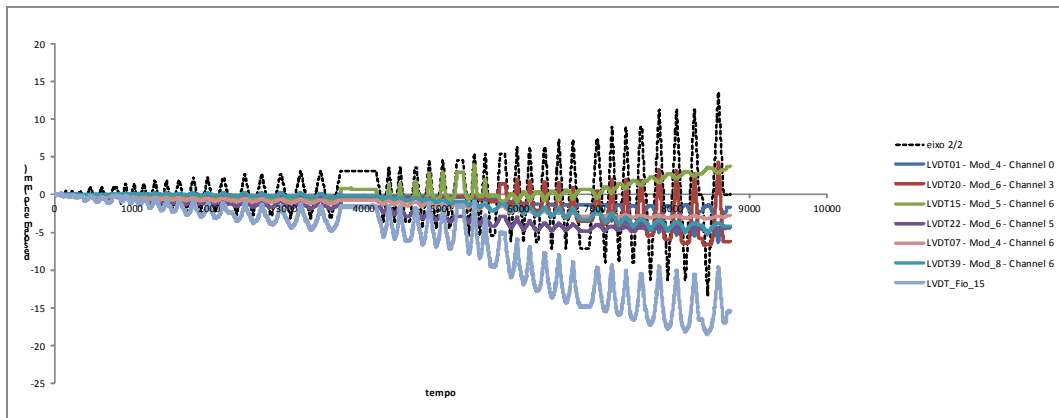
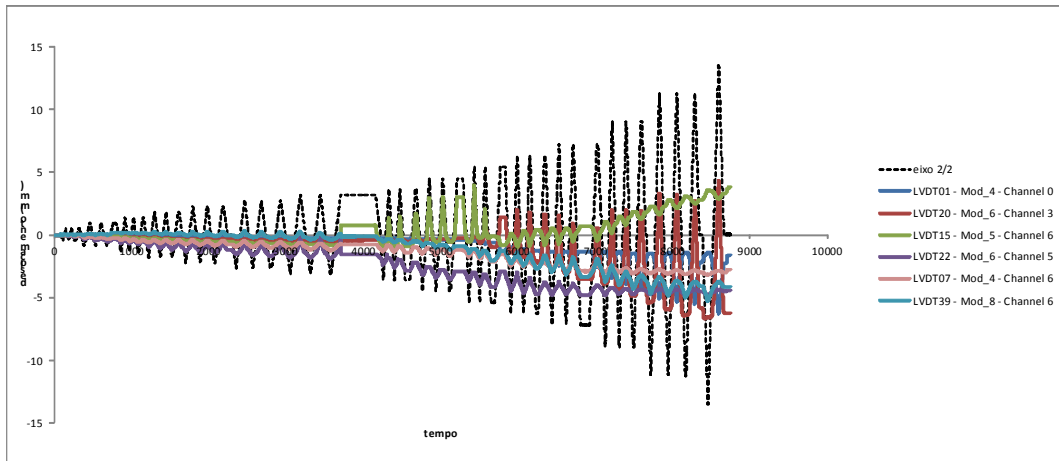


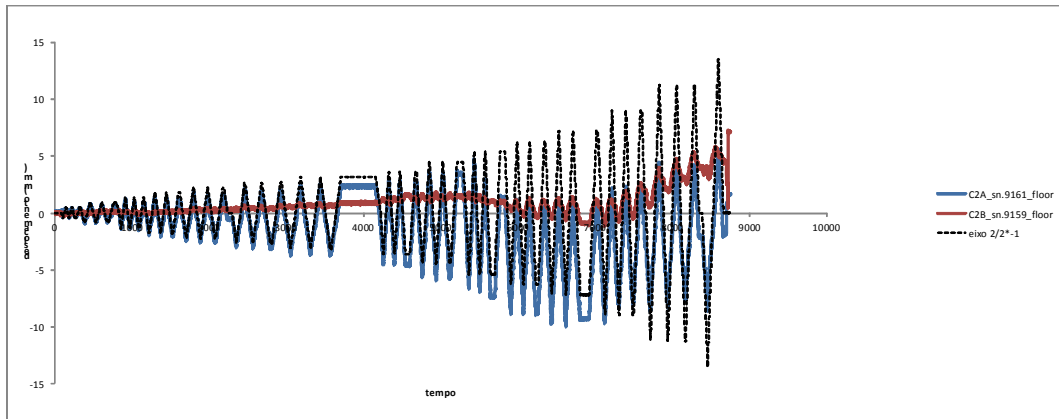
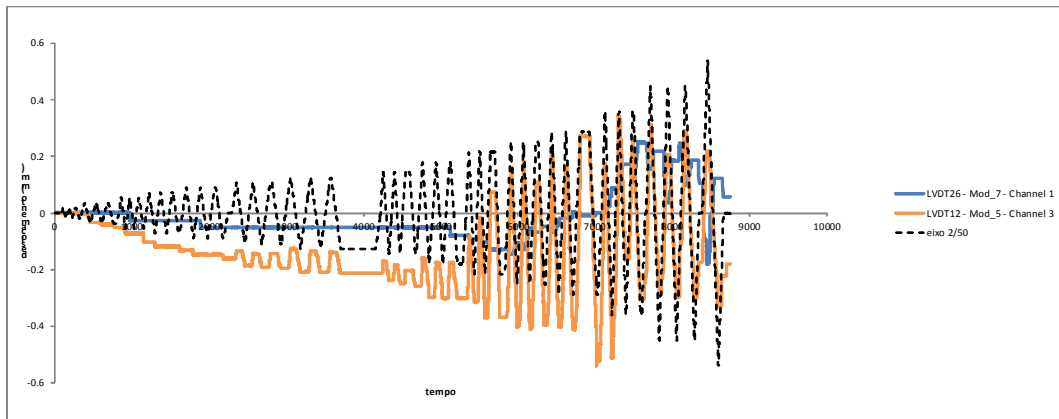
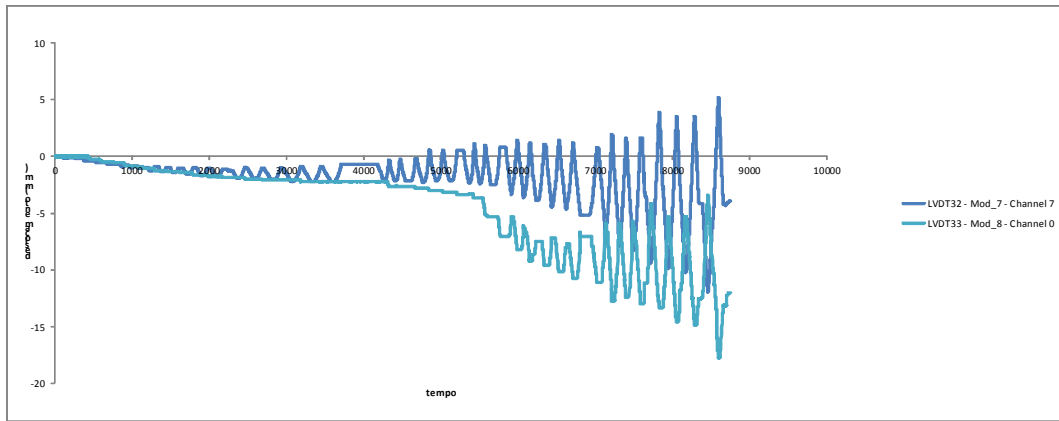




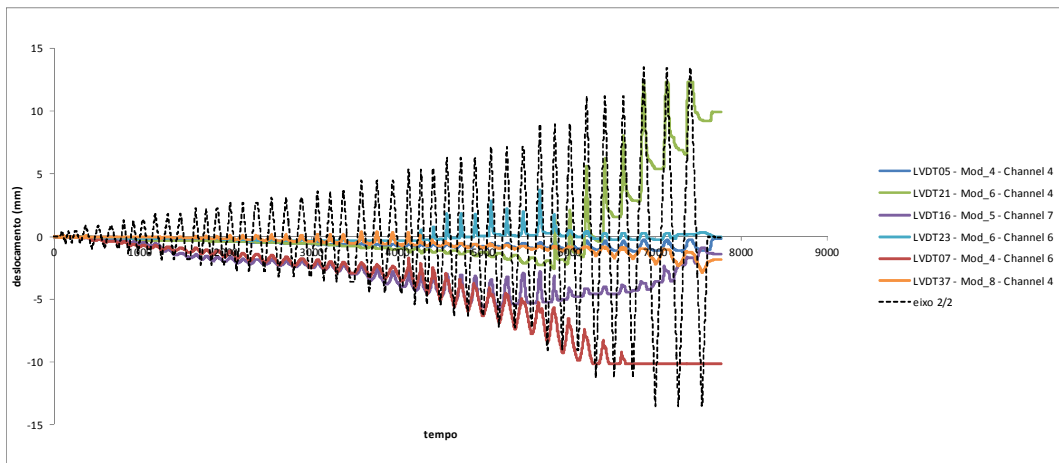
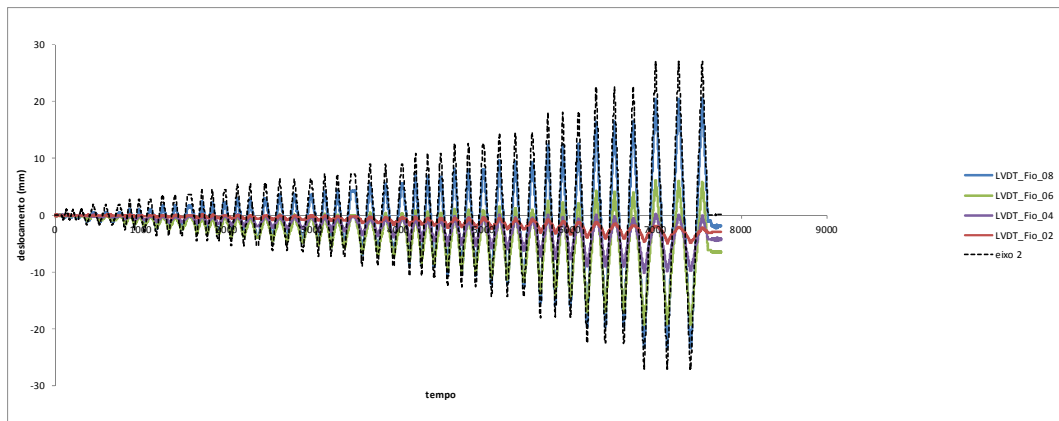
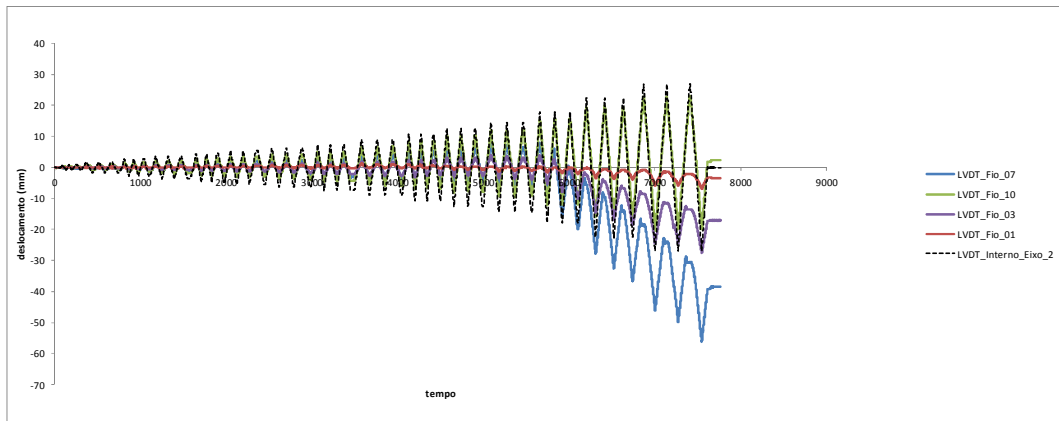
Ensaio IR4

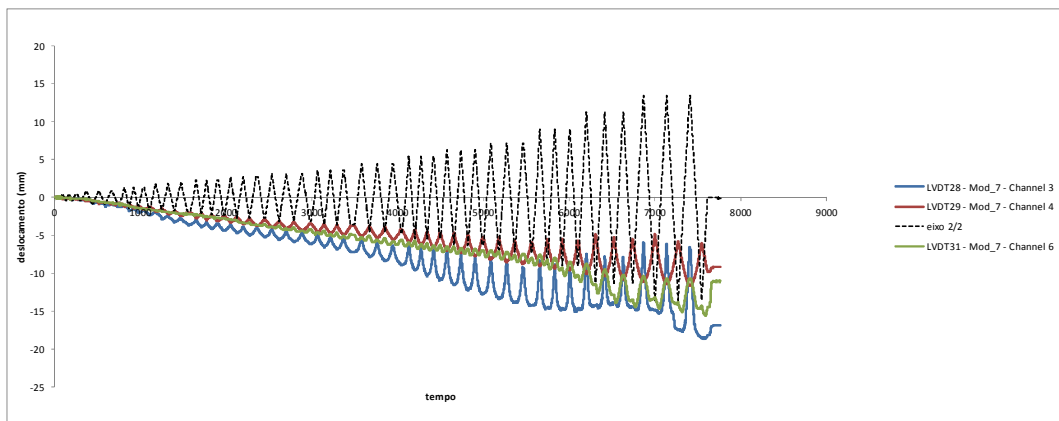
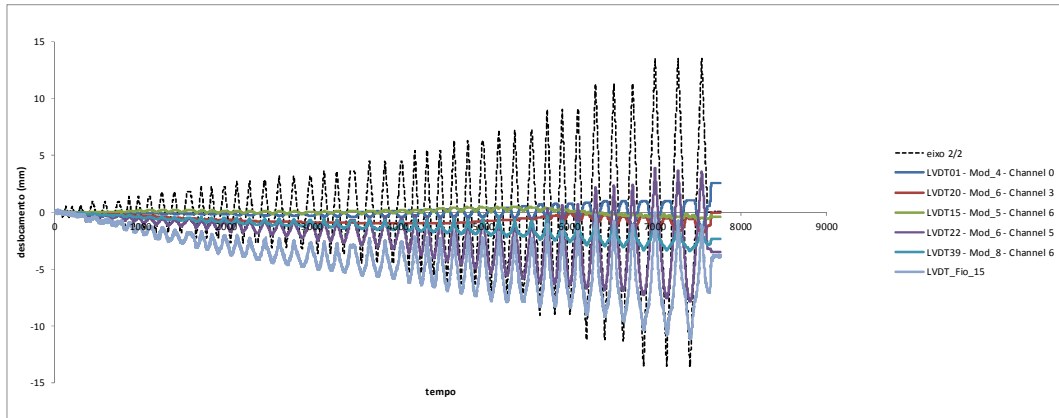
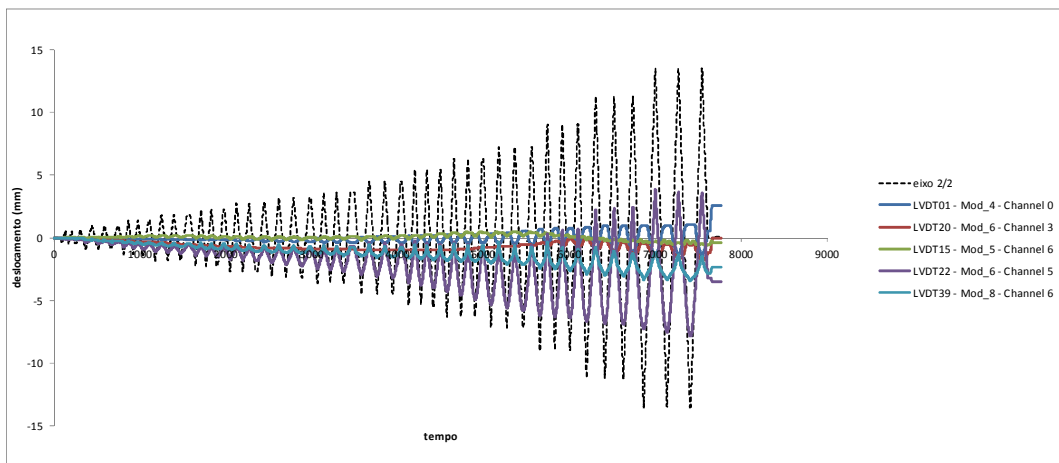
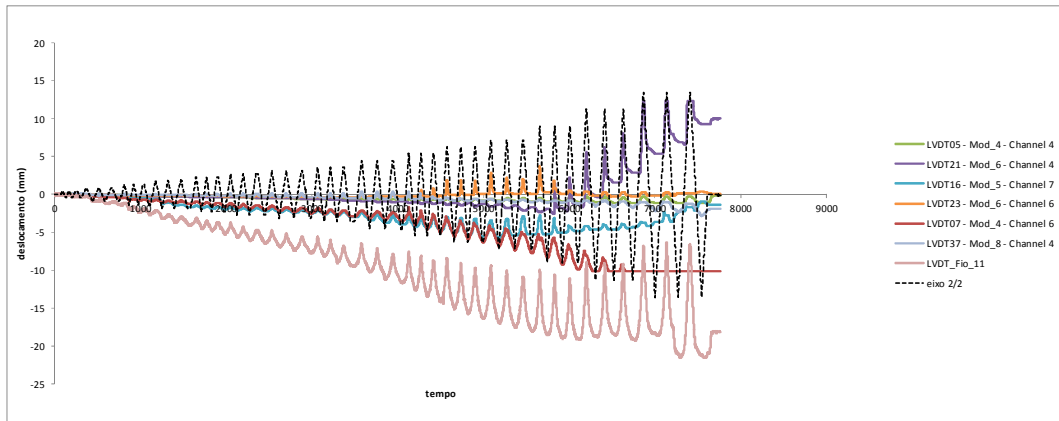


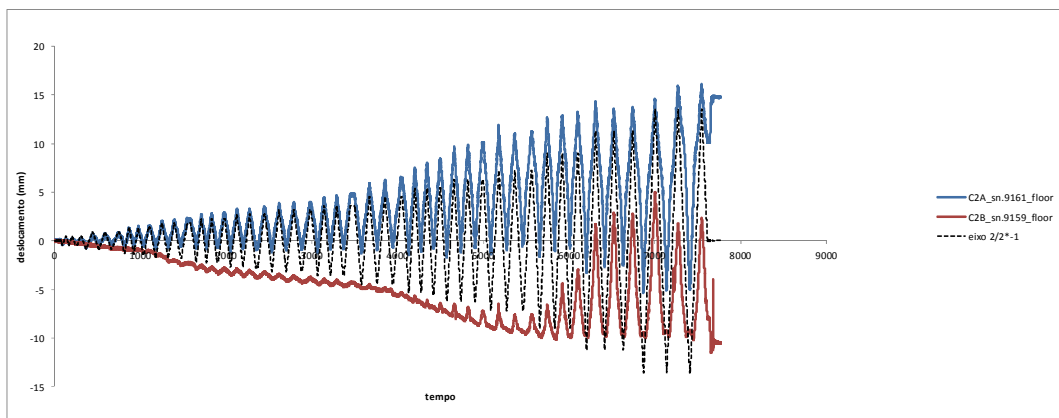
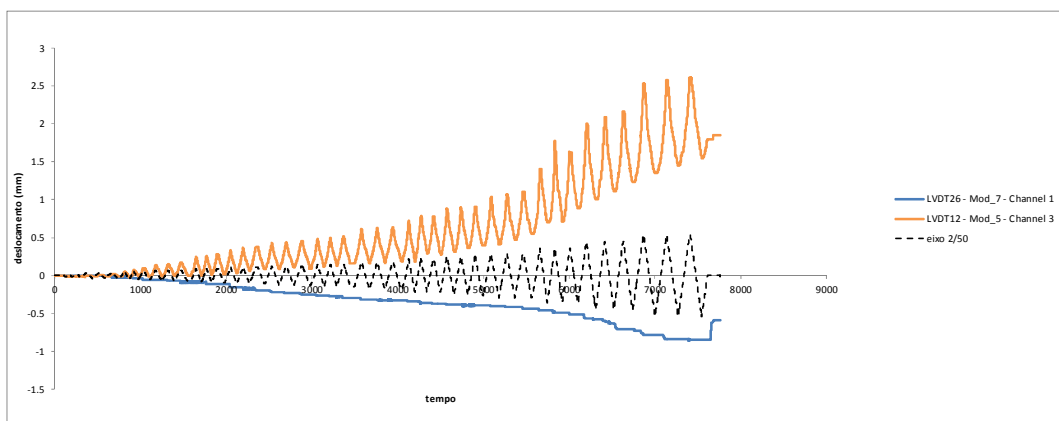
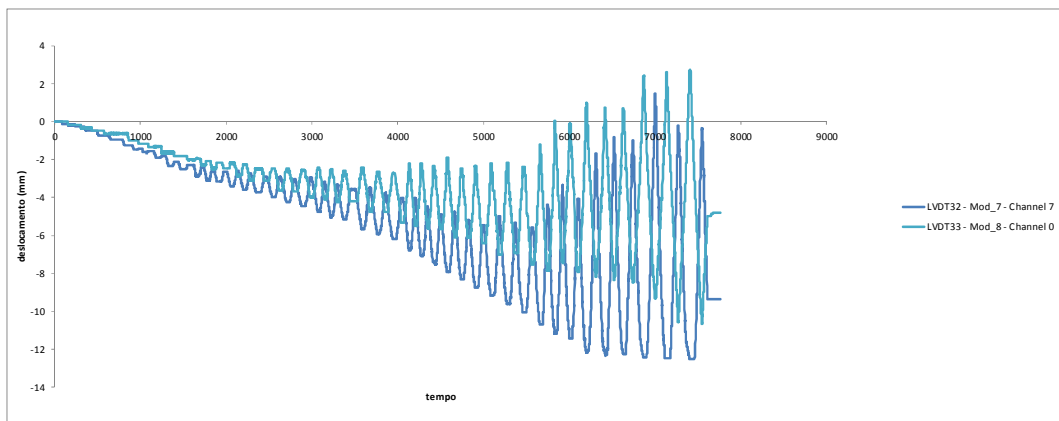
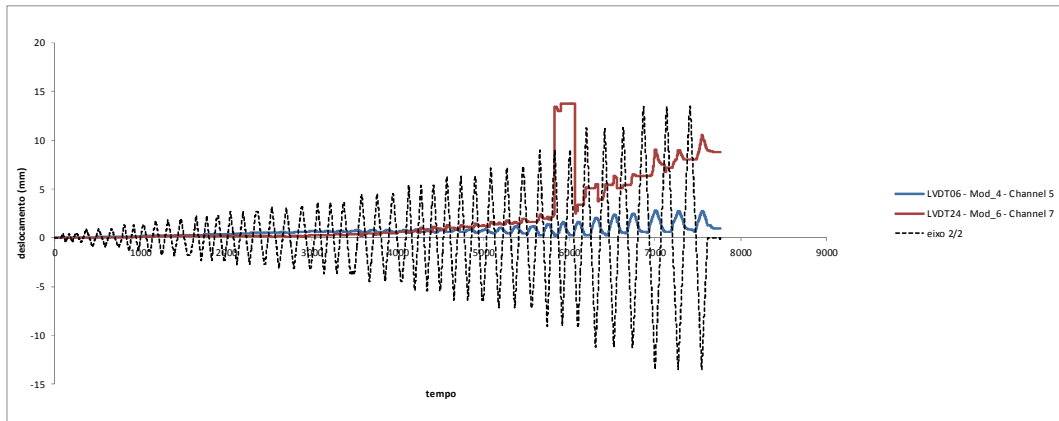


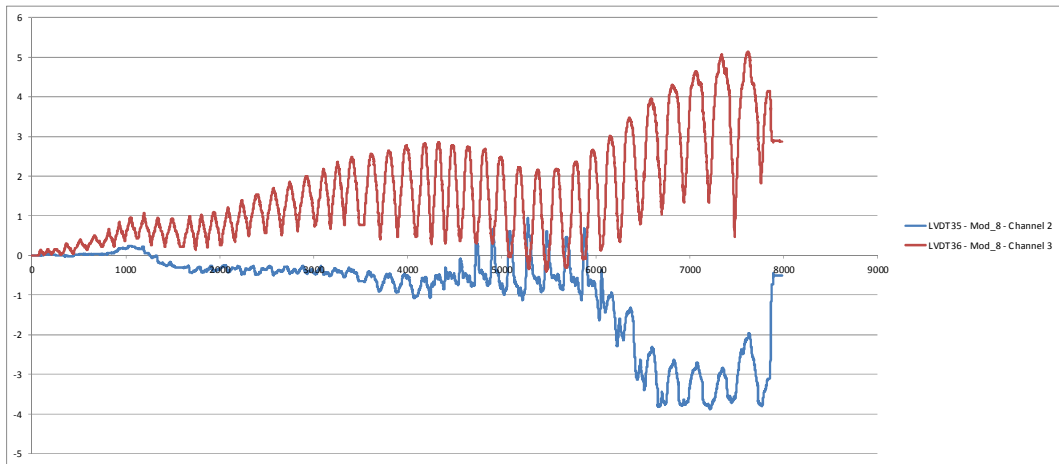


Ensaio IR5

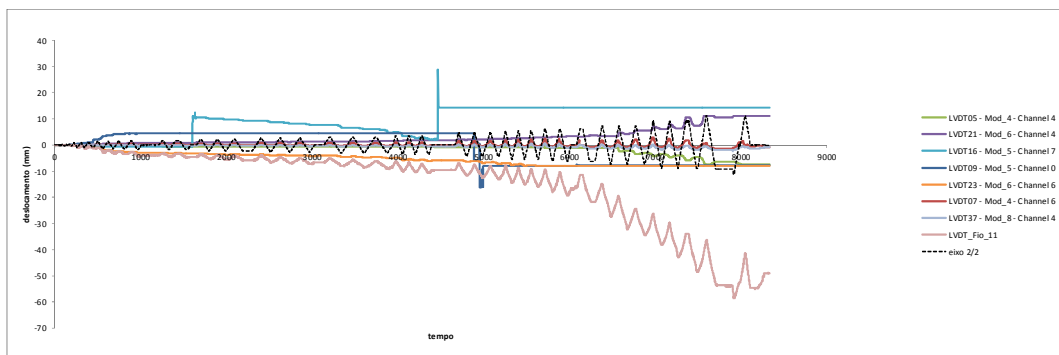
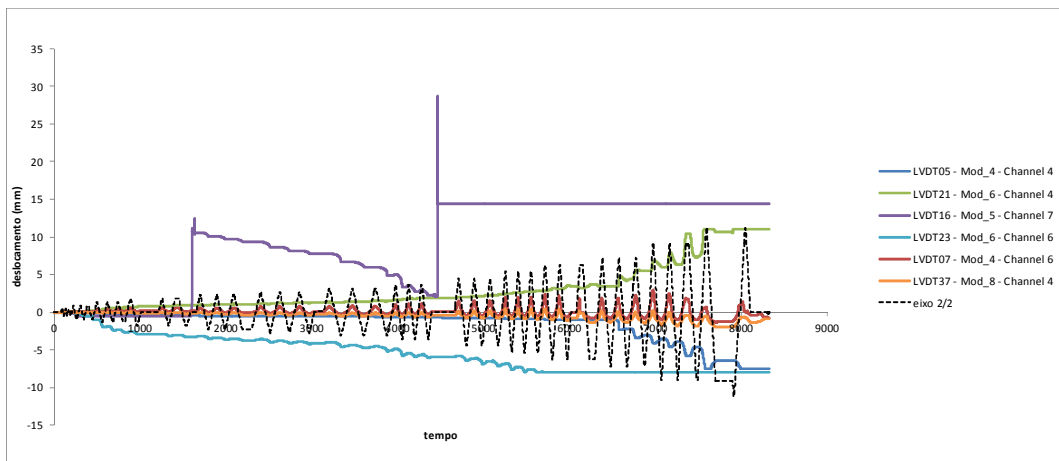
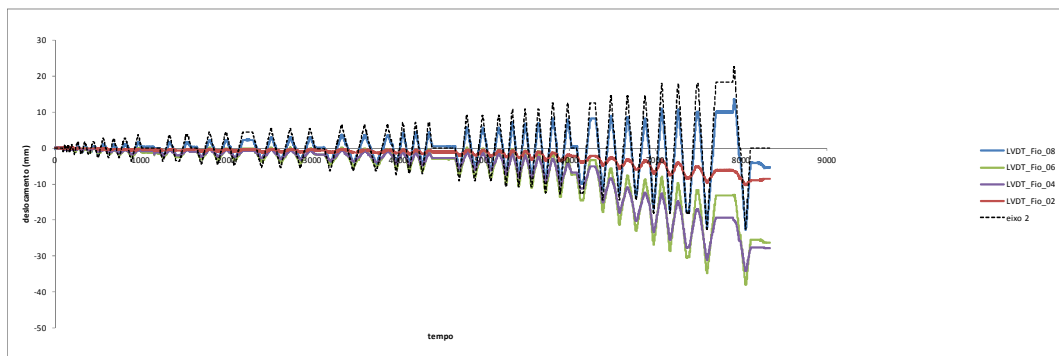
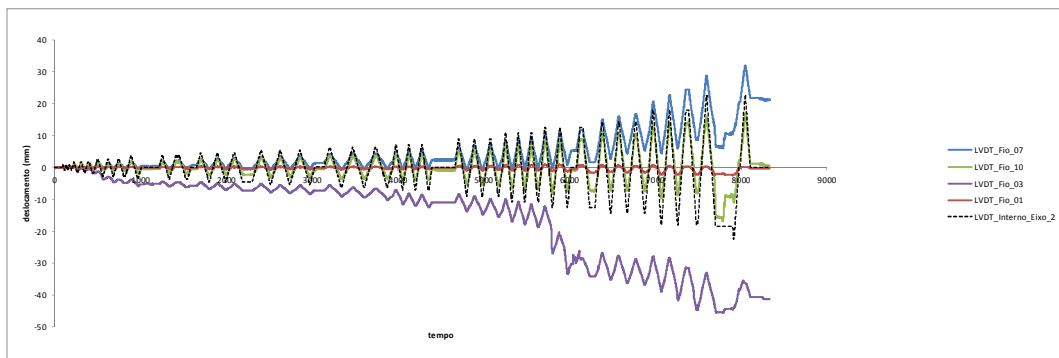


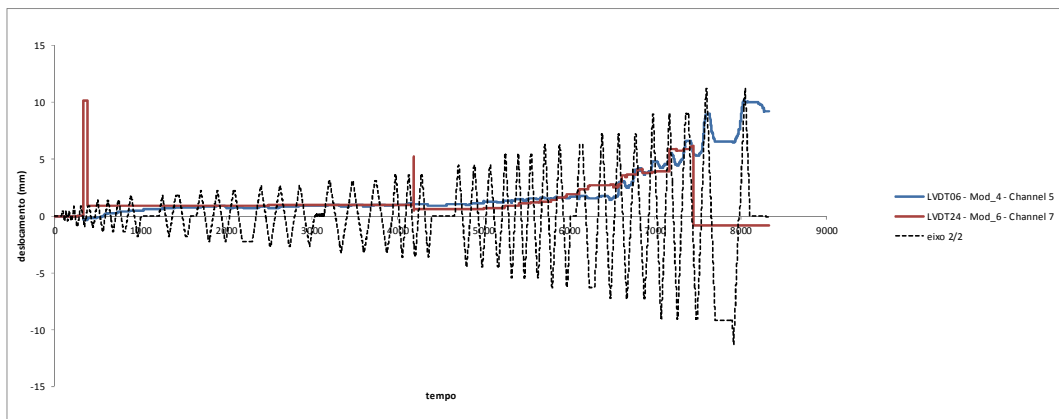
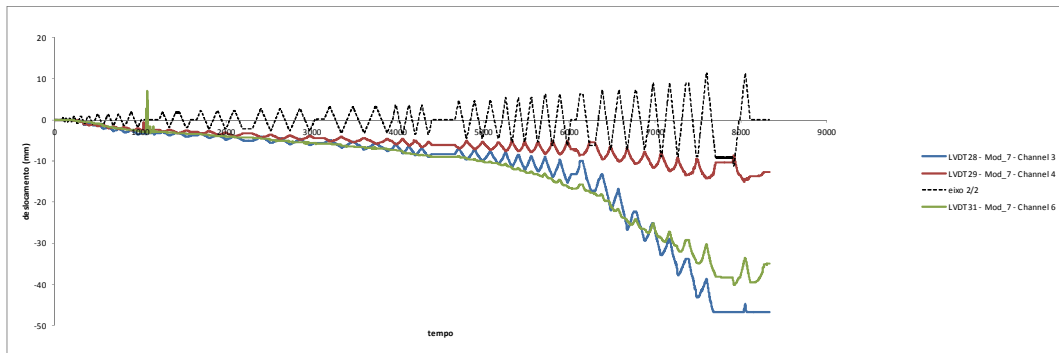
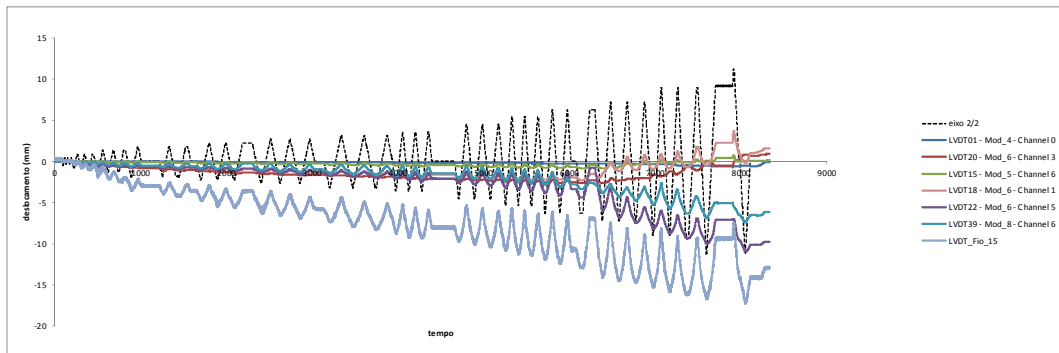
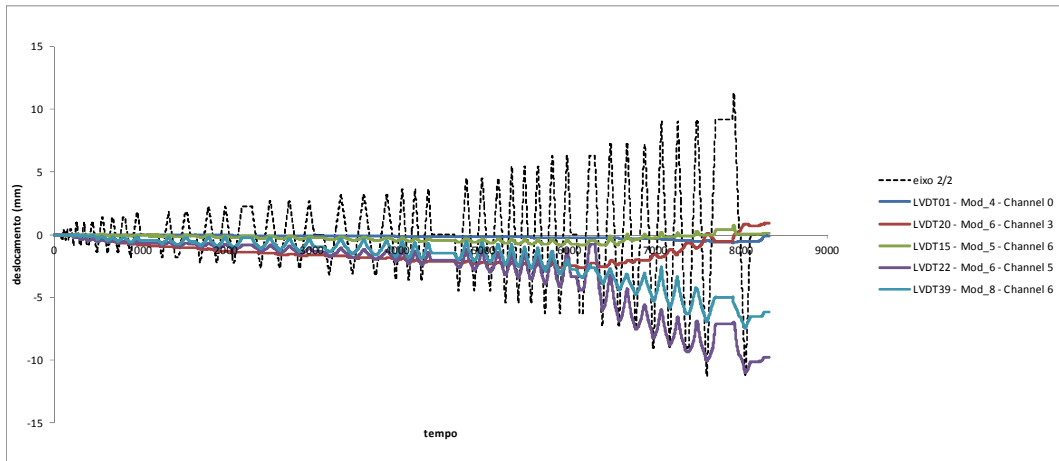


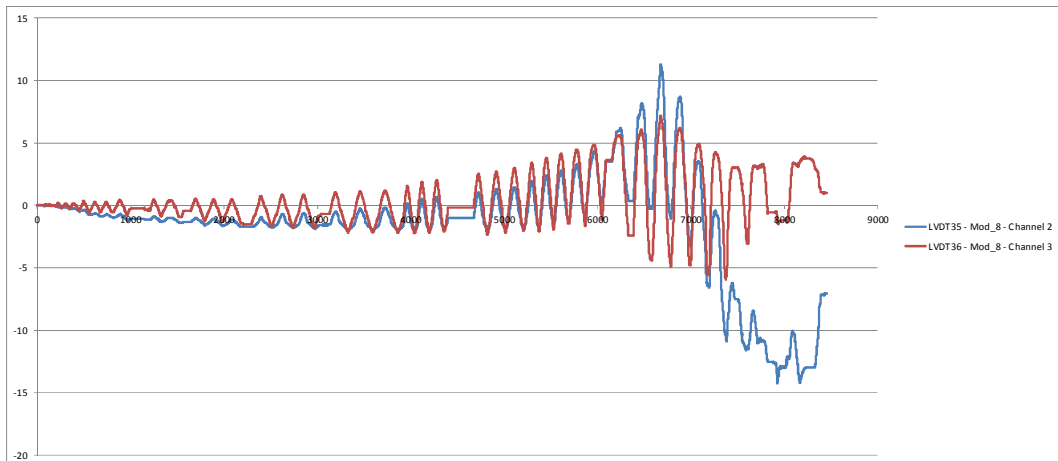
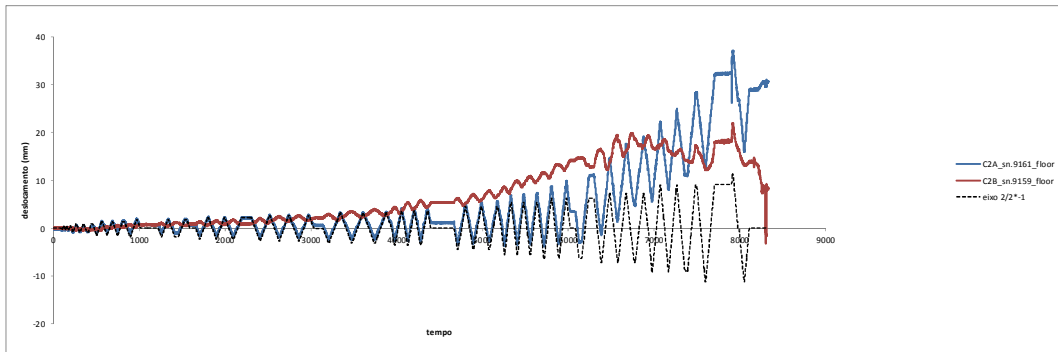
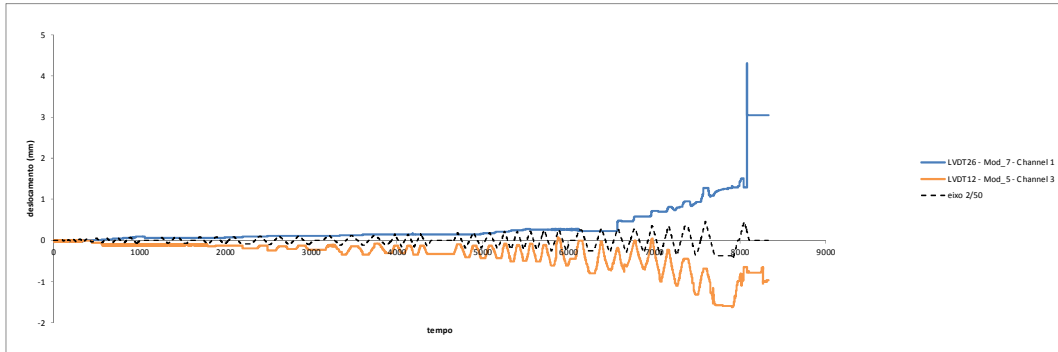
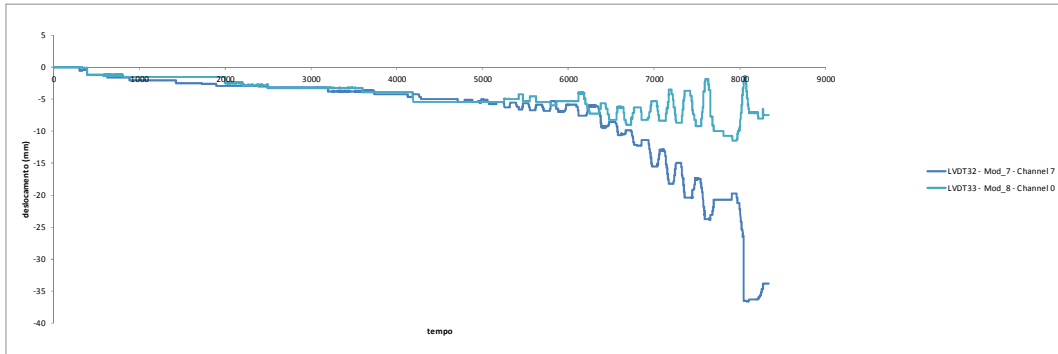




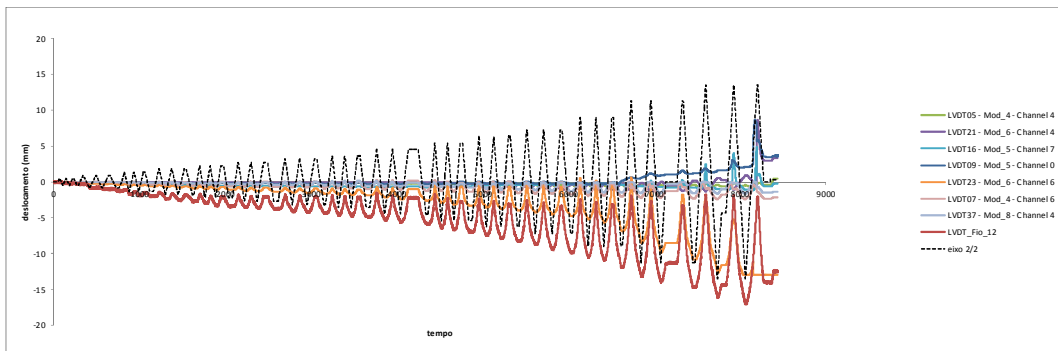
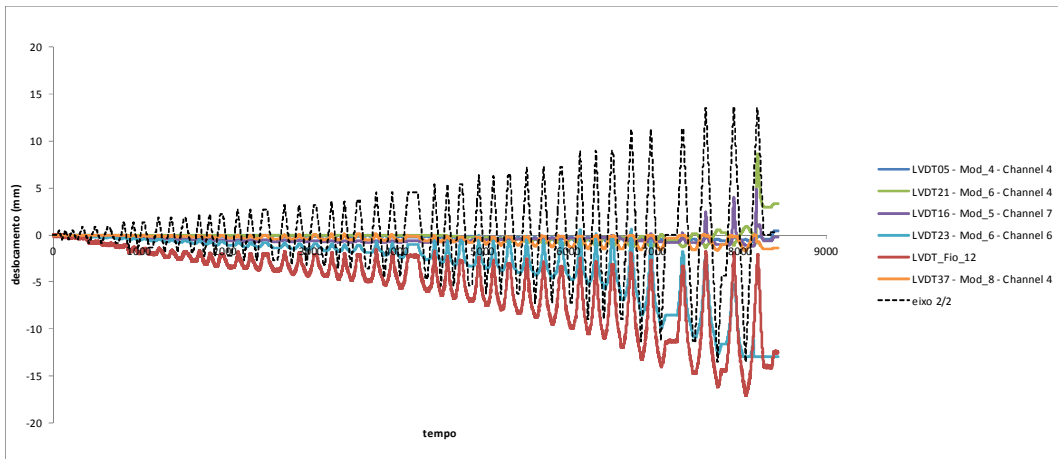
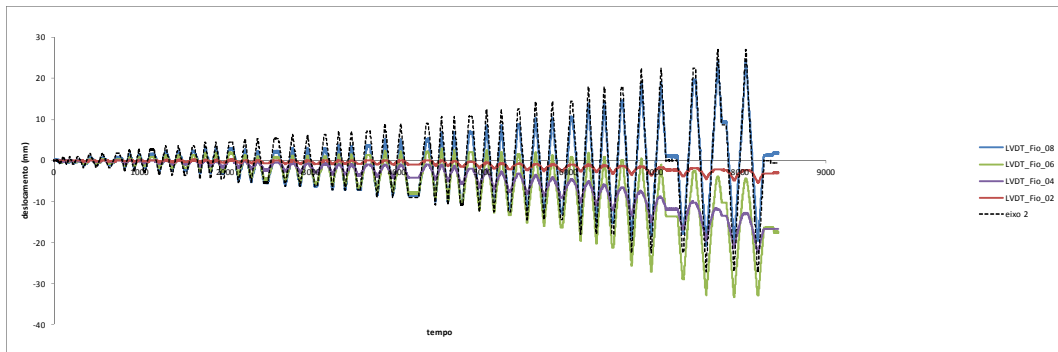
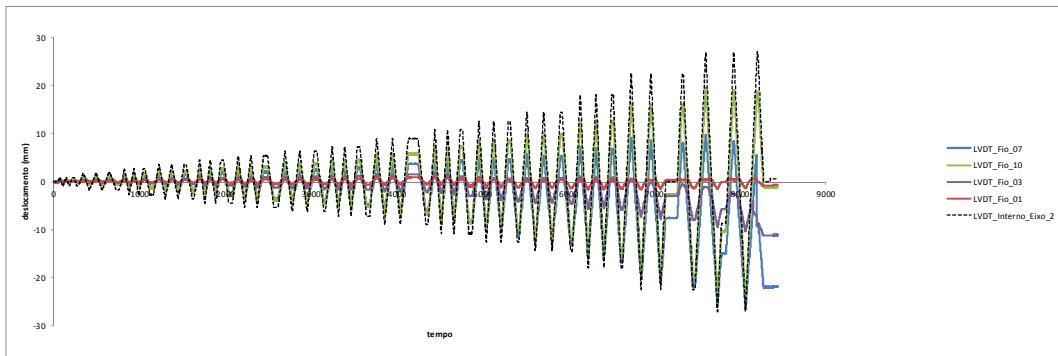
Ensaio IR6

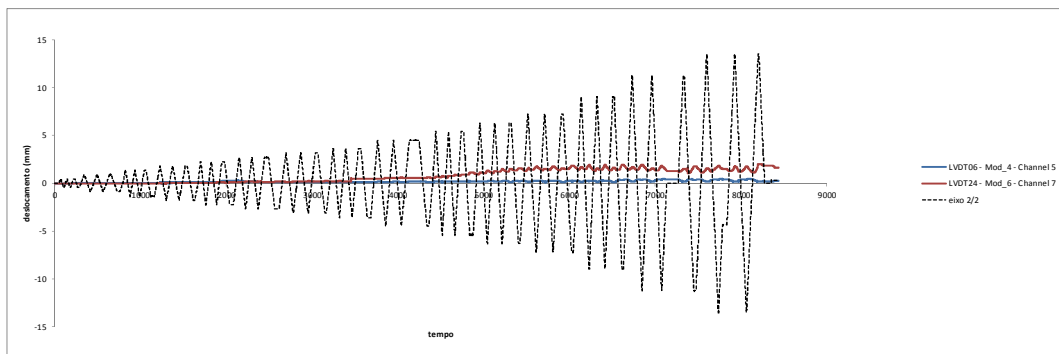
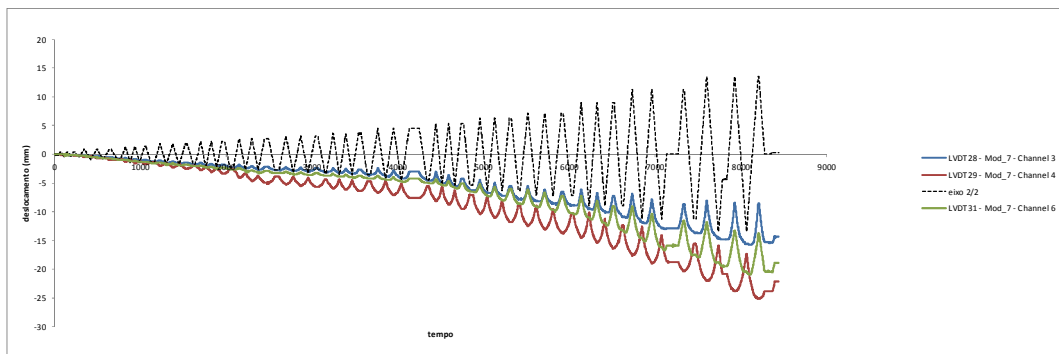
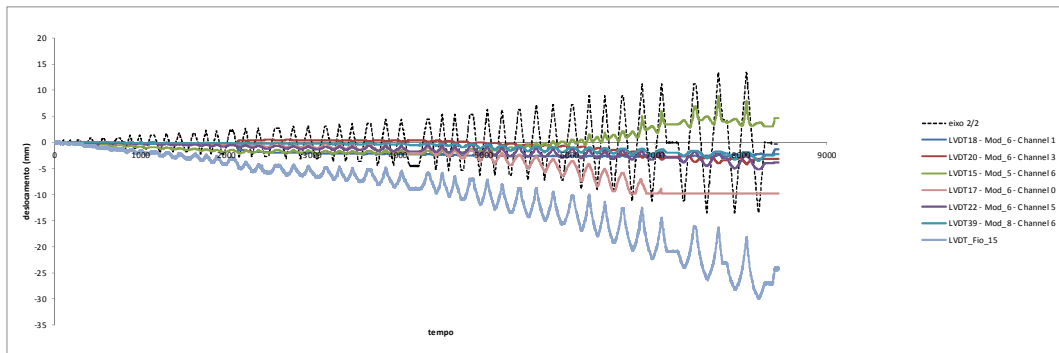
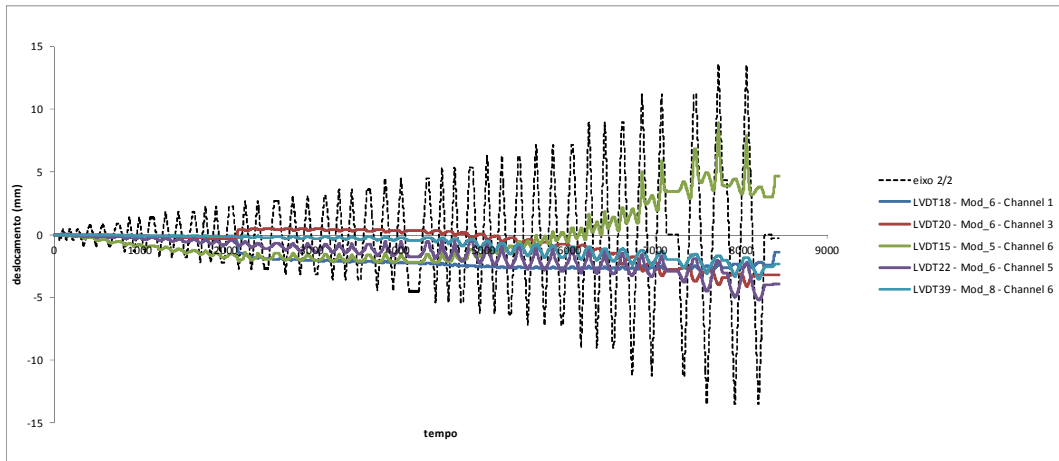


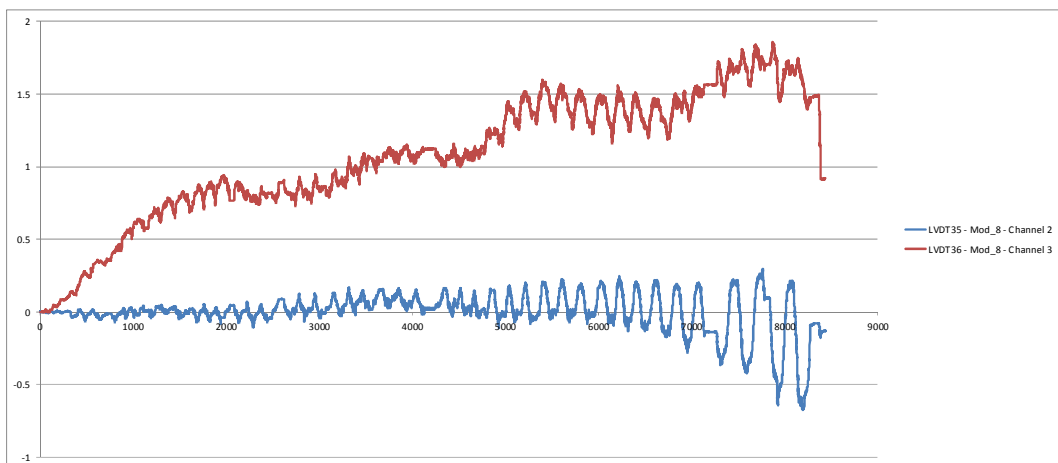
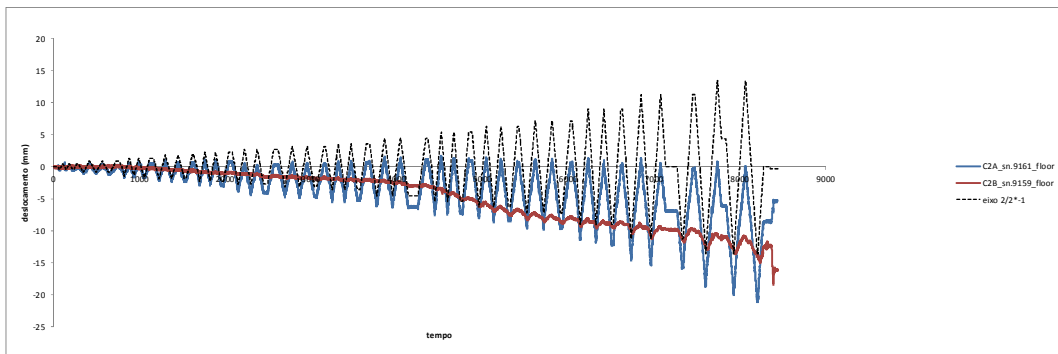
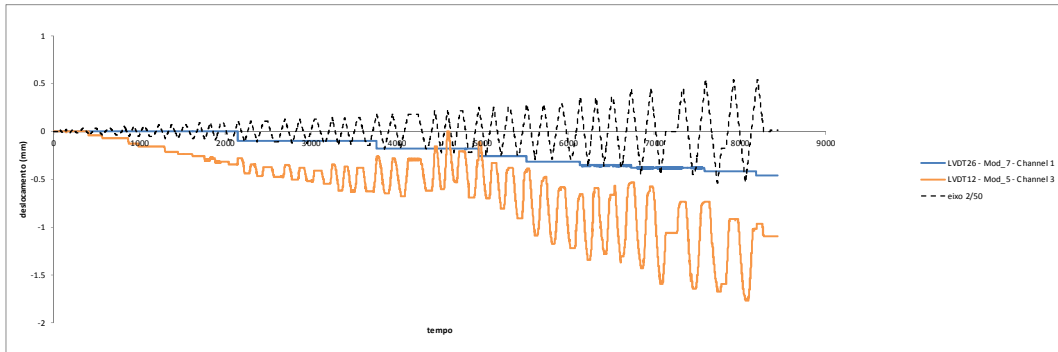
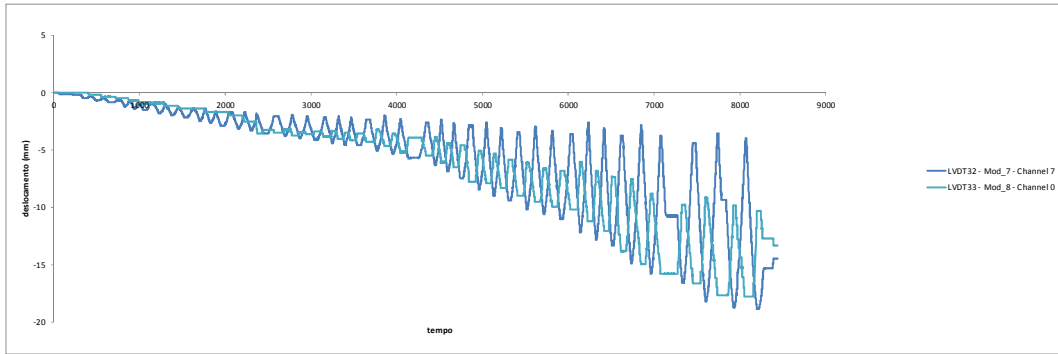




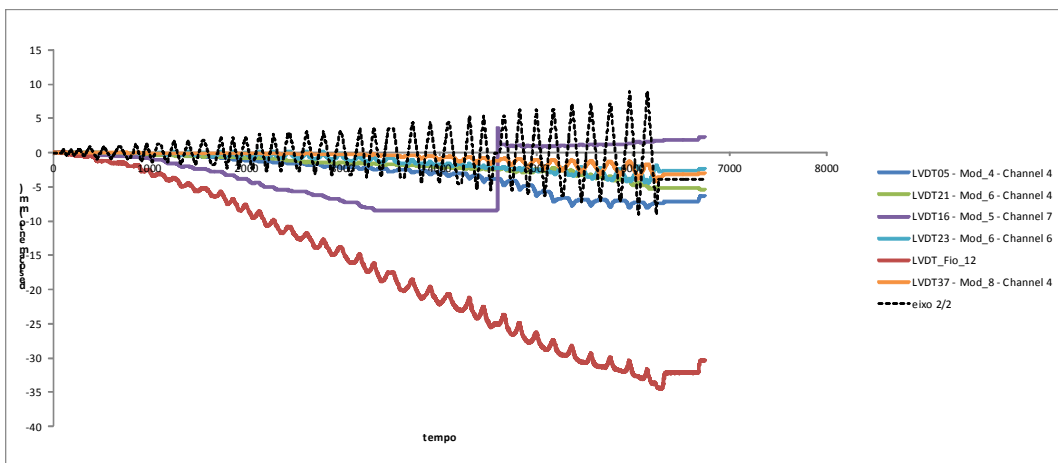
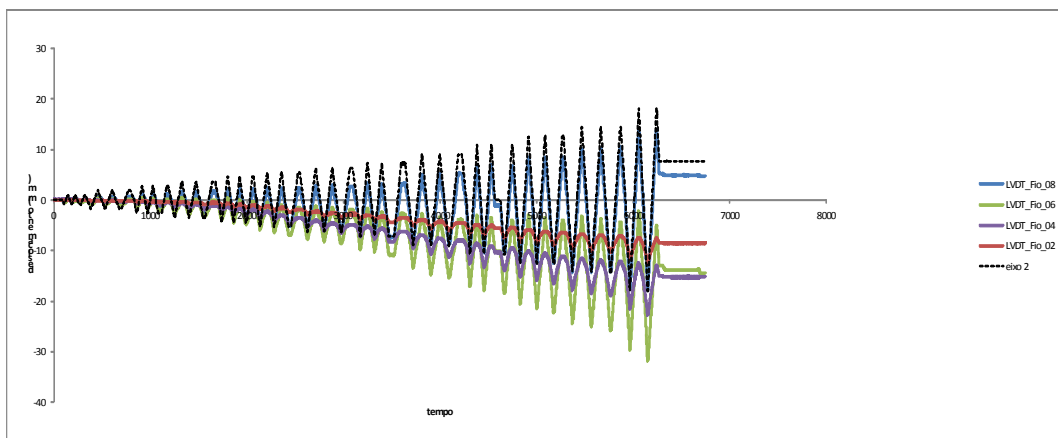
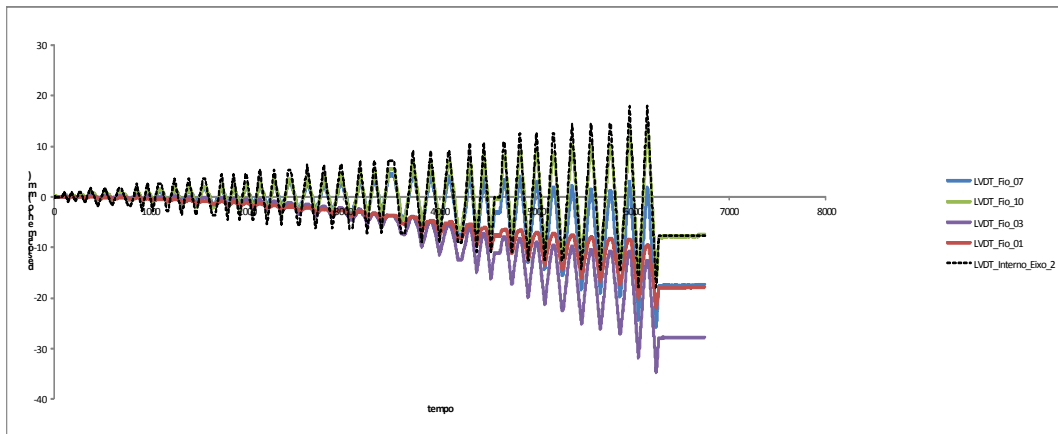
Ensaio IR4++

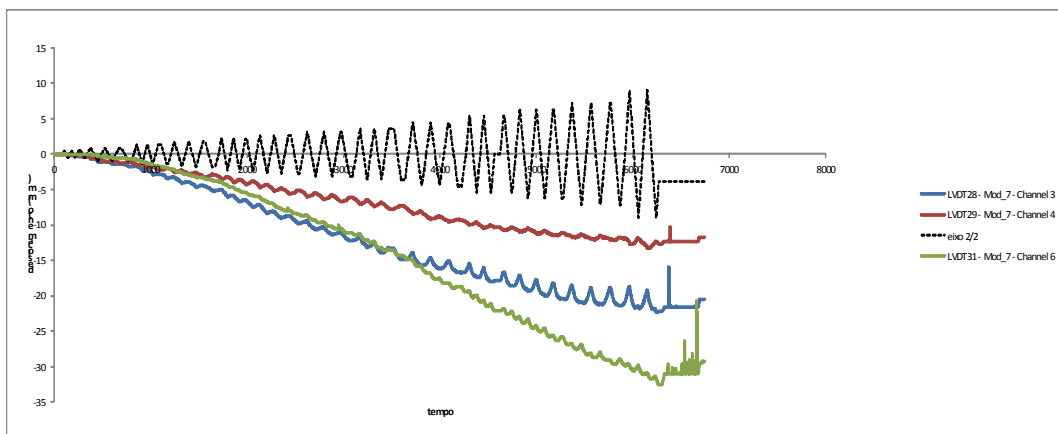
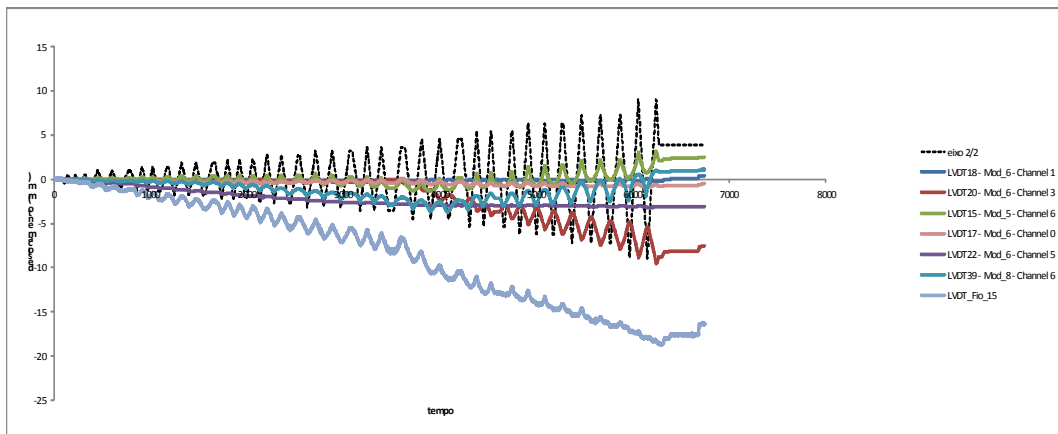
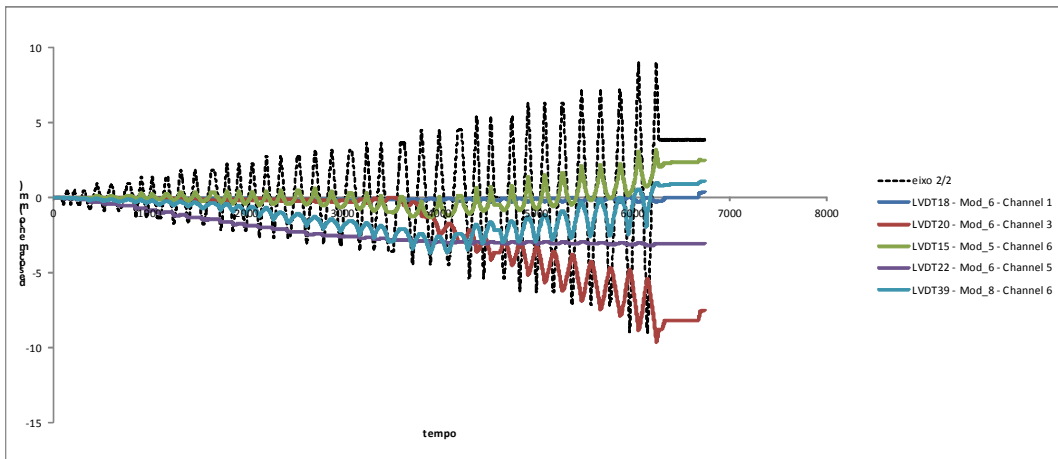
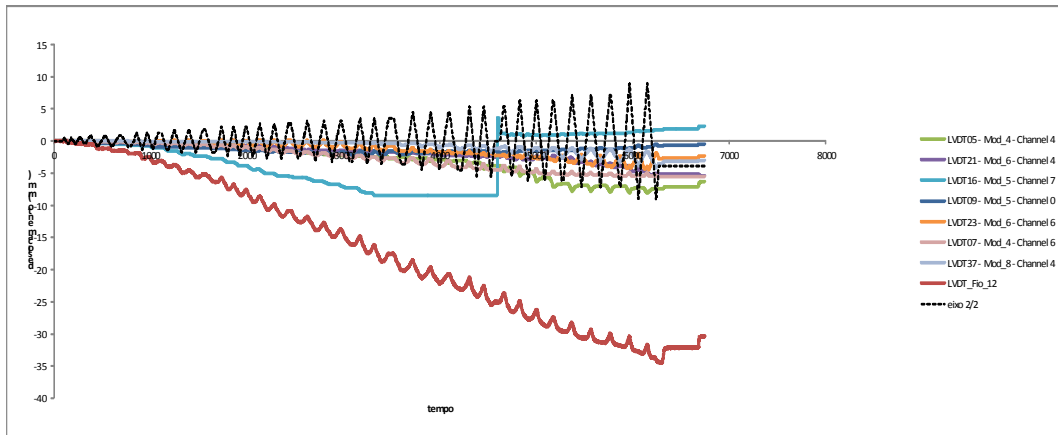


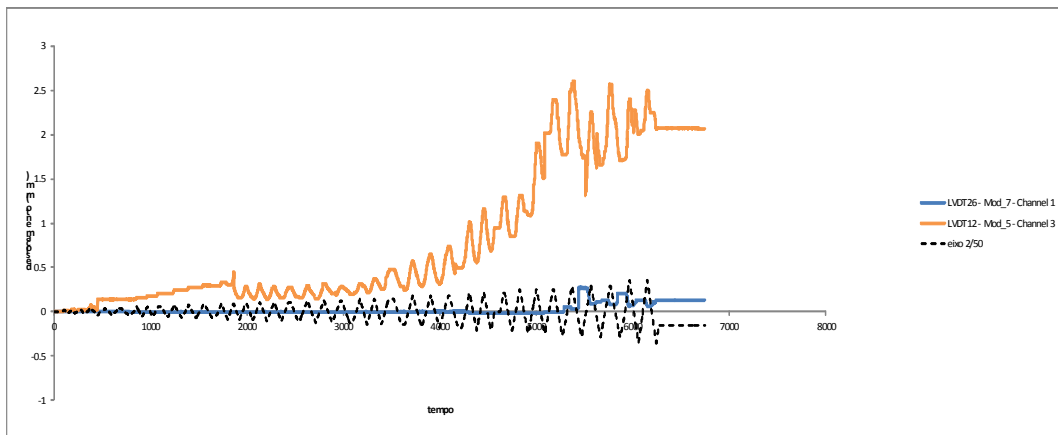
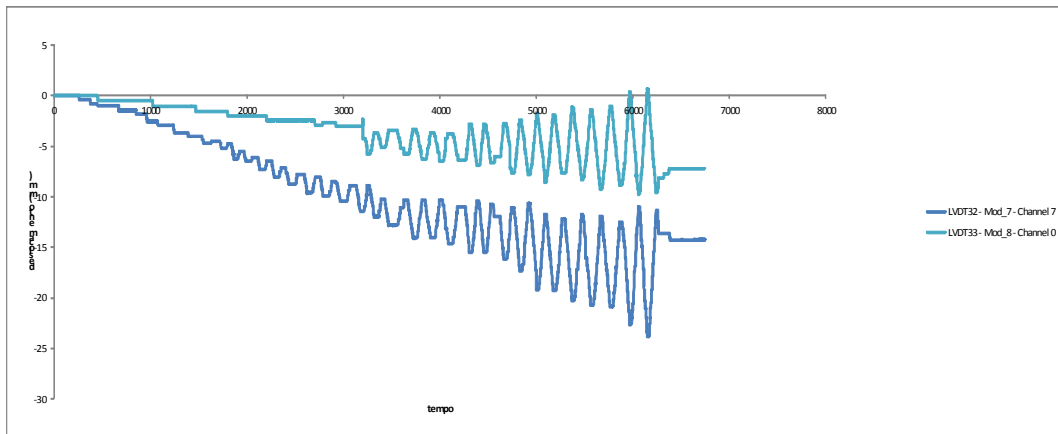
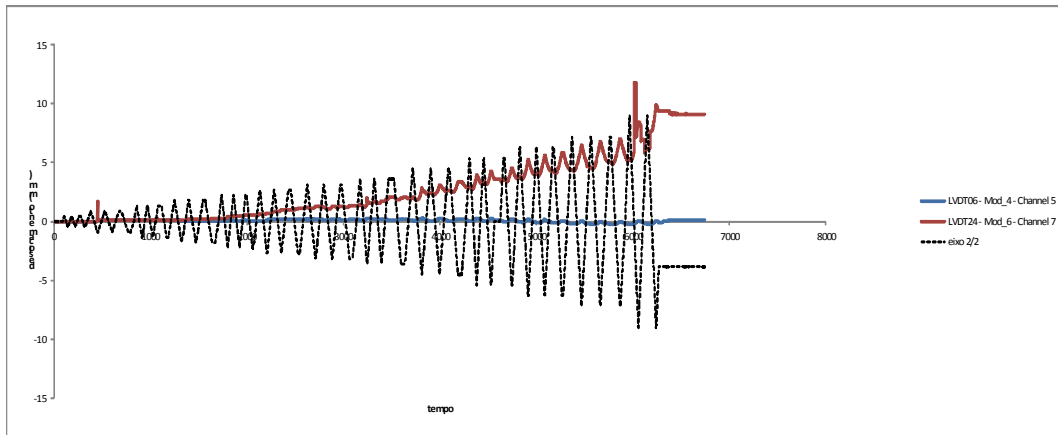


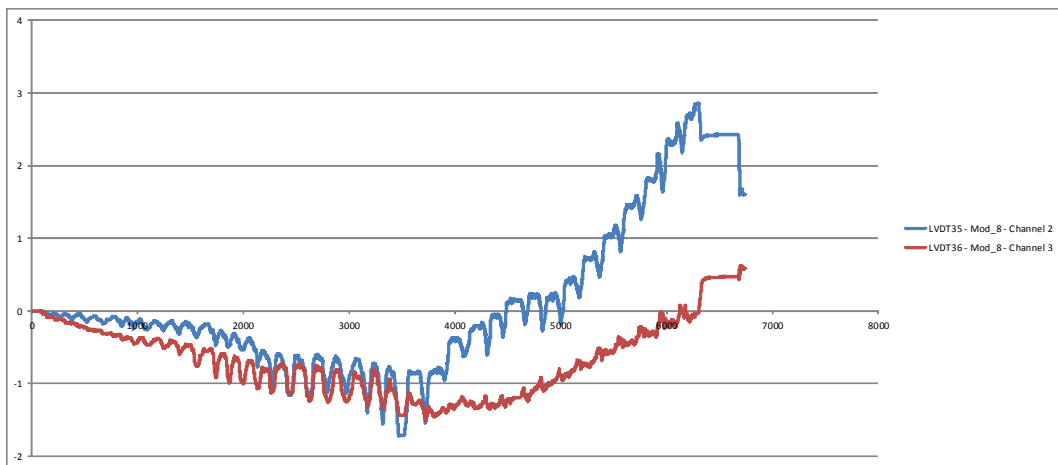
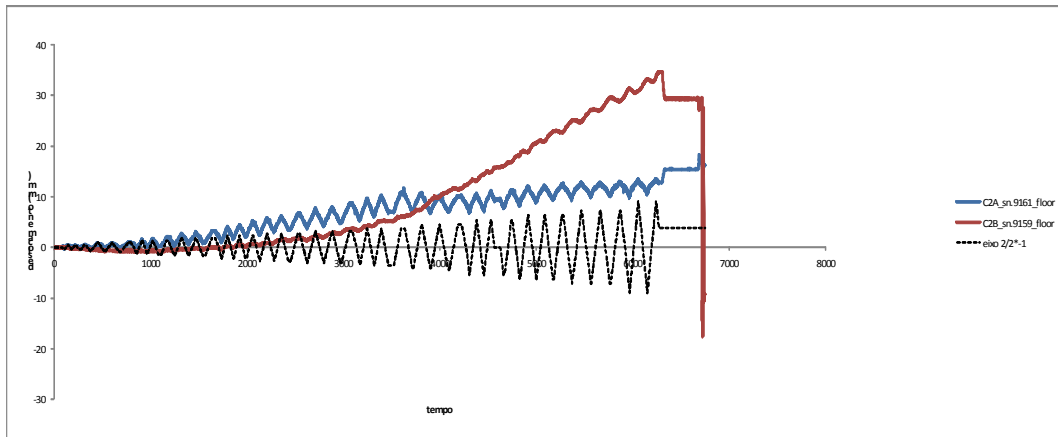


Ensaio IR5++









Ensaio IR6++

