

Ensaaios experimentais de paredes reforçadas com S&P ARMO-mesh®

Testing of walls reinforced with S&P ARMO-mesh®

Joana Pereira, Filipe Dourado

joana.pereira@sp-reinforcement.pt, filipe.dourado@sp-reinforcement.pt

Resumo

O presente artigo tem como objectivo a apresentação do S&P ARMO-System, seu campo de aplicação e resultados obtidos através de ensaios experimentais de paredes reforçadas com recurso a este sistema compósito de malha de carbono e argamassa à base de cal, sujeitas a acções cíclicas. Destaque-se o caso particular dos ensaios de paredes que recriam as características das paredes Pombalinas, típicas da Baixa Lisboa.

Apresenta-se um caso prático de aplicação deste sistema de reforço, que ilustra um tipo de aplicação possível deste sistema, que vem alargar as possibilidades de reforço estrutural de edifícios antigos e outros tipos de estruturas com recurso a técnicas que permitem manter a estrutura existente, e contribuir para a preservação de património e legado cultural.

Palavras-chave

Reforço estrutural, sistema compósito, S&P ARMO-mesh, acção sísmica, ensaios experimentais, património

Abstract

This paper aims to describe the S&P ARMO-System, its field of application and testing of walls reinforced with this composite system of carbon grids and historical mortars subjected to seismic loads. Testing of reinforced walls with this system, with the features of typical Lisbon Pombalino Walls is also presented.

A case study where this reinforcement system was applied is presented as an example of possible practical application of this system that seems to widen the possibilities of reinforcement in ancient heritage buildings and other type of structures allowing to preserve our heritage and cultural legacy.

Keywords

Structural reinforcement, composite system, S&P ARMO-mesh, seismic loads, testing, heritage.

1. Introdução

“Há muito que se assiste a uma tomada de consciência, por parte dos cidadãos, do valor cultural, arquitectónico e urbanístico dos centros históricos de uma boa parte das cidades portuguesas. Dessa tomada de consciência resulta, naturalmente, o desejo de preservar esses antigos conjuntos, alguns dos quais se assumem, cada vez mais nitidamente, como património histórico e cultural, não só dos portugueses, mas também da própria humanidade.” [1]

A necessidade de implementação de soluções de reforço estrutural advém da existência de patologias, associadas quer à concepção, à construção, a situações acidentais, opções de utilização, exploração ou adaptação a documentos normativos.

Muitas vezes, e no caso particular do património histórico, as soluções para as anomalias devem passar pela salvaguarda dos elementos estruturais originais ainda presentes.

O S&P ARMO-System constitui-se como um sistema de reforço estrutural capaz de dar resposta a esta necessidade de preservação do património.

2. Objectivos

Pretende-se no presente documento dar a conhecer o S&P ARMO-System, solução comercial de reforço estrutural da S&P, e suas possibilidades de aplicação. Apresentam-se vários ensaios experimentais em paredes reforçadas com o sistema, destacando-se o caso particular de paredes que visam recriar as paredes típicas da Baixa Pombalina. É também apresentado o caso prático de aplicação na Igreja de Santa Marta em Lisboa.

3. Caracterização do S&P ARMO-System

O S&P ARMO-System é um sistema compósito de reforço estrutural constituído pela malha de carbono S&P ARMO-mesh® e a argamassa reactiva S&P ARMO-crete® (base cimentícia) ou S&P ARMO-mur® (à base de cal).

O sistema apresenta diversas possibilidades de aplicação em edifícios, estruturas enterradas, túneis, etc. Destacamos a sua aplicação como sistema de reforço de alvenarias, em particular as antigas.

O sistema apresenta vantagens como o facto de não sofrer corrosão, ter baixo peso por unidade de área e elevada resistência à tracção. A sua versatilidade, baixo custo e aplicação com recurso a técnica pouco intrusiva são características que tornam este sistema uma mais-valia para a segurança estrutural.

Os dados técnicos do sistema podem ser consultados nas Fichas Técnicas respectivas e documentação disponibilizada pela S&P.

4. Caso prático de aplicação – Abóbada da Nave da Igreja de Santa Marta em Lisboa

O mosteiro de Santa Marta, Mosteiro das Religiosas Franciscanas Clarissas foi fundado em 1612 no local onde existiu um antigo recolhimento de pobres. Ao longo do tempo foi sofrendo diversas adaptações às funções conventuais.

A abóbada central é constituída por alvenaria de tijolo cerâmico argamassada com ligante de cal, e apresenta espessura na ordem de 28 cm e um vão de 10 m. Descarrega sobre paredes de alvenaria de pedra irregular. Foi desenvolvido um estudo e inspecção pela Oz, Lda., com o objectivo de analisar o estado de conservação estrutural da abóbada, uma vez que esta apresentava algumas deformações e fendas longitudinais importantes, quer na parte central quer nos apoios. Considerou-se que a generalidade das fendas tinha origem essencialmente na deformação excessiva, estimando-se que o abatimento da abóbada a meio tenha atingido os 11 cm.

Para a avaliação da abóbada recorreu-se a modelos de cálculo simples, através de análise de elementos de barra representativos da estrutura existente e a pressupostos de deformação da estrutura em consonância com os registos efectuados.

Constatou-se que a abóbada no seu estado de deformação apresentava condições de segurança bastante inferiores às que teria com a sua geometria original, com secções parcialmente descomprimidas, causa das fissuras aparentes. Estimou-se que a variação dos momentos devido à excentricidade originada pela destabilização da estrutura, com base nos modelos aplicados, se traduziu num aumento de mais de 4 vezes em relação ao momento inicial. Com base nesta análise tornou-se evidente a necessidade urgente de intervenção.

O estudo sugeriu a realização do seguinte conjunto de acções:

- 1 - Desmonte e reconstituição da abóbada com a geometria original;
- 2 - Introdução de uma estrutura de suspensão da abóbada, no seu extradorso, apoiada nas paredes exteriores;
- 3 - Reforço da abóbada à flexão.

Tomando em consideração critérios de intrusividade e o custo das duas primeiras acções, optou-se por propor uma solução de reforço com malha de fibra de carbono

S&P ARMO-mesh® L200 integrada numa matriz de argamassa de cal hidráulica, S&P ARMO-mur® ancorada mecanicamente, capaz de resistir aos momentos flectores actuantes através de um biela de tracção/compressão.

Para detalhar e justificar este reforço foi pedido à empresa Civitest que, com base nos elementos de análise e inspecção do trabalho da Oz e na experiência de realização de ensaios de desempenho a estes sistemas de reforço aplicados a estruturas de alvenarias e modelos, apresentasse uma proposta de solução de reforço.

Ao arco de alvenaria esquematizado na Figura 1 foi aplicada uma solução de reforço com uma camada de 2 cm de argamassa em ambas as faces com malha de fibra de carbono S&P Armo-mesh® L200.

Foram tidas em conta as leis constitutivas de comportamento dos materiais para os estados de tensão-extensão e limites máximos, bem como as características dos materiais e comportamento de aderência das interfaces de ligação e da malha, conforme indicado na Figura 2.

Recorrendo a um programa de cálculo de secções planas, com a geometria descrita e as propriedades dos materiais considerados, limitando a extensão da malha de rede de fibra de carbono a 40 % da sua extensão máxima, o que corresponde a um extensão máxima de 7‰ e uma curvatura de $2,5E - 0,2 \text{ m}^{-1}$ obtém-se o diagrama de momento –curvatura.

Da análise do diagrama conclui-se que o reforço considerado o arco de alvenaria consegue suportar um momento até $18,5 \text{ kN.m/m}$ até ocorrer a fissuração da argamassa e do ligante de cal, valor a partir do qual apenas a rede de fibra de carbono funciona como elemento resistente à tracção. Para a curvatura considerada e a extensão de cálculo limite da malha, o momento resistente máximo é de $23,2 \text{ kN.m/m}$, considerado suficiente para o novo estado de tensões gerados pela destabilização da estrutura. Como segurança adicional foram colocadas ancoragens pontuais, de forma a promover a ancoragem mecânica das lâminas de reforço através de pregagens em aço inox, para assegurar a transmissão dos esforços da estrutura para a malha.

A obra foi executada pela empresa Monumenta no ano de 2015. Na Figura 3 são apresentadas fotografias da aplicação do reforço.

5. Ensaios

Foram realizados ensaios experimentais de aplicação do sistema em reforço de paredes por entidades como École d'ingénieurss et d'architectes de Fribourg e CiviTest/ Universidade do Minho. Encontram-se também a decorrer trabalhos de investigação que incluem ensaios experimentais e modelação no âmbito das técnicas de reforço sísmico de edificios antigos (Paredes Pombalinas) no CERIS, Instituto Superior Técnico, que incorporam o S&P ARMO-System. Os resultados destes trabalhos são seguidamente apresentados.

5.1. Ensaio realizados na École d'ingineurss et d'architectes de Fribourg

A campanha de ensaios experimentais realizada na École d'ingineurss et d'architectes de Fribourg integra ensaios de carga cíclicos paredes de alvenaria reforçadas com vários sistemas de materiais compósitos: tecidos de fibra de vidro (S&P G-Sheet E 50/50), laminados de carbono (S&P C-Laminate 150/2000 50/1.2), mantas de fibra de carbono (S&P C-Sheet 240 (200 g/m² e 400 g/m²) e S&P ARMO-mesh L200, em arranjos com diversas configurações geométricas.

Em qualquer dos casos, constatou-se que os modelos reforçados apresentaram aumento significativo de capacidade resistente, bem como aumento da capacidade de deformação em relação ao modelo de referência não reforçado.

Em função da disposição do reforço, foi também possível retirar conclusões acerca de redistribuição de cargas nos modelos.

De notar que o S&P ARMO-System apresenta a vantagem adicional em situação de incêndio de a malha de carbono se encontrar protegida pela argamassa.

Para informação detalhada dos ensaios realizados consultar Referência 4.

5.2. Ensaio realizados pela Civi Test/ Universidade do Minho

Os ensaios de alvenaria de tijolo reforçada com S&P ARMO-System realizados pela Civi Test/ Universidade do Minho envolvem dois tipos de análise: ensaios de flexão (para fora do plano) e ensaios de tracção diagonais (no plano).

As paredes foram reforçadas com malha S&P ARMO-mesh 200/200 e argamassa ARMO-crete w e apresentam a constituição conforme Figura 4 e esquemas de ensaio conforme Figura 5.

Da recolha e análise dos resultados dos ensaios de flexão foi possível constatar, para os modelos de referência, comportamento linear elástico até à cedência, seguido de rotura catastrófica. Os modelos reforçados evidenciaram comportamento linear elástico até ao aparecimento da primeira fissura seguido de comportamento não-linear até à rotura. Nas várias situações ensaiadas, os modelos reforçados com S&P ARMO-System apresentaram um aumento de capacidade resistente cerca de 5 vezes superior em relação ao modelo de referência.

No que se refere aos modelos ensaiados no plano, constatou-se um aumento de resistência ao corte em cerca de 2,3 vezes.

5.3. Ensaio realizados no Instituto Superior Técnico

Para atingir os objectivos pretendidos com os ensaios experimentais seguidamente apresentados, a definição da campanha de ensaios esteve condicionada por factores como a caracterização do comportamento de paredes solicitadas no seu plano e fora

deste e a escala dos provetes, que inviabilizaram o ensaio de paredes reais. Foram concebidas paredes mecanicamente equivalentes à alvenaria tipicamente encontrada em edifícios antigos, e suficientemente estável para possibilitar a sua caracterização. Pretendeu-se, com a realização de ensaios experimentais recolher dados que, complementados com informação científica já existente, permitisse a definição de modelo de cálculo e regras de dimensionamento para o reforço estrutural de alvenarias antigas. Para este efeito houve lugar a realização de ensaios de caracterização de material, ensaios cíclicos de amarração da malha de reforço, ensaios cíclicos para acções horizontais no plano e ensaios cíclicos para acções horizontais fora do plano.

A geometria das paredes para os ensaios cíclicos no plano e fora do plano foi definida com base na geometria característica dos nembos das paredes tipicamente encontradas em edifícios antigos. Foram ensaiados modelos não reforçados e reforçados com duas camadas de S&P ARMO-mesh® L500, uma aplicada verticalmente e outra na horizontal.

O esquema de ensaio encontra-se representado na Figuras 6 e a síntese dos resultados obtidos constam na Tabela 1.

Nas Figuras 7 e 8 estão representadas envolventes de ensaio de paredes no plano.

Da análise de resultados efectuada, é possível constatar o aumento da capacidade das paredes reforçadas com o S&P ARMO-System.

6. Conclusões

O tema da reabilitação e reforço estrutural é complexo, e tipicamente exige uma abordagem multidisciplinar. A investigação, desenvolvimento e inovação tecnológica têm vindo a caminhar no sentido de colocar à disposição sistemas e técnicas de reforço eficientes, que respondem a critérios de segurança mais exigentes, bem como a necessidades estruturais.

Os vários ensaios realizados ao sistema de reforço estrutural S&P ARMO-System, tornam evidente a sua contribuição para o incremento da capacidade dos elementos estruturais com a sua aplicação.

Este sistema constitui-se como uma solução com um grau de intrusividade relativamente baixo, que respeita a natureza do material de suporte.

A sua aplicação concorre para a preservação do património construído, e a abre o campo de possibilidades na conservação de elementos originais por incremento da capacidade resistente e adequação a necessidades, critérios regulamentares e requisitos actualmente exigidos.

Referências

1. Silva, V. C. "Reabilitação Estrutural de Edifícios Antigos." Alvenaria e Madeira. Técnicas Pouco Intrusivas. Argumentum, Grémio das Empresas de Conservação e Restauro do Património Arquitectónico (GECORPA), 2ª Ed. Lisboa, Portugal (2007).
2. S&P Clever Reinforcement Ibérica, Ficha Técnica S&P ARMO-mesh®, SP-PT.08.01.12.00/01/2017, 2017.
3. Filipe Dourado, Reforço estrutural da abóbada da nave da Igreja de Santa Marta em Lisboa, Construção Magazine, nº 77, 2017.
4. Suter R., Broye A., Grisanti M., Renforcement parasismique de murs en maçonnerie au moyen de matériaux composites, Journée d'étude FRP 2010 S&P Clever Reinforcement Company SA, Brunnen, Applied Mechanics and Materials Vol. 82 629, 2010.
5. João A.P.P. Almeida, Eduardo B. Pereira, Joaquim A.O. Barros, Assessment of overlay masonry strengthening system under in-plane monotonic and cyclic loading using the diagonal tensile test, Construction and Building Materials, Volume 94, 2015, pp. 851-865
6. João Almeida, Eduardo N. B. Pereira, Joaquim A. O. Barros, Delfina Gonçalves, Strengthening of ceramic brick masonry with the Armo-system: Experimental evaluation – Part I, Relatório técnico, Universidade do Minho, Guimarães, 2014.
7. Guerreiro A., Ferreira J., Proença J., Gago A., Strengthening of old masonry walls for out-of-plane seismic loading with a CFRP reinforced render, Experimental Techniques, 2017 (under review)
8. Guerreiro A., Ferreira J., Proença J., Gago A., Strengthening of old masonry walls for in-plane seismic loading with a CFRP reinforced render, Experimental Techniques, 2017 (under review)
9. Guerreiro A., Proença J., Ferreira J., Gago A., Bonding of a CFRP reinforced render for external strengthening of old masonry buildings, Construction and Building Materials, 2017 (under review)

Tabela 1

Síntese dos resultados obtidos – Ensaio descritos em 5.3

	Esquema de Ensaio	Parede	Carregamento axial	M ₁ ^R (Médio) kN.m	M ₂ ^R (Médio) kN.m	M ₃ ^R (Médio) kN.m
Ensaio no plano	B	Não reforçada	0,20 MPa	61,79	79,82	-
		Reforçada		134,84	-	-
	C	Não reforçada	0,40 MPa	110,79	Indeterminado	-
		Reforçada		175,95	-	-
Ensaio fora do plano	D	Não reforçada	0,20 MPa	-	-	26,40
		Reforçada		-	-	31,74
		Não reforçada	0,40 MPa	-	-	41,38
		Reforçada		-	-	50,14

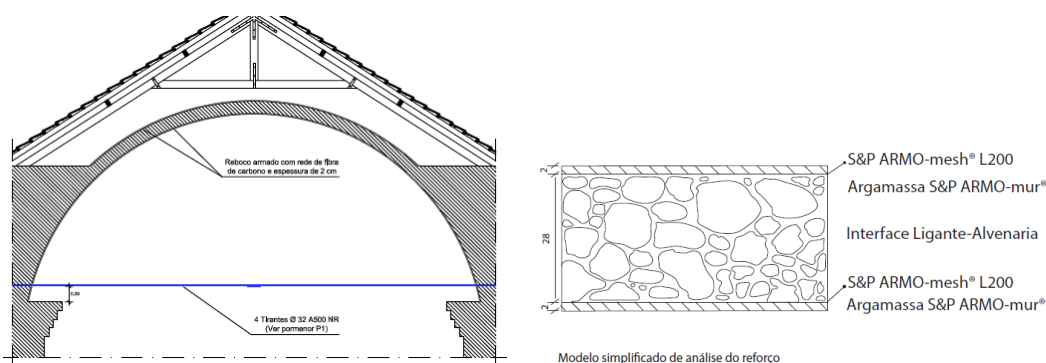
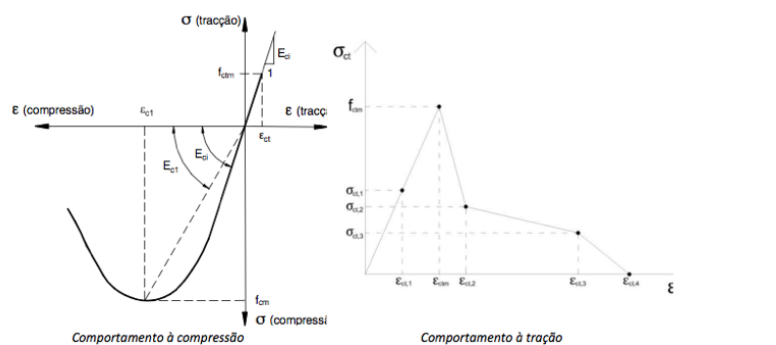


Figura 1. Representação esquemática da solução de reforço aplicada na abóbada da Igreja de Santa Marta



	f _c (MPa)	ε _{c,1} (‰)	ε _{c,2} (‰)	E _c (GPa)	f _{ctm} (MPa)	ε _{ctm} (‰)	σ _{c,1} (MPa)	σ _{c,2} (MPa)	σ _{c,3} (MPa)	ε _{c,1} (‰)	ε _{c,2} (‰)	ε _{c,3} (‰)	ε _{c,4} (‰)
Interface Ligante - Alvenaria	3	3	5	1	0.1	0.1	0.05	0.025	0.01	0.05	0.15	0.5	1
Argamassa	20	2	5	20	3	0.15	1.5	0.75	0.275	0.075	0.2	1.275	2.5

*Valores estimados

	γ (g/cm ³)	φ (mm)	A (mm ² /m)	f _u (MPa)	F _{1,75%} (kN/m)
S&P ARMO-Mesh L200	1.7	0.047	47	4300	200

Figura 2. Comportamento dos materiais, características da interface ligante-alvenaria e S&P ARMO-mesh® L200 – Igreja de Santa Marta



Figura 3. Preparação, aplicação do sistema de reforço e aspecto final dos trabalhos de reforço da abóbada da nave da Igreja de Santa Marta em Lisboa

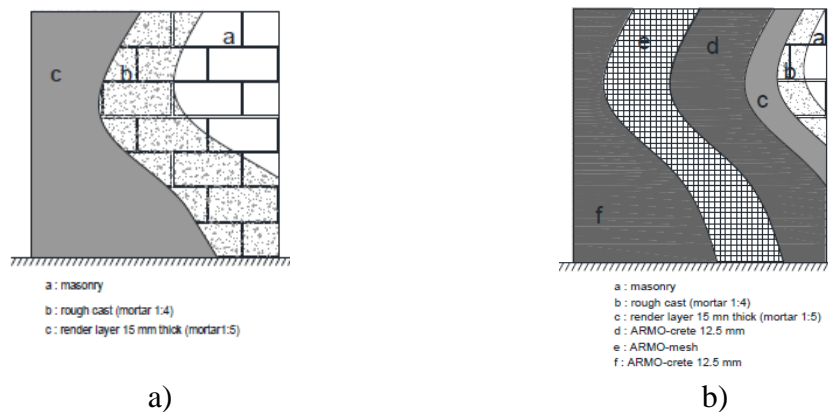


Figura 4. Constituição das paredes ensaiadas – a) não reforçada; b) reforçada – Ensaio descritos em 5.2.

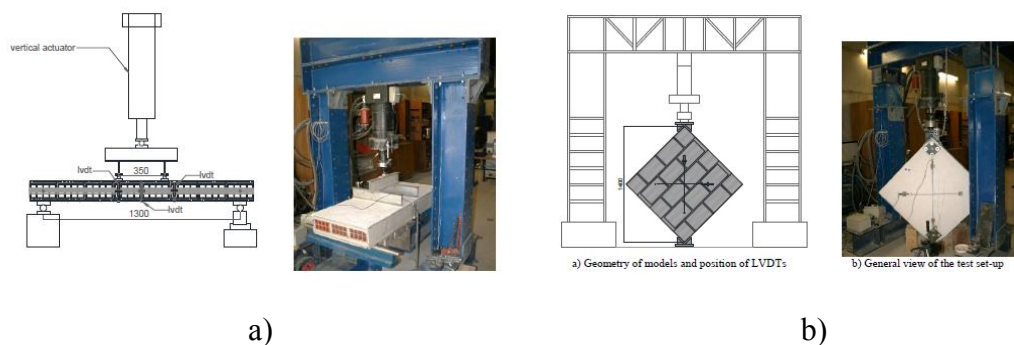
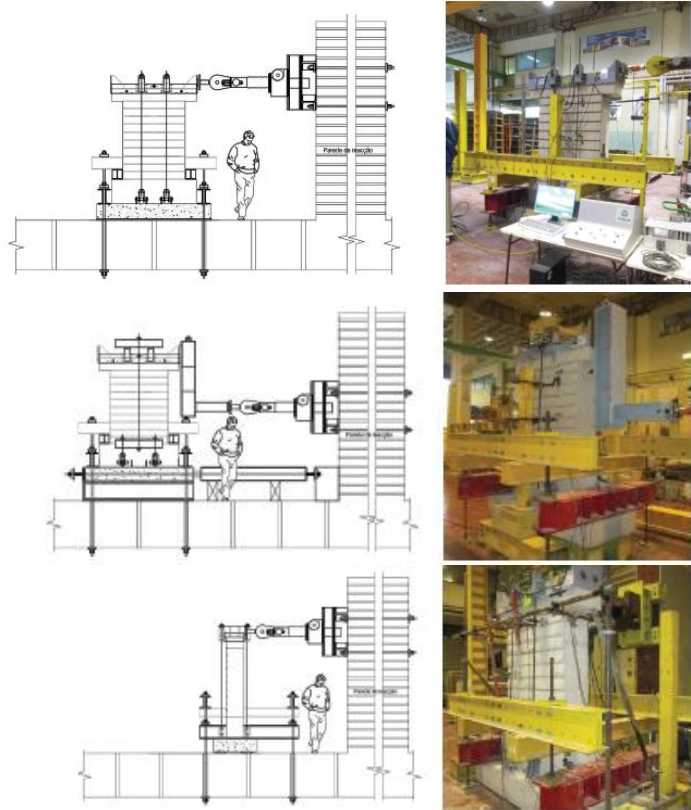


Figura 5. Esquema e equipamento de ensaio – a) ensaios fora do plano e b) ensaios no plano – Ensaio descritos em 5.2



B

C

D

Figura 6. Esquemas dos ensaios cíclicos no plano (B e C) e fora do plano (D) – Ensaio descritos em 5.3

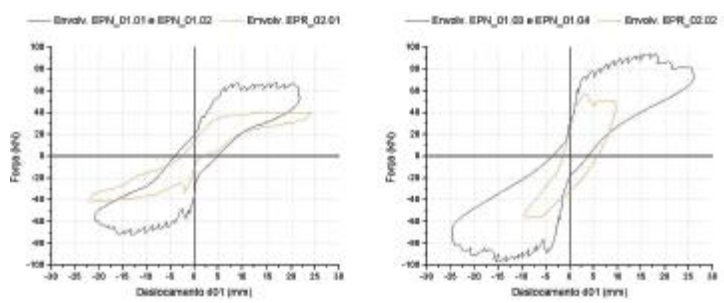


Figura 7. Envolventes de ensaio de paredes reforçadas e não reforçadas – carga axial ligeira e moderada (Esquema B) – Ensaio descritos em 5.3

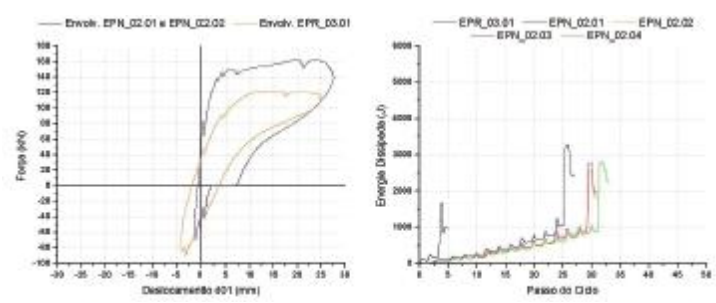


Figura 8. Envolventes de ensaio de paredes reforçadas e não reforçadas e Energia dissipada por ensaio de paredes – carga axial intermédia (Esquema C) – Ensaio descritos em 5.3