5. ENSAIOS DE PAREDES DE ALVENARIA SUBMETIDAS À COMPRESSÃO AXIAL

Nesta série final de ensaios de paredes submetidas à compressão axial foram ensaiados modelos, essencialmente com os mesmos revestimentos, dimensões e forma de execução já descritos no ***Capítulo 4.***

As *paredinhas* ensaiadas tinham dimensões de 39 x 81 cm e para cada tipo de revestimento foram moldados dois modelos. A resistência, tanto da argamassa de assentamento como da argamassa de revestimento, foi controlada através de corpos-de-provas que foram moldados na mesma data de execução das *paredinhas*. Em todas as situações adotadas, o revestimento tinha espessura de 2 cm.

Também em todas as paredes, a argamassa de assentamento utilizada tinha o traço de 1:0,5:4,5 (cimento:cal:areia) em volume e apresentou resistência média de 11 MPa. A relação água/cimento utilizada em todas as paredes na argamassa de assentamento foi ≤ 1. As paredes foram chapiscadas, com traço de 1:2 com 5% de aditivo e fator água/cimento igual a 0,5. O aditivo usado foi RHOXIMAT SB-112 da RHODIA.

O produto é uma dispersão aquosa de um copolímero estireno/butadieno de tamanho de partícula bastante reduzido. Sua compatibilidade é excelente com ligantes aquosos, e se destina à modificação de argamassas e concretos no sentido de melhorar sua aderência sobre bases, assim como suas propriedades mecânicas.

Para controle da resistência dos blocos foram ensaiados conforme a NBR 7186 - *Bloco Vazado de concreto simples para alvenaria com função estrutura*, 6 blocos escolhidos aleatoriamente no lote doado pelo fornecedor. A resistência média encontrada nos ensaios em relação a área bruta dos blocos foi de 9 MPa (resultados descritos no ***ANEXO A***).

As *paredinhas* depois de posicionadas na Máquina Universal de Ensaios eram ensaiadas à compressão axial. Durante os ensaios foram realizadas duas descargas, com incrementos de carga 20 kN. Na primeira descarga foram aplicados dois incrementos de carga e, na segunda descarga, foram aplicados quatro incrementos. Foram observados a carga da primeira fissura, a forma de ruína e o comportamento pós-pico de cada modelo ensaiado. Todas as paredes foram ensaiadas com 28 dias de idade.

5.1 Resultados obtidos

a) Paredes P01 e P02 (sem revestimento).

As paredes P01 e P02 foram ensaiadas sem revestimento, atingindo a ruptura com força máxima de 406 kN e 387 kN, respectivamente. Observou-se, na parede P01, o aparecimento de fissuras que começavam na junta vertical superior da parede, interceptavam o bloco na diagonal (fiada inferior), prosseguiam segundo a junta vertical da outra fiada de meios-blocos e atravessavam o bloco inferior diagonalmente (Figura 5.1).

Na parede P02, observou-se a mesma configuração de fissuras adicionando-se a ruptura dos septos laterais na base da parede (Figura 5.2).

b) Paredes P03 e P04 (revestidas com argamassa "fraca").

As paredes P03 e P04 foram revestidas com argamassa "fraca", atingindo a ruptura com força máxima aplicada de 485 kN e 300 kN, respectivamente.

A parede P04 apresentou um defeito de execução pois, quando foram retirados os perfis laterais, observou-se falhas no preenchimento da camada de argamassa do topo da parede. Talvez por isso, a carga de ruptura da parede P04 foi bem inferior à da parede P03. As fissuras começaram na parte superior do revestimento e, quando a chapa de aço alcançou o núcleo, o modelo começou a ganhar resistência. Os resultados desse modelo, não foram utilizados na análise e comparação com os outros protótipos.

A ruptura da parede P03 se deu bruscamente nos septos dos blocos (Figura 5.5). Houve ruptura do revestimento na base da parede e uma fissura vertical também na

base da parede. Após ruptura, observou-se o descolamento da primeira fiada (Figura 5.4).

c) Paredes P05 e P06 (revestidas com argamassa "forte").

As paredes P05 e P06 foram revestidas com argamassa "forte", atingindo a ruptura com força máxima aplicada de 489 kN e 450 kN, respectivamente. A parede P05 apresentou fissuras verticais no revestimento e, com o acréscimo de carga, apareceram fissuras horizontais (Figura 5.7). Observou-se também fissuras nos septos dos blocos. A parede P06 não apresentou fissuras nos septos dos blocos, verificando-se apenas fissuras verticais no revestimento (Figura 5.8).

Em nenhum momento houve descolamento do revestimento com o núcleo. As paredes depois de ensaiadas e retiradas da Máquina Universal de Ensaios, eram também vistoriadas. Observou-se que as fissuras que apareciam no revestimento correspondiam às fissuras encontradas no núcleo. Concluiu-se assim, que as fissuras nos blocos acarretam as fissuras no revestimento.

d) Paredes P07 e P08 (revestidas com argamassa "forte" + telas soldadas).

As parede P07 e P08 foram revestidas com argamassa "forte" + telas soldadas, atingindo a ruptura com força máxima de 543 kN e 592 kN, respectivamente. A parede P07, inicialmente, apresentou fissuras verticais no revestimento. Com o aumento de carga, fissuras horizontais surgiram na mesma altura que as juntas horizontais de argamassa. As fissuras nos septos dos blocos foram aumentando, chegando a secionar os blocos (Figura 5.10). Já nos últimos incrementos de carga, os fios das telas na base da parede entortaram, provocando o destacamento de parte do revestimento nessa região.

A parede P08 apresentou poucas fissuras no revestimento. As fissuras ocorreram no topo da parede e a ruptura foi provocada pelo seccionamento dos blocos nos septos (Figura 5.11). Houve descolamento do revestimento.

e) Paredes P09 e P10 (revestidas com argamassa "forte" + telas soldadas + conectores tipo 1 – telas nas juntas e no plano da parede).

As paredes P09 e P10 foram revestidas com argamassa "*forte*" + telas soldadas nas juntas horizontais das camadas de argamassa de assentamento e no plano da

parede (conectores tipo 1), atingindo a ruptura com carregamento de 556 kN e 583 kN, respectivamente. Em ambas as paredes , as fisssuras se apresentaram horizontais acompanhando as juntas da argamassa de assentamento onde foram colocadas as telas. Na parede P09 houve perda de material do bloco superior (septo) e um certo esmagamento da argamassa na camada do topo da parede se estendendo ao bloco (Figura 5.13).

A parede P10 apresentou além das fissuras horizontais no plano da parede, fissuras nos septos e destacamento do revestimento na parte superior da parede (Figura 5.14).

f) Paredes P11 e P12 (revestidas com argamassa "fraca" + fibras de polipropileno).

As paredes P11 e P12 foram revestidas com argamassa "fraca" + fibras de polipropileno, atingindo a ruptura com carregamento de 369 kN e 343 kN, respectivamente. As fissuras no revestimento só apareceram em níveis de cargas bastante elevados embora as forças de ruína terem sido inferiores às das paredes P03 e P04 (revestidas com argamassa fraca). A ruptura em ambas as paredes se deu por seccionamento dos septos dos blocos (Figura 5.17). As placas de revestimento não mostraram danos significativos até a proximidade da ruína.

g) Paredes P13 e P14 (revestidas com argamassa "forte" + fibras de aço).

As paredes P13 e P14 foram revestidas com argamassa "forte" + fibras de aço, atingindo a ruptura com carregamento de 463 kN e 454 kN, respectivamente. Em ambas as paredes verificou-se descolamento do revestimento, sendo que, na parede P13 tal fenômeno se manifestou de maneira mais notória.

Na parede P13 as fissuras se apresentaram horizontalmente na face que houve flambagem da placa de revestimento. Foram observadas também, fissuras verticais nos septos dos blocos (Figura 5.19). A placa de revestimento nessa face se descolou completamente da parede. Na outra face também foi observado um descolamento parcial no plano médio da parede.

Na parede P14 as fissuras se apresentavam verticalmente em ambas as faces da parede. Observou-se também descolamento do revestimento na parte superior da parede e fissuras verticais nos septos dos blocos (Figura 5.20).

h) Paredes P15 e P16 (revestidas com argamassa "forte" + telas soldadas + conectores tipo 2).

As paredes P15 e P16 foram revestidas com argamassa "forte" + telas soldadas + conectores tipo 2, atingindo a ruptura com carregamento de 518 kN e 436 kN, respectivamente. A parede P15 apresentou fissuras nos septos e perda de argamassa de revestimento na parte superior — em uma das faces da parede — e, na parte inferior - na outra face da parede. Houve destacamento total do revestimento em uma das faces da parede acarretado pela deformação excessiva dos blocos que estavam totalmente trincados em volta dos conectores como se estes fossem tubos comprimidos diametralmente (Figura 5.22).

Na parede P16 houve também perda de argamassa do revestimento na parte superior da parede e fissuras nos septos. Em ambas as paredes houve abaulamento dos blocos superiores, destacando-se assim o revestimento.

- **Documentação fotográfica das paredes P01 e P02 (sem revestimento).**

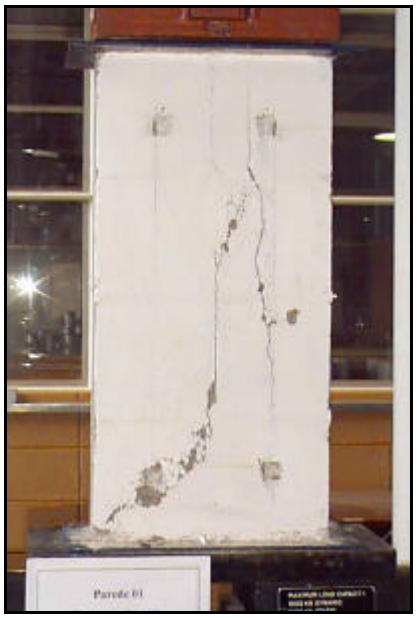


Figura 5.1 - Ruptura da parede P01.

Figura 5.2 - Ruptura da parede P02.

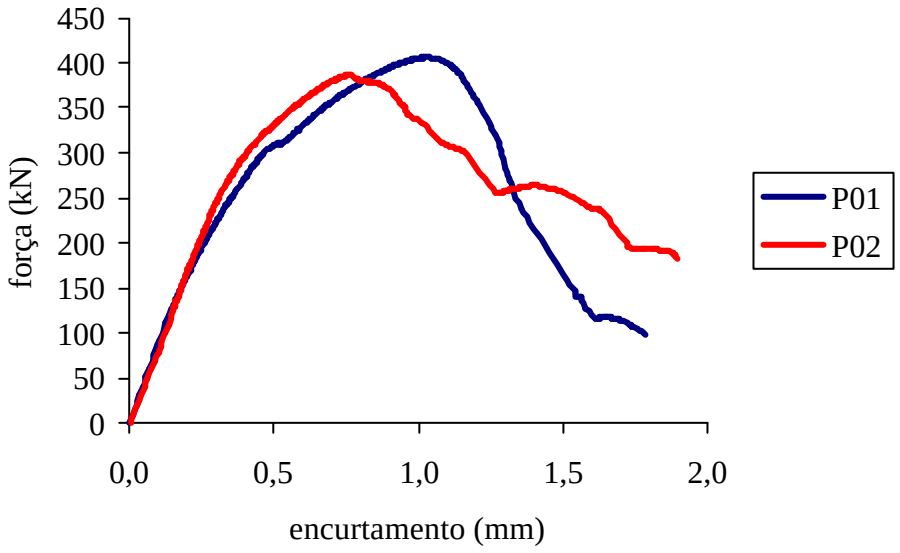


Figura 5.3 - Gráfico força x encurtamento médio das paredes P01 e P02.

- **Documentação fotográfica da parede P03 (revestida com argamassa "fraca").**

Figura 5.4 - Destacamento da 1ª fiada.

Figura 5.5 - Ruptura dos septos os blocos.

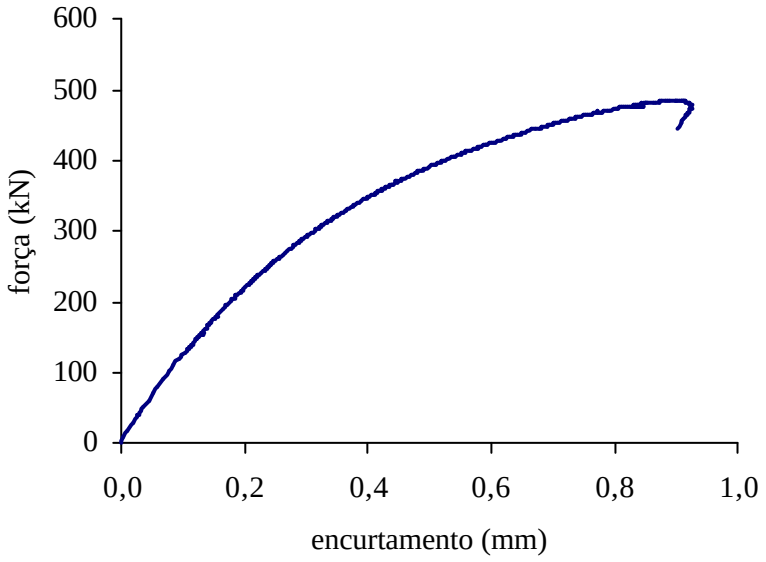


Figura 5.6 - Gráfico força x encurtamento médio da parede P03.

- **Documentação fotográfica das paredes P05 e P06 (revestida com argamassa "forte").**

Figura 5.7 - Ruptura da parede P05.

Figura 5.8 - Ruptura da parede P06.

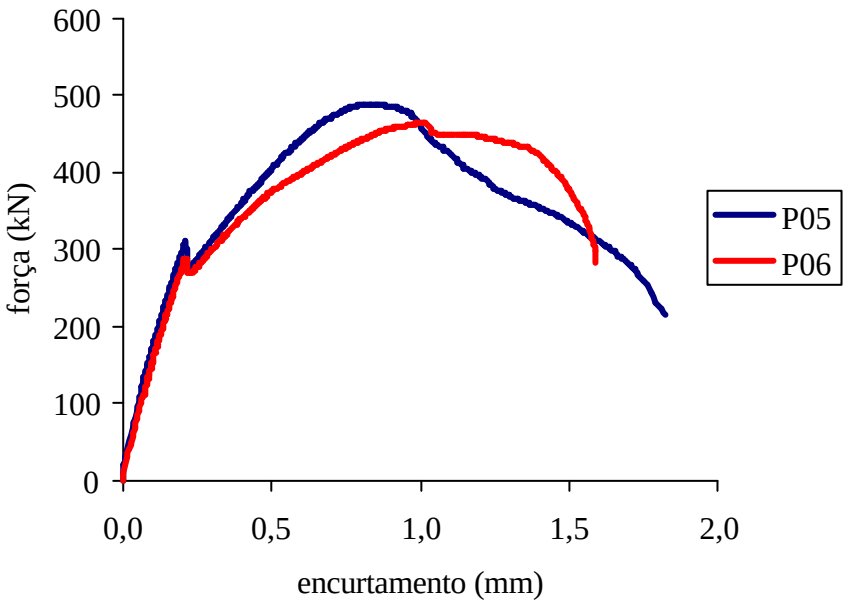


Figura 5.9 - Gráfico força x encurtamento médio das paredes P05 e P06.

- **Documentação fotográfica da paredes P07 e P08 (revestida com argamassa "forte" + telas soldadas).**

Figura 5.10 - Ruptura dos septos dos blocos parede P07.

Figura 5.11 - Ruptura dos septos dos blocos da parede P08.

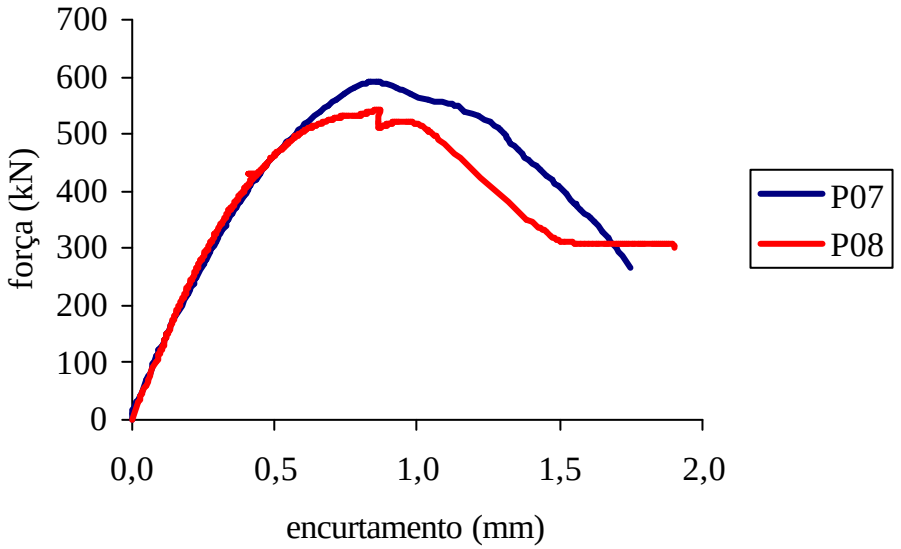


Figura 5.12 - Gráfico força x encurtamento médio das paredes P07 e P08.

- **Documentação fotográfica da paredes P09 e P10 (revestidas com argamassa "forte" + telas soldadas + conectores1).**

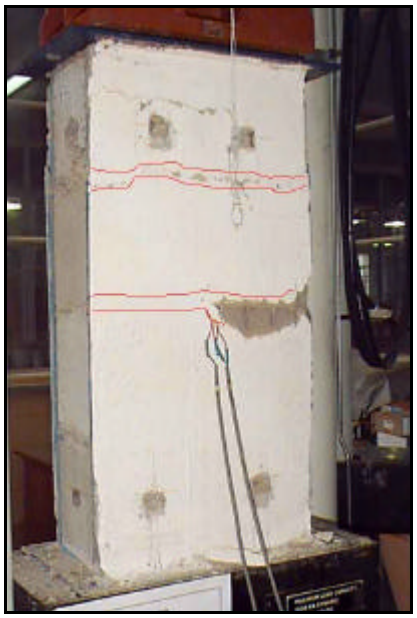


Figura 5.13 - Fissuras horizontais na P09.

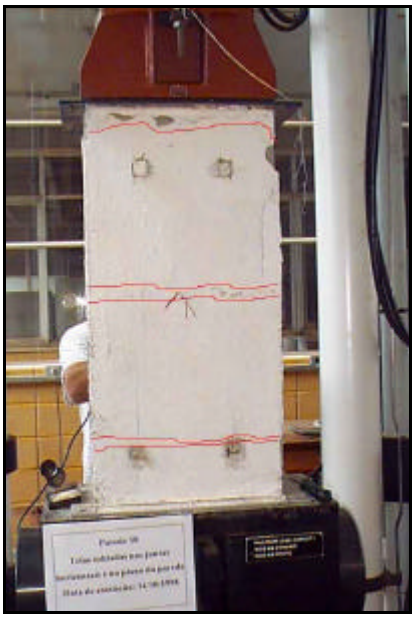


Figura 5.14 - Ruptura da parede P10.

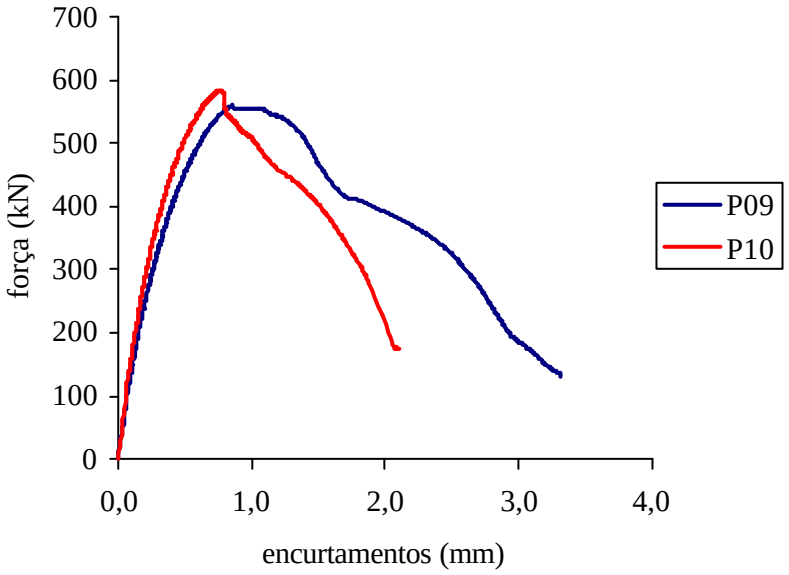


Figura 5.15 - Gráfico força x encurtamento médio das paredes P09 e P10.

- **Documentação fotográfica da paredes P11 e P12 (revestida com argamassa "fraca" + fibras de polipropileno).**

Figura 5.16 - Fissuras na parte superior da parede P12.

Figura 5.17 - Fissura nos septos dos blocos da parede P11.

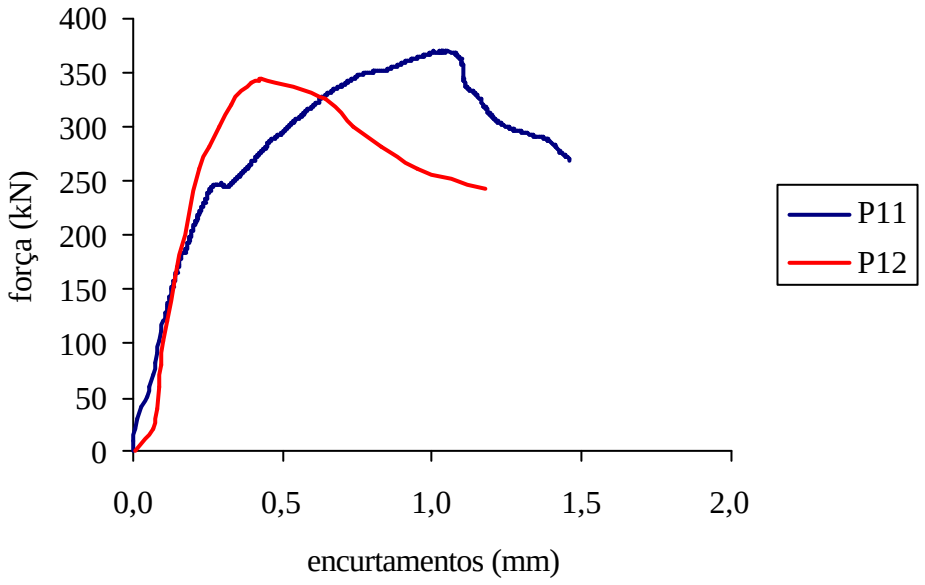


Figura 5.18 - Gráfico força x encurtamento médio das paredes P11 e P12.

- **Documentação fotográfica da paredes P13 e P14 (argamassa "forte" + fibras de aço).**

Figura 5.19 – Ruptura da parede P13

Figura 5.20 - Fissuras verticais no revestimento da P14**.**

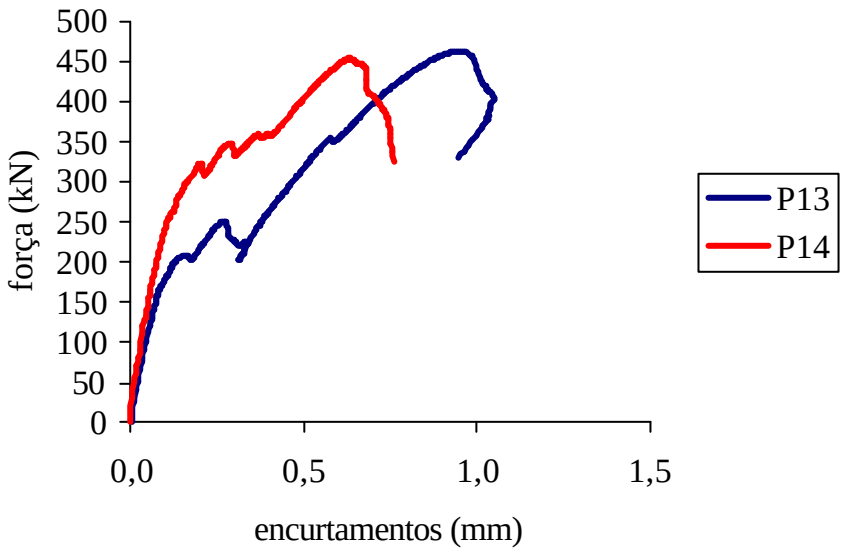


Figura 5.21 - Gráfico força x encurtamento médio das paredes P13 e P14.

- **Documentação fotográfica da paredes P15 e P16 (revestida com argamassa "forte" + telas soldads + conectores tipo 2).**

Figura 5.22 - Destacamento do na revestimento parede P15.

Figura 5.23 - Abaulamento do núcleo destacando-se do revestimento.

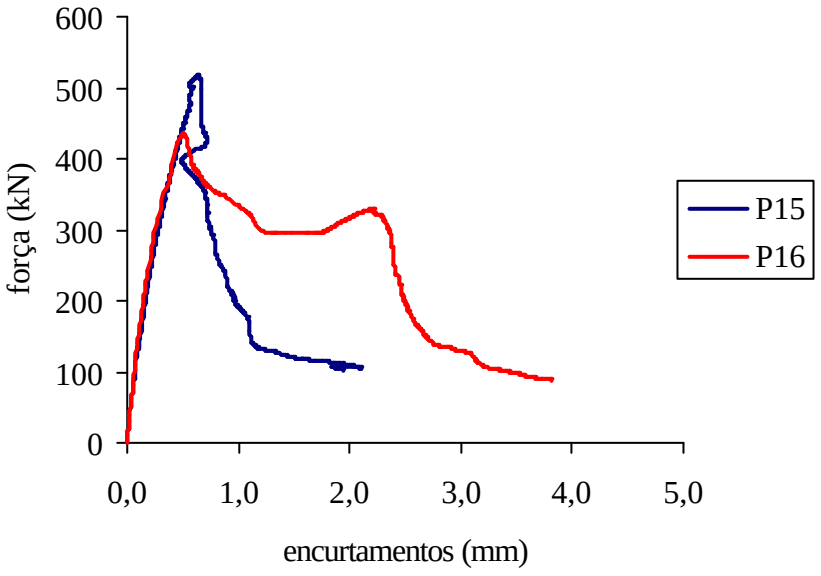


Figura 5.24 - Gráfico força x encurtamento médio das paredes P15 e P16.

5.2 Análise dos resultados

5.2.1 Análise geral

Na Tabela 5.1 estão demonstrados, de modo resumido, os resultados das *paredinhas* ensaiadas e na Figura 5.25 o gráfico *força x encurtamento* das diferentes situações estudadas. Os gráficos individuais *força x encurtamento* de cada parede estão apresentados no ***ANEXO A***.

Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios das *paredinhas* ensaiadas à compressão axial.

Condição de revestimento	**Parede**	$\mathbf{f_{arg.rev.}}$ **(MPa)**	$\mathbf{F_{máx.}}$ **(kN)**	$\mathbf{F_{med.}}$ **(kN)**	$\frac{\mathbf{F_{CR}}}{\mathbf{F_{SR}}}$
Sem revestimento	P01	—	406	397	1,00
	P02	—	387		
Argamassa "fraca"	P03	3	485	485	1,22
	P04	3	300*		
Argamassa "forte"	P05	26	489	470	1,18
	P06	24	450		
Telas soldadas	P07	24	543	568	1,43
	P08	23	592		
Telas soldadas + conectores 1	P09	23	556	570	1,44
	P10	23	583		
Argamassa "fraca" + fibras de polipropileno	P11	3	369	356	0,90
	P12	3	343		
Argamassa "forte" + fibras de aço	P13	22	463	459	1,16
	P14	23	454		
Telas soldadas + conectores 2	P15	24	518	477	1,20
	P16	24	436		

Observações:
$f_{arg.rev.}$ = resistência da argamassa de revestimento
$F_{máx.}$ = força máxima aplicada
$F_{med.}$ = carregamento médio aplicado
F_{CR} = força máxima aplicada na parede com revestimento
F_{CR} = força máxima aplicada na parede sem revestimento
* = resultado descartado

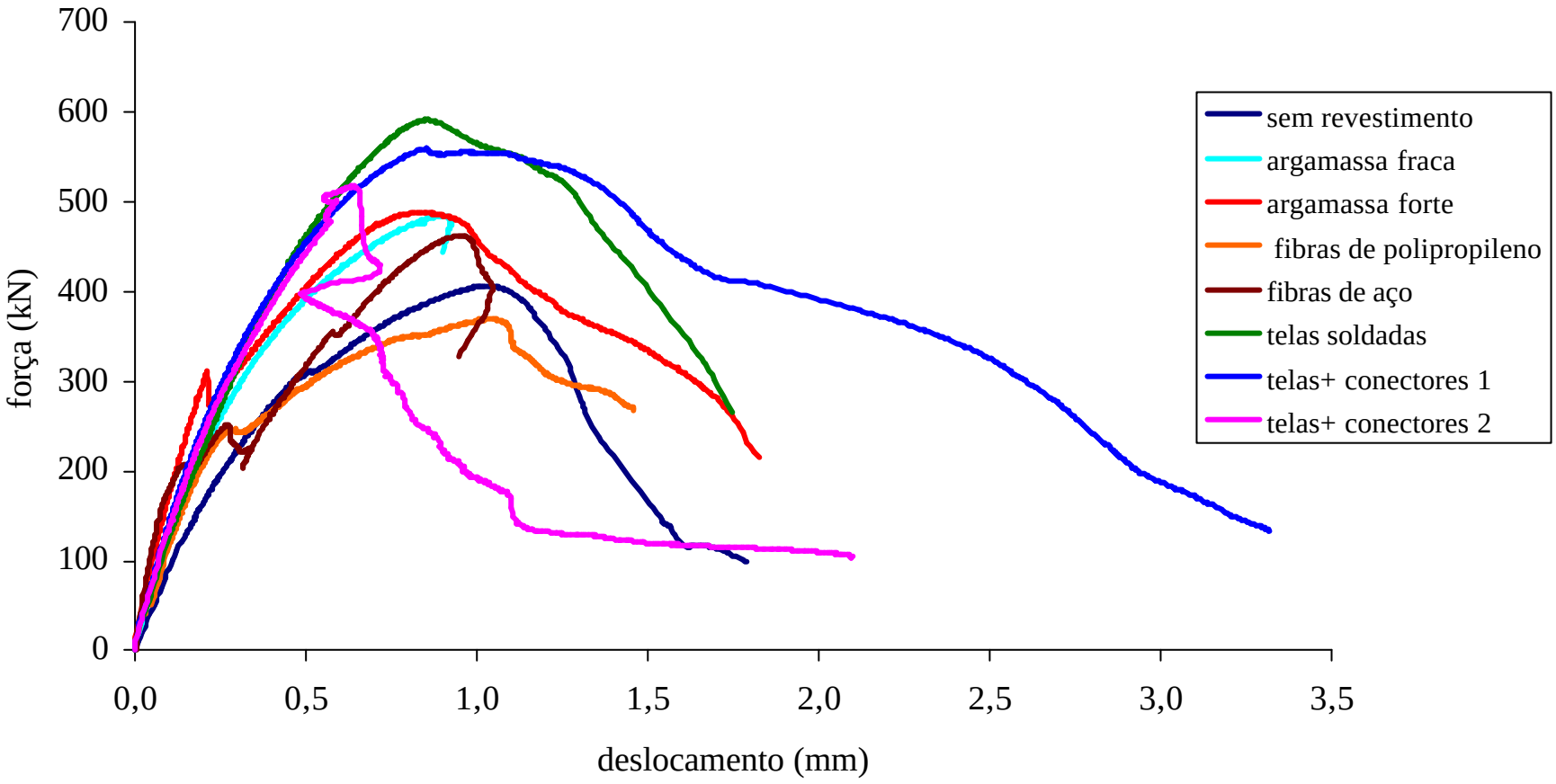


Figura 5.25 - Gráfico força x encurtamento das *paredinhas* ensaiadas à compressão axial.

Observa-se pela Figura 5.25 e pelos valores da Tabela 5.1 que a aplicação de um revestimento de argamassa simples em uma parede não revestida aumentou em apenas 20% a resistência da *paredinha*, sem se observar claramente a influência do fato de uma argamassa de revestimento ser mais resistente que a outra. As *paredinhas* revestidas com argamassas com fibras de polipropileno não tiveram sua resistência aumentada, pelo contrário, a parede mostrou até uma redução de sua resistência, a qual pode ser atribuída à defeitos de execução ou à variabilidade dos ensaios. No caso de revestimentos com fibras de aço, o acréscimo de resistência foi da mesma ordem de grandeza dos revestimentos simples com argamassa "forte". Já as *paredinhas* com telas soldadas apresentaram um acréscimo de até 44% na resistência à compressão.

De modo geral, a ruptura das paredes se dava nos septos dos blocos inferiores antecedida de fissuras verticais no plano da parede. Tal comportamento é justificado pela argamassa de assentamento ser mais deformável que o bloco. A argamassa, ao ficar submetida à compressão triaxial, impõe tensões de tração no bloco no plano horizontal por condições de equilíbrio da interface aderida. Quando o valor destas tensões ultrapassa a resistência à tração do bloco, ele fissura e provoca fissuras, também verticais, na argamassa ocasionando, desta forma, a configuração de fissuras verticais disseminadas por ocasião da ruptura das paredes.

Analisa-se a seguir separadamente cada uma das condições de revestimento.

5.2.2 Paredes sem revestimento

De acordo com a ABNT (NBR-10837), para o dimensionamento de paredes e pilares à compressão axial calcula-se as tensões normais de compressão axial atuantes e compara-se com as tensões admissíveis. Sendo assim, as cargas admissíveis em paredes de alvenaria não-armada podem ser calculadas pela seguinte expressão (já apresentada no ***Capítulo 4***):

$$P_{adm} = 0{,}20 f_p \left[1 - \left(\frac{h}{40t} \right)^3 \right] A$$

Pretendendo-se estimar com essa expressão a máxima força admissível no ensaio de uma *paredinha* sem revestimento, pode-se adotar a tensão máxima de compressão admissível igual à resistência do prisma de alvenaria ensaiado (f_p = 8 MPa), desconsiderando-se o coeficiente de segurança de projeto que está implícito nessa expressão. Tem-se então:

- para parede sem revestimento:

$$P_{adm} = 0{,}8\left[1-\left(\frac{81}{40.14}\right)^3\right].546 = 435\,\text{kN} \rightarrow \text{carga máxima prevista}$$

$$f_{alv\,c} = 0{,}8\left[1-\left(\frac{81}{40.14}\right)^3\right] = 0{,}8\,\text{kN/cm}^2 \rightarrow \text{tensão máx. de compressão axial}$$

Nos ensaios realizados nas paredes sem revestimento observou-se que elas apresentaram modo de ruína muito parecidos, salvo pela ruptura dos septos dos blocos inferiores da parede P02. As paredes P01 e P02 atingiram a ruptura com força máxima de 406 kN e 387 kN, respectivamente. Ambas apresentaram resistência de cerca de 7 MPa, referindo-se à área bruta.

O valor da carga máxima encontrado nos ensaios foi inferior ao calculado pela fórmula da NBR 10837, mas pode-se dizer que a estimativa foi razoável, apresentando uma diferença máxima de 11%. Esta diferença pode ser atribuída ao fato de que as *paredinhas* apresentam uma tendência de maior número de defeitos que os prismas de referência e também estão mais sujeitas a efeitos de excentricidades acidentais.

Quanto à deformabilidade das paredes sem revestimento P01 e P02, verifica-se pelo gráfico da Figura 5.26 que as curvas de deformação são iguais até um carregamento de 210 kN. A partir daí elas se distanciam um pouco, talvez pelo fato da parede P02 ter apresentado uma ruptura mais cedo nos septos dos blocos tornando-a menos resistente que a parede P01. Ressalta-se que nas análises comparativas apresentadas a seguir, tomou-se como referência a parede P01 por esta ter apresentado carga de ruptura maior que a parede P02.

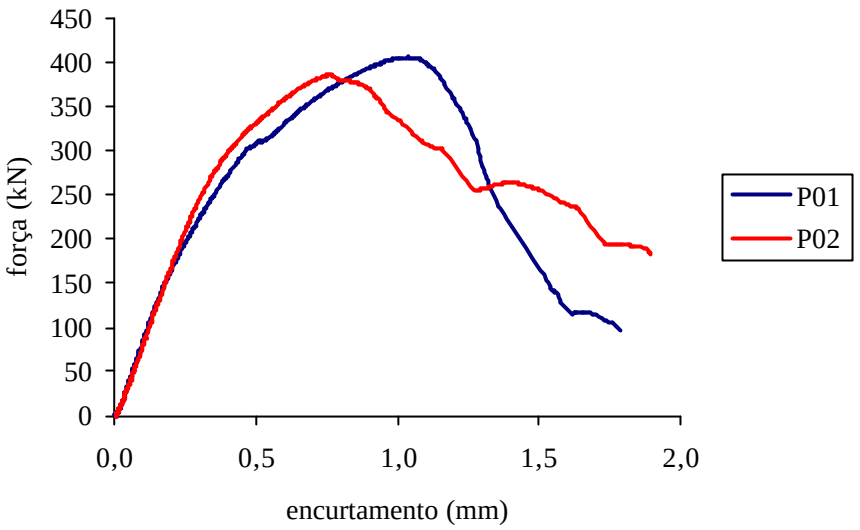


Figura 5.26 – Gráficos *força x encurtamento* das paredes sem revestimento.

5.2.3 Desenvolvimento de uma formulação teórico-experimental de referência

No caso de paredes com revestimentos de argamassa simples, pode-se verificar que eles proporcionaram mais rigidez às *paredinhas*, com um pequeno acréscimo de resistência (Figura 5.27). Parte desse acréscimo também se deve à diminuição da esbeltez da parede ocasionada pelo aumento da espessura da parede com o acréscimo das placas do revestimento. Todavia, o fato de um revestimento ser mais resistente que o outro, não aumentou a resistência da *paredinha* na mesma proporção.

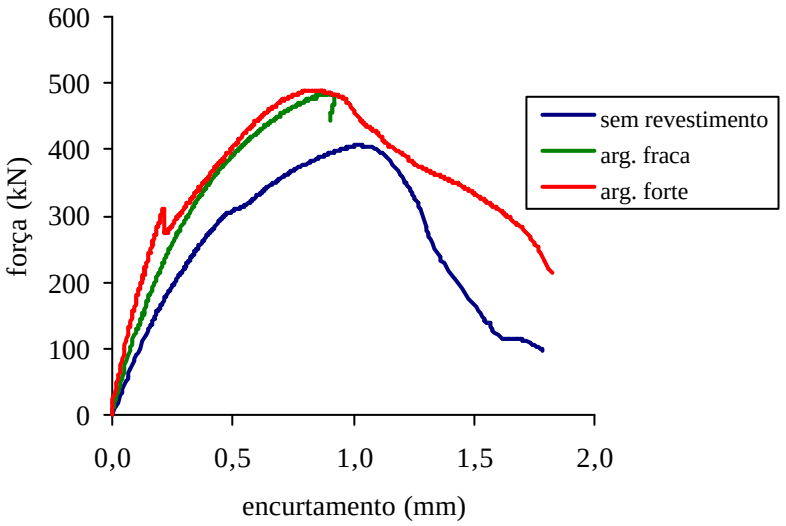


Figura 5.27 – Gráfico *força x encurtamento* das paredes revestidas com argamassa simples.

Observando-se a Figura 5.28, onde estão representadas as curvas *tensão x deformação* das argamassas simples dos revestimentos utilizados e da parede sem revestimento, nota-se que para o valor do encurtamento de ruptura da parede sem revestimento há diferentes níveis de tensão para as argamassas de revestimento.

Pode-se notar então que, no caso de revestimento de argamassa "forte", quando a parede atinge sua capacidade máxima de tensão, a argamassa do revestimento ainda não atingiu o seu limite de resistência. Sendo assim, provavelmente o núcleo constituído pela parede passa a ficar sujeito a um processo de fissuração e instabilidade interna antes mesmo que o revestimento sofra danos significativos. A interação entre o núcleo e o revestimento acarreta também fissuras no revestimento e a conseqüente ruptura do conjunto parede + revestimento, sem que a argamassa de revestimento consiga desenvolver todo o seu potencial de resistência.

Já na situação do revestimento de argamassa fraca, esta atinge seu limite de resistência muito antes da parede, mas por outro lado demonstra ductilidade suficiente para continuar resistindo até a ruína do núcleo. Não se acrescenta assim muita contribuição na resistência final do modelo, mas aumenta-se um pouco a rigidez inicial e o conjunto parede + revestimento aparentemente permanece solidário ao longo de todo o processo de solicitação.

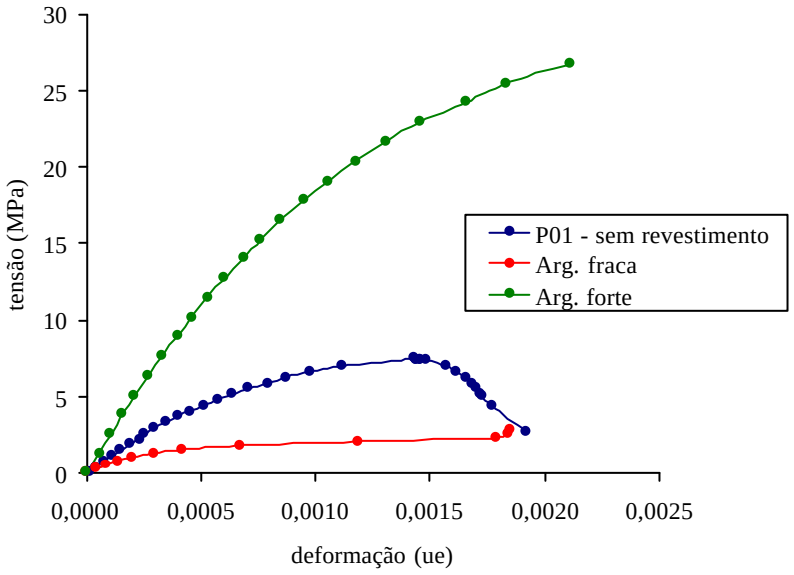


Figura 5.28 - Gráfico tensão x deformação da parede sem revestimento e das argamassas simples do revestimento.

Tomando-se como base os gráficos da Figura 5.28, representativos do comportamento da parede sem revestimento (P01) e dos corpos-de-prova cilíndricos das argamassas de revestimento submetidos a ensaios de compressão uniaxiais, tentou-se realizar uma análise aditiva de resistência, ou seja, procurou-se avaliar a capacidade resistente do conjunto (parede + revestimento) somando as parcelas resistidas por cada uma das partes. Neste sentido, determinou-se para cada nível de deformação específica os valores de tensão no núcleo e no revestimento, calculando-se a partir dessas tensões as parcelas de força resistidas.

Assim, a partir dos gráficos *tensão x deformação* da parede sem revestimento e das argamassas simples do revestimento obteve-se os gráficos *força x deslocamento* correspondentes à hipótese aqui chamada de *"formulação aditiva"*. Os valores encontrados para a transformação dos gráficos foram obtidos multiplicando-se a tensão obtida nos corpos-de-prova pela área das camadas de revestimento (2 x 2 cm x 39 cm = 156 cm^2). Os valores das deformações foram multiplicados pela distância (590 mm) em que foram medidos os encurtamentos nas paredes durante os ensaios em laboratório (Figura 5.29). Esses resultados estão apresentados em forma de tabelas no ***ANEXO E***.

Para se conseguir as parcelas de força correspondentes a um mesmo deslocamento, interpolou-se os pontos das três curvas (parede, argamassa fraca e argamassa forte) e para se obter as curvas referentes à *formulação aditiva* somou-se a força da parede sem revestimento com as forças encontradas nos casos das argamassas forte e fraca. A interpolação foi necessária para se estabelecer o mesmo conjunto de valores de deslocamentos para obtenção das três curvas.

Com a adoção dessa hipótese, foram obtidas curvas *força x deslocamento de paredes revestidas com argamassa forte e com argamassa fraca*, sendo que em seguida estes resultados foram comparados com os resultados experimentais obtidos.

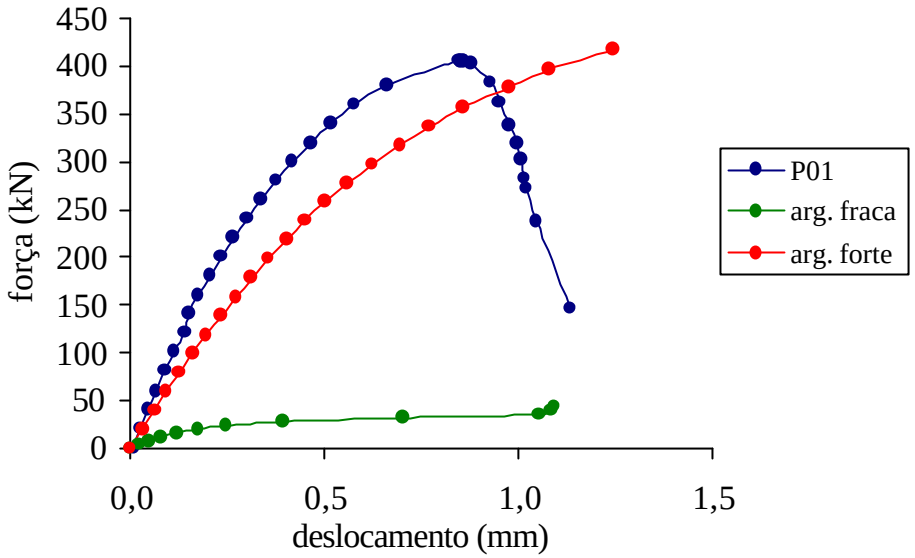


Figura 5.29 - Gráficos força x deslocamento da parede sem revestimento (experimental) e dos revestimentos de argamassa simples (teóricos).

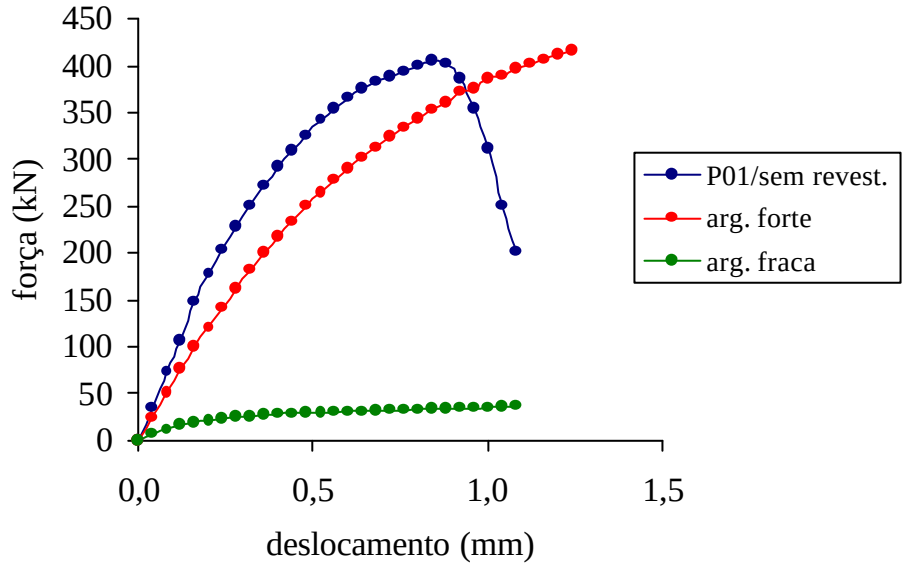


Figura 5.30 - Gráficos força x deslocamento da parede sem revestimento e dos revestimentos de argamassas simples, depois da interpolação.

5.2.4 Paredes revestidas com argamassa simples

Retomando a análise das paredes revestidas com argamassa simples, ressalta-se que embora não tenha havido diferenças significativas no valor do acréscimo de

resistência com os distintos revestimentos, observou-se que a ruptura se deu de maneira diferente. A *paredinha* revestida com argamassa "fraca" não apresentou um quadro de fissuração tão evidente como o da *paredinha* revestida com argamassa "forte".

Na parede P03 (revestida com argamassa fraca) a instabilidade total do modelo foi atingida, ocorrendo no final do ensaio a separação da parede por um plano passando pelos septos. As forças encontradas na formulação aditiva foram menores do que a parede ensaiada em laboratório (Figura 5.31). É possível que tenha havido um acréscimo de resistência na argamassa projetada na parede em relação à argamassa moldada no corpo-de-prova. Talvez esse acréscimo se deva ao fato do bloco de concreto ser poroso e absorver água da argamassa de revestimento tendendo a aumentar sua resistência. Todavia, comparando-se a curva teórica com a experimental, pode-se dizer que o deslocamento na ruína, foi bem previsto.

As paredes revestidas com argamassa forte apresentaram fissuras verticais nas faces da parede (revestimento). Além disso, a parede P06 apresentou também fissuras nos septos dos blocos. Observando-se o gráfico da Figura 5.31 nota-se que houve uma descontinuidade na curva *força x deslocamento* em ambas as paredes, para uma força de cerca de 300 kN. Observa-se também que mesmo depois de atingida a carga máxima as paredes ainda apresentaram uma certa capacidade de deformação, mostrando ductilidade.

Quanto à curva da formulação aditiva, as paredes P05 e P06 não conseguiram atingir o mesmo patamar de resistência prevista para o caso da argamassa forte, possivelmente devido à instabilidade dos componentes envolvidos (aparentemente do núcleo) quando começa a fase plástica de comportamento do modelo. A deformabilidade representativa da formulação aditiva foi coincidente com as curvas experimentais até um carregamento de aproximadamente de 300 kN. Após a possível instabilidade dos componentes internos, as curvas apresentaram um maior distanciamento. A ductilidade obtida nas paredes revestidas com argamassa forte após atingir a ruína foi maior do que a prevista na formulação aditiva.

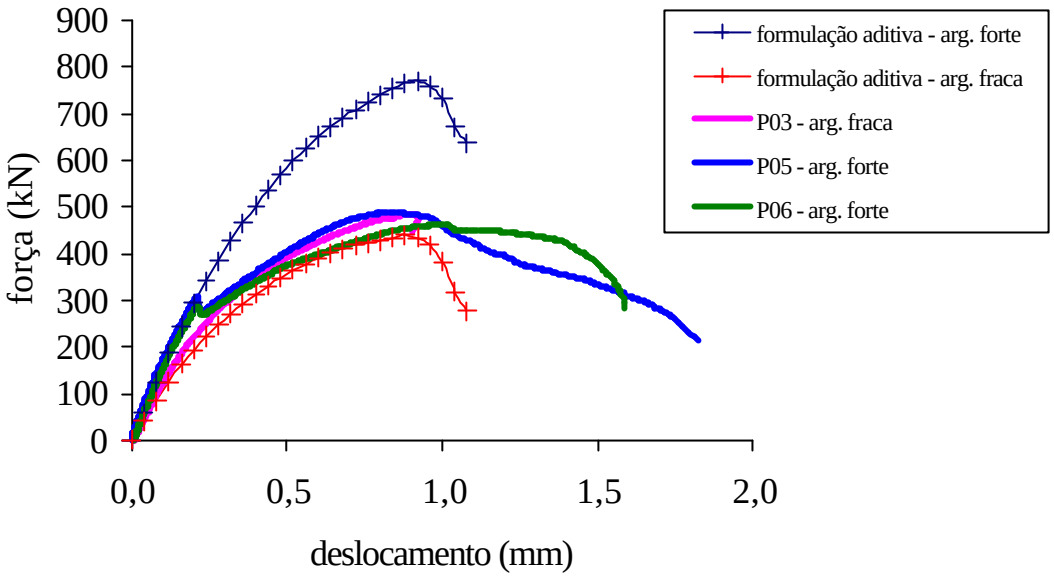


Figura 5.31 – Gráficos das paredes revestidas com argamassa simples e da formulação aditiva

5.2.5 Paredes revestidas com argamassa com fibras

As paredes revestidas com argamassa fraca e fibras de polipropileno aparentemente apresentaram ruptura inicial no núcleo, com fissuração dos septos dos blocos, tendendo a separar a parede em duas partes, o que veio a causar uma instabilidade geral no modelo. Não houve danos significativos no revestimento. Ambas apresentaram carga de ruptura menor que a parede sem revestimento embora tenha sido observado um aumento no valor da carga da primeira fissura. Nessa situação o revestimento não acrescentou nenhuma melhoria às paredes. O mau resultado talvez tenha sido causado pela má aderência entre revestimento e substrato e presença de vazios causados pela adição de fibras, ou ainda, algum provável erro de moldagem do modelo. Pode-se dizer que as curvas das parede P11 e P12 estão coerentes com a formulação aditiva até um certo nível de carga, cerca de 240 kN (Figura 5.32). A parede P11 apresenta um pouco mais de rigidez desde o início distanciando-se da curva teórica com um carregamento de 240 kN. A parede P12 apresenta-se menos rígida no começo e ganha rigidez com um carregamento aproximado de 130 kN. Isso significa que algum componente que não estava

resistindo no início do ensaio passou a resistir depois de um certo acréscimo de carga (provável erro moldagem). A partir desse carregamento a curva experimental da parede P12 passa a se distanciar da curva teórica.

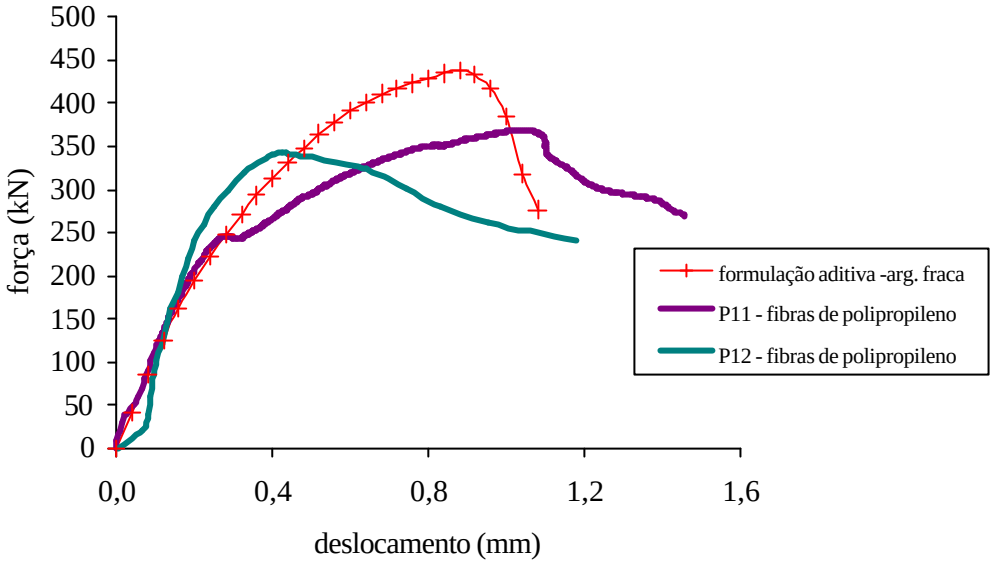


Figura 5.32 - Gráficos das paredes revestidas com argamassa fraca e fibras de polipropileno e da formulação aditiva.

As paredes revestidas com argamassa forte e fibras de aço apresentaram descolamento do revestimento e romperam provavelmente por colapso do núcleo. Foi a única situação em que se observou o descolamento do revestimento. Talvez, mais uma vez, as fibras tenham piorado a aderência entre o substrato e as placas de argamassa e tornado a argamassa mais porosa. Apesar disso, ambas apresentaram carga de ruptura superior à da parede sem revestimento. Pode-se dizer que o deslocamento de ruína da parede P13 e o dado pela formulação aditiva são coincidentes. As deformações das paredes são compatíveis com a formulação aditiva até um carregamento de aproximadamente 200 kN (Figura 5.33).

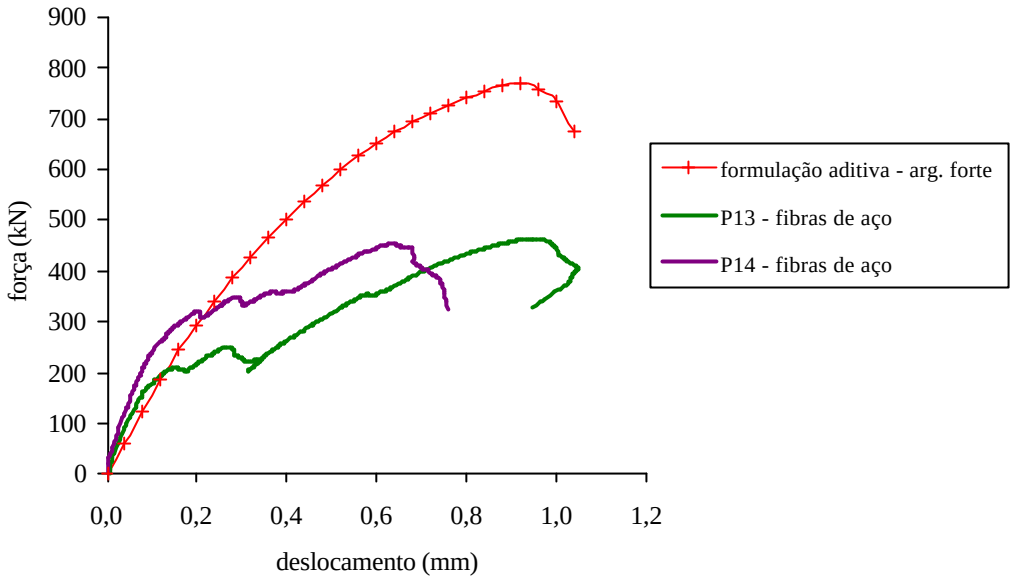


Figura 5.33 - Gráficos das paredes revestidas com argamassa forte e fibras de aço e da formulação aditiva.

5.2.6 Paredes revestidas com argamassa forte e telas soldadas

As paredes revestidas com argamassa forte e telas soldadas sem conectores apresentaram ruptura por seccionamento dos septos dos blocos. As fissuras nos revestimentos foram poucas e quando apareciam eram verticais e paralelas à aplicação do carregamento. As cargas de ruptura foram bem maiores que nas paredes sem revestimento (≅ 44% maiores). Talvez essa melhora de comportamento se deve ao fato de que as telas tenham controlado de alguma forma a fissuração nas paredes e na argamassa de revestimento retardando assim a instabilidade dos componentes envolvidos. Nessa situação o revestimento funciona como uma "*camisa*" inibindo parte das deformações e tornando a parede mais rígida e com maior capacidade de deformação.

Observa-se na Figura 5.34 que as curvas *força x deslocamento* das paredes P07 e P08 se apresentaram bem mais lineares e proporcionais à curva da formulação aditiva, embora tenham apresentado menor rigidez. A capacidade resistente das paredes foi menor do que a apresentada na curva teórica mas, a ductilidade nas paredes experimentais foi bem maior do que a da formulação aditiva.

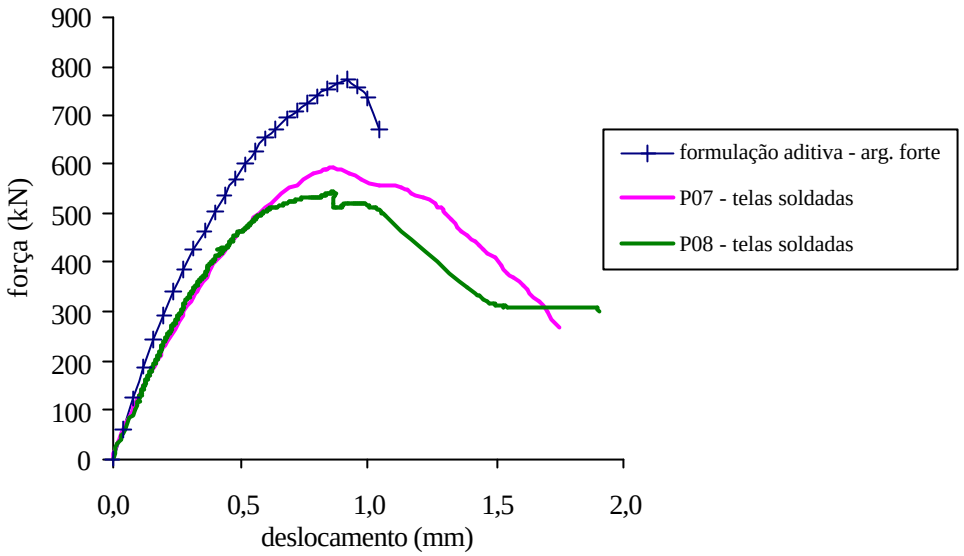


Figura 5.34 - Gráficos das paredes revestidas com argamassa forte e telas soldadas e da formulação aditiva.

As paredes P09 e P10 romperam apresentando fissuras horizontais no revestimento, acompanhando as camadas de assentamento, onde estavam localizados os conectores tipo 1 (telas soldadas). Pode-se dizer que as paredes apresentaram resistência média igual à das paredes com telas sem conectores. A deformabilidade da parede P10 coincide com a formulação aditiva até um carregamento de 380 kN. Mesmo apresentando um distanciamento da curva teórica desde o início do carregamento, a parede P09 apresentou uma deformabilidade coerente com o modelo da formulação aditiva até atingir a instabilidade dos componentes envolvidos (Figura 5.35).

As paredes P15 e P16 não apresentaram um comportamento pós-pico satisfatório, embora o gráfico da P16 mostre uma certa ductilidade. As fissuras verticais que apareciam no topo da parede ao alcançar os conectores ocasionavam trincas ao seu redor fazendo com que o bloco se deformasse lateralmente. A carga média de ruína alcançada, apesar de ser maior que a da parede sem revestimento, foi praticamente igual à das paredes revestidas com argamassa simples. A deformabilidade de ambas coincide com a curva da formulação aditiva até um carregamento de aproximadamente de 210 kN (Figura 5.36).

Observa-se que em todos os casos a formulação aditiva é muito coerente com os dados experimentais encontrados em laboratório em um certo intervalo de força. Ou

seja, acredita-se que essa coerência seja verificada apenas na fase elástica, onde ainda não se tem nenhum fenômeno de instabilidade envolvido. Quando o modelo começa a apresentar fissuras, mesmo que estas não sejam visíveis externamente, está caracterizado um estado de instabilidade interna dos materiais envolvidos, já que estes passam a apresentar superfícies de fratura, perdendo paulatinamente sua estabilidade e capacidade resistente.

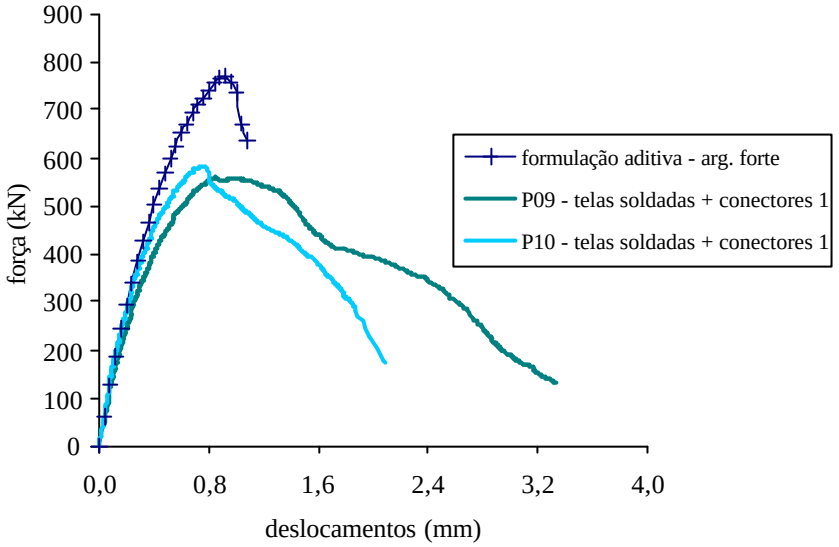


Figura 5.35 - Gráficos das paredes revestidas com argamassa forte + telas soldadas + conectores1 e da formulação aditiva.

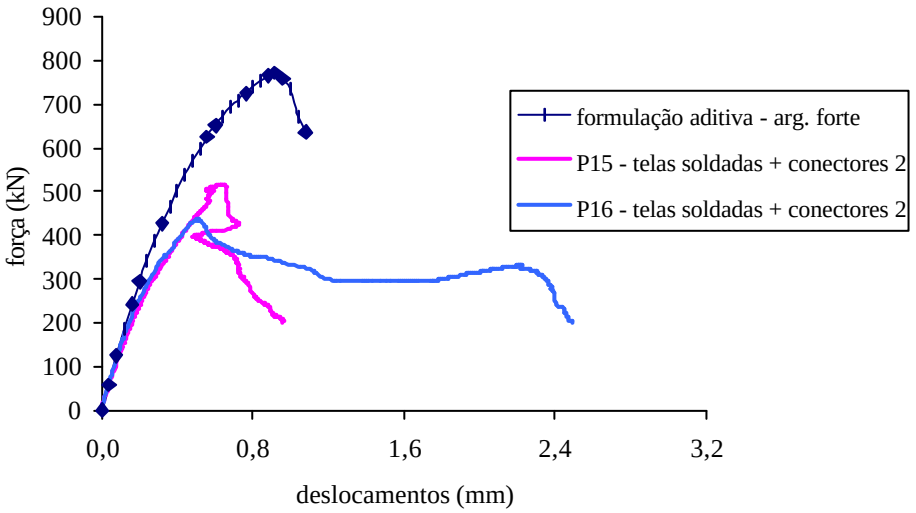


Figura 5.36 - Gráficos das paredes revestidas com argamassa forte + telas soldadas + conectores 2 e da formulação aditiva.

5.3. Análise numérica

Para a análise teórica linear de *paredinhas* de alvenaria de blocos de concreto submetidas à compressão axial foram modelados exemplos com as mesmas dimensões da parede ensaiada em laboratório (39 x 14 x 81 cm).

O primeiro modelo a ser analisado foi o das *paredinhas* sem revestimento submetidas a solicitações de compressão axial. As solicitações foram introduzidas pela aplicação de um uma tensão de 0,74 kN/cm^2 que eqüivale a um carregamento de 406 kN, uniformemente distribuído pela seção transversal da parede. Tal valor foi baseado nos resultados obtidos nos ensaios realizados em laboratório para as paredes sem revestimento.

Nesse exemplo, foram consideradas propriedades distintas para bloco e argamassa (modelo teórico 1). Os blocos discretizados possuem dimensões de 39 x 14 x 19 cm e a argamassa de assentamento tem 1 cm de espessura (Figura 5.37). Ressalta-se que todos os blocos foram considerados maciços. As propriedades dos materiais utilizados – descritas na Tabela 5.2 — foram obtidas em laboratório pelo ensaios de blocos e corpos-de-prova da argamassa de assentamento.

O módulo de elasticidade aparente do bloco foi obtido em relação à área bruta (A=546 cm^2). Para a argamassa de assentamento foi utilizado o módulo de elasticidade aparente relativo à área bruta do bloco obtido através da expressão a seguir:

$$E_{ap,arg,ass} = \frac{A_{liq,bloco}}{A_{br,bloco}} \text{ x } E_{arg,ass}$$

Onde:

$E_{ap,arg,ass}$ = módulo de elasticidade aparente da argamassa de assentamento, relativo à área bruta do bloco;

$Al_{iq,bloco}$ = área líquida do bloco (271,44 cm^2);

$A_{br,bloco}$ = área bruta do bloco (546 cm^2);

$E_{arg.ass.}$ = módulo de elasticidade da argamassa de assentamento obtido pelo ensaio de corpos-de-prova cilíndricos 5 x10 cm (1.061,80 kN/cm^2).

$$E_{ap,arg.ass} = \frac{271,44}{546} \text{ x } 1.061,8 = 527,87 \text{ kN/cm}^2$$

Tabela 5.2 - Propriedades dos materiais

	Bloco	Argamassa de assentamento	Argamassa fraca de revestimento	Argamassa forte de revestimento
Módulo de elasticidade (kN/cm^2)	E = 921,3 (aparente)	E = 527,87 (aparente)	E = 500	E = 2.171
Coeficiente de Poisson	ν = 0,2	ν = 0,2	ν = 0,2	ν = 0,2

O elemento sólido utilizado – cujas características já foram descritas no ***Capítulo 4*** – foi o SOLID 65. A malha gerada possui 8.096 nós e 6.615 elementos (Figura 5.32). As placas de ensaio foram consideradas infinitamente rígidas, restringindo-se os nós da base nas direções ***x, y*** e ***z*** e no topo nas direções ***x*** e ***z***, forçando-se os nós do topo a deslocamentos iguais na direção **y.**

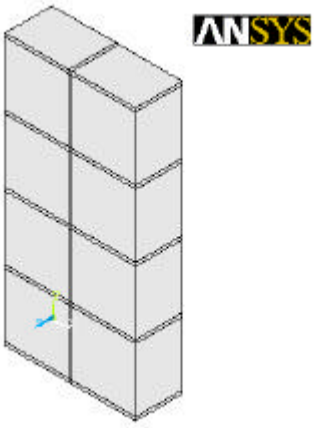


Figura 5.37 – parede analisada (situação 1).

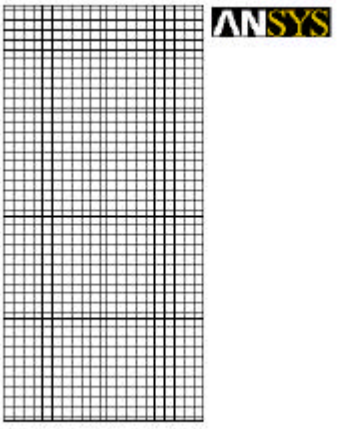


Figura 5.38 – malha discretizada.

Analisando-se a Figura 5.39 verifica-se que os maiores deslocamentos encontram-se no topo da parede, diminuindo à medida que se aproxima da base. Quanto às deformações, verifica-se que a argamassa das juntas horizontais deforma-se mais do que os blocos e até mesmo do que a argamassa das juntas verticais.

Observa-se o aparecimento de tensões de tração nas direções (***x*** e ***z***). Em ambas as direções surgem tensões de compressão na base e no topo da parede devido à interferência dos apoios. As maiores tensões σ_x se localizam na largura dos blocos próximas das juntas horizontais e no plano da parede (Figura 5.41). As maiores tensões σ_z se localizam nas paredes dos blocos em uma área também muito próxima das juntas horizontais. Observa-se também tensões de tração na região da largura dos blocos em torno da junta de argamassa (Figura 5.42).

Com essa configuração de tensões, provavelmente iriam aparecer fissuras verticais no plano e na largura dos blocos pois, como a argamassa é menos rígida que os blocos, ou seja, apresenta uma maior deformação sob carga ela tende a ser "expulsa" por estes. A deformação induzida na argamassa produz, consequentemente, tensões laterais tangenciais ao plano da junta. Estas tensões são restringidas pelas unidades de alvenaria, as quais ficam assim submetidas a tensões de tração lateral que, se suplantarem a resistência do bloco, provocam a ruptura através do desenvolvimento de fissuras por tração paralelas ao eixo do carregamento.

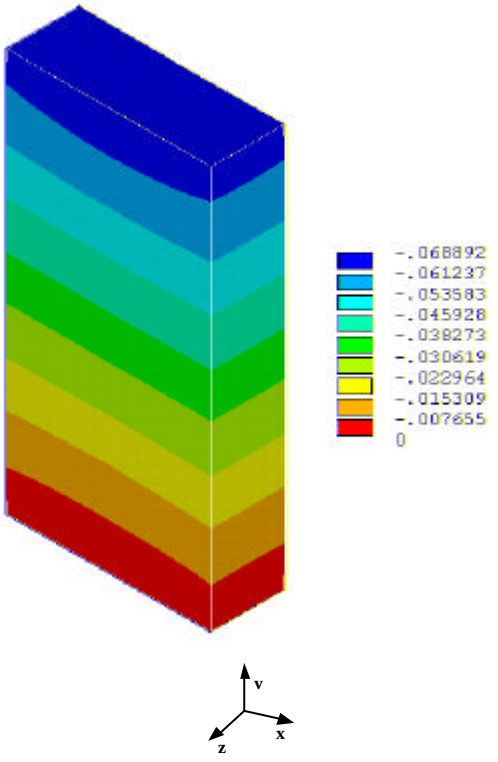


Figura 5.39 – Deslocamento na direção ***y***.

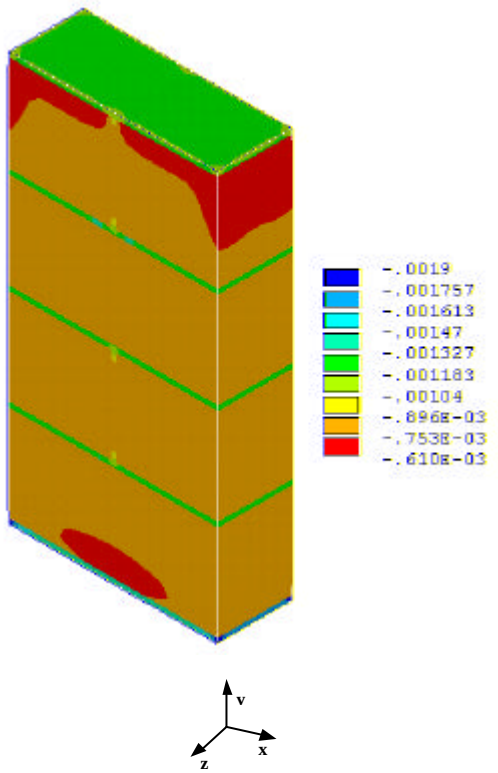
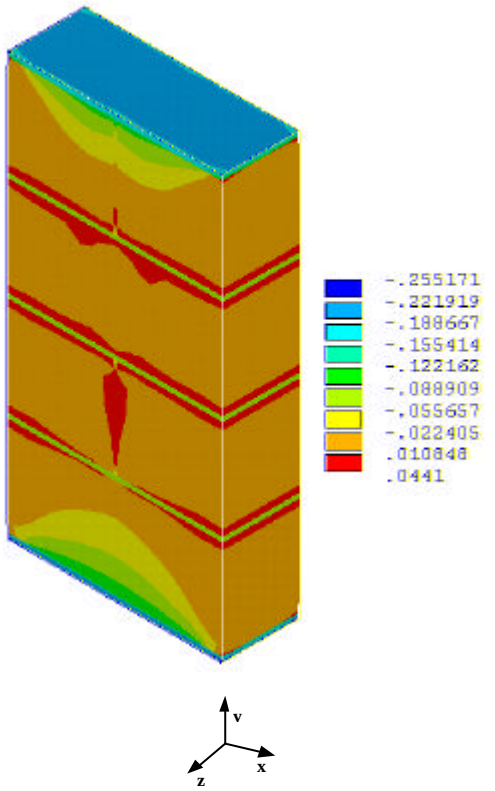


Figura 5.40 – Deformação na direção ***y***.



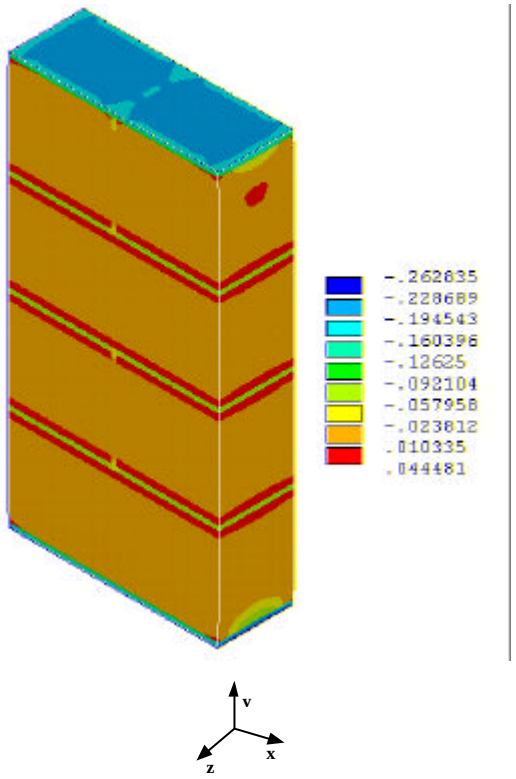


Figura 5.41 – Distribuição das tensões σ_x. Figura 5.42 – Distribuição das tensões σ_z.

Uma segunda situação também foi estudada tentando-se compatibilizar os valores obtidos experimentalmente com os encontrados na análise teórica realizada. Para isso analisou-se um modelo constituído por um único material equivalente ao da parede ensaiada (modelo teórico 2). Adotou-se então um módulo de elasticidade do conjunto da parede (bloco + argamassa) obtido em laboratório nos ensaios à compressão de *paredinhas* não revestidas. Não foram discretizadas as camadas de argamassa de assentamento e idealizou-se a estrutura composta apenas por um tipo de material (Figura 5.43). As propriedades adotadas foram: E_{pa} = 936,5 kN/cm^2 e ν_{pa} = 0,20, as quais refletem aproximadamente o comportamento global conjunto dos materiais bloco + argamassa. Esse valor foi retirado do gráfico *tensão x deformação* experimental e corresponde ao módulo de elasticidade secante 40% da tensão máxima alcançada pela parede.

A malha discretizada possui 5.740 elementos e 7.056 nós (Figura 5.38). Foi aplicada uma tensão de 0,74 kN/cm^2 no topo da parede equivalente a uma força de 406 kN (carregamento máximo aplicado na parede ensaiada). Os encurtamentos

apresentados no gráfico da Figura 5.45 referem-se às faixas de 11 a 70 cm a partir da base do modelo. Observa-se que, na fase linear, os dois modelos se comportaram de maneira semelhante ao da parede ensaiada em laboratório até um nível de solicitação de 40 % da sua capacidade resistente.

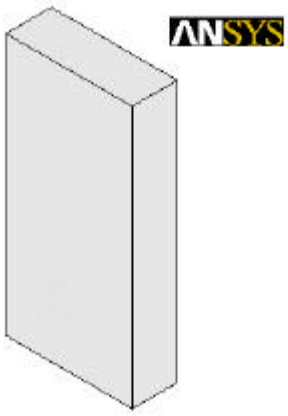


Figura 5.43 – parede analisada (situação 2).

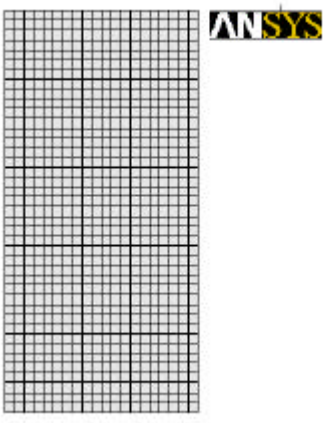


Figura 5.44 – malha discretizada (parede sem revestimento).

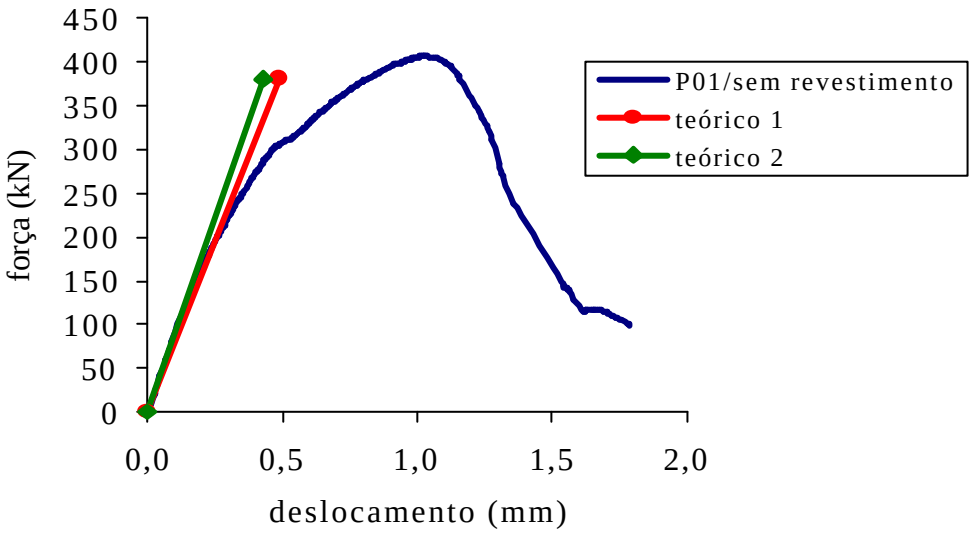


Figura 5.45 – Gráfico força x deslocamento das paredes sem revestimento (análise teórica x análise experimental).

O mesmo procedimento para análise deste modelo foi aplicado também para as paredes revestidas. O módulo de elasticidade considerado para as placas de revestimento foram os mesmos encontrados em laboratório para caracterização da argamassa "fraca" ($E_{arg.fraca}$ = 500 kN/cm^2) e da argamassa "forte" ($E_{arg.forte}$ = 2.171

kN/cm^2). Nessas situações a malha possui 7.380 elementos e 8.820 nós. O carregamento aplicado correspondia aos valores máximos da força encontrada nos ensaios das paredes revestidas com argamassa "fraca" e "forte", ou seja, 489 kN e 485 kN, respectivamente. Observando-se o gráfico força x deslocamento da Figura 5.48 verifica-se que as simulações teóricas realizadas considerando-se tanto o revestimento de argamassa "forte" como o revestimento de argamassa "fraca" apresentou comportamento linear muito parecido ao experimental em toda a fase elástica do modelo (Figura 5.48).

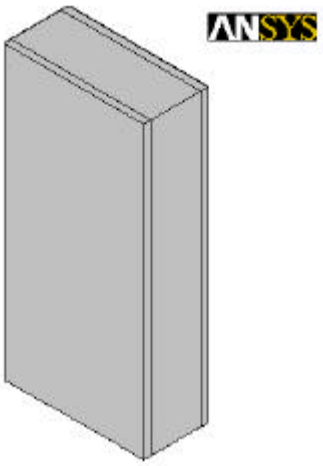


Figura 5.46 – Parede analisada com revestimento.

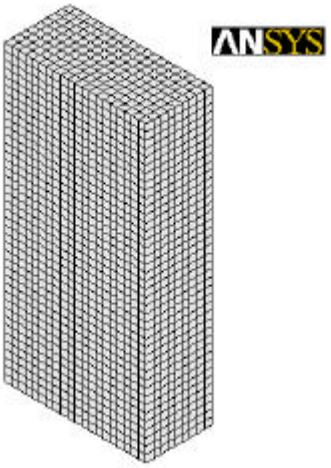


Figura 5.47 – Malha discretizada (parede revestida).

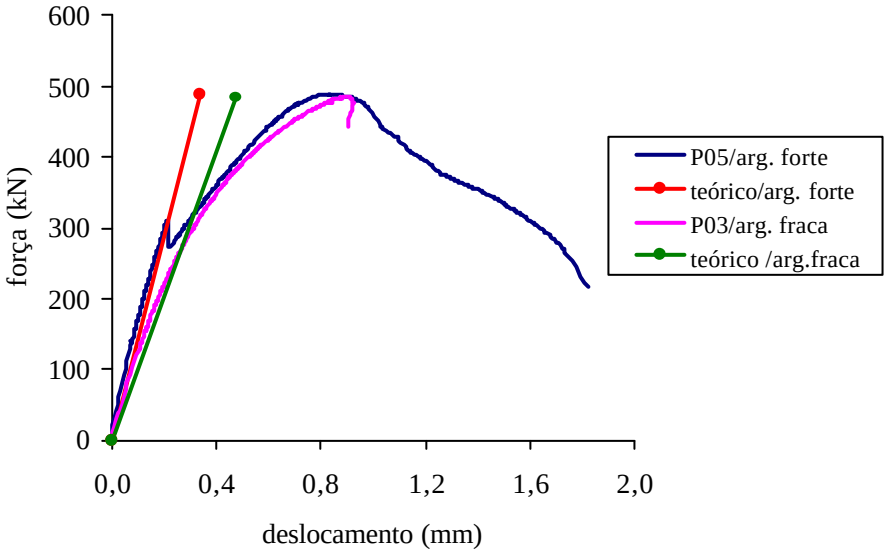


Figura 5.48 – Gráficos força x deslocamento das paredes revestidas (análise experimental x análise teórica).

Considerando-se agora que a parede de alvenaria se comporta como um elemento composto de diferentes componentes (blocos e camadas de argamassa) associados em série (Modelo de Reuss). Com essa consideração, pode-se obter um módulo de elasticidade equivalente calculado conforme as expressões demonstradas no ***Capítulo 4***. Com os valores dos módulos de elasticidade do bloco e da argamassa de assentamento demonstrado na Tabela 5.2 para o modelo teórico 1 tem-se:

$$\frac{V_p}{E_p} = \frac{V_b}{E_b} + \frac{V_a}{E_a} \qquad \frac{V_p}{E_p} = \frac{40.964}{921,30} + \frac{3.262,00}{527,87}$$

$$E_{\text{equivalente da parede}} = 873,29 \text{ kN/cm}^2$$

Empregando-se agora o valor do módulo de elasticidade equivalente obtido, na situação do modelo teórico 2 — considerado com um módulo de elasticidade do conjunto da parede (bloco + argamassa) — obteve-se valores de encurtamento semelhantes (Figura 5.49). Pode-se dizer então que na consideração de valores de módulos de elasticidade equivalentes entre argamassa de assentamento e blocos considerando-se uma associação em série também obteve-se bons resultados.

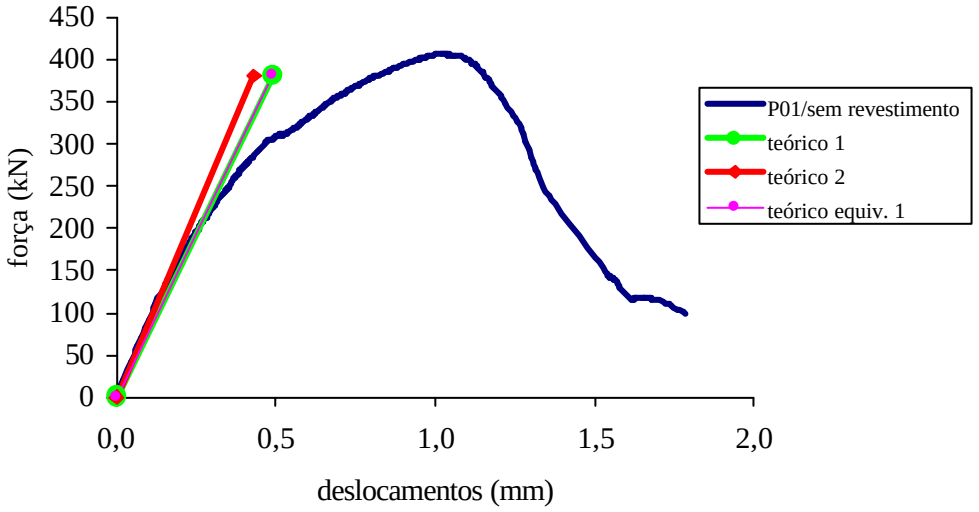


Figura 5.49 – Gráfico força x deslocamento das paredes sem revestimento (análise teórica considerando o $E_{equivalente}$).

A mesma consideração pode ser feita para a parede de alvenaria revestida considerando o núcleo como uma associação em série de blocos e argamassa de assentamento, a qual se associa em paralelo com as placas de argamassa de revestimento (Modelo de Voigt). Sendo assim, tem-se:

- para argamassa fraca (espessura da parede igual a 14 cm)

$$E_{eq} = \frac{E_1A_1 + E_2A_2}{A_1 + A_2} \qquad E_{eq} = \frac{873{,}29 \text{ x } 546 \ + \ 500 \text{ x } 156}{546 + 156}$$

$$E_{eq} = 790{,}34 \text{ kN/cm}^2$$

- para argamassa forte (espessura da parede igual a 18 cm)

$$E_{eq} = \frac{E_1A_1 + E_2A_2}{A_1 + A_2} \qquad E_{eq} = \frac{873{,}29 \text{ x } 546 \ + \ 2.171 \text{ x } 156}{546 + 156}$$

$$E_{eq} = 1.161{,}67 \text{ kN/cm}^2$$

Depois de calculados os módulos equivalentes para as parede com revestimento foram estudados modelos de paredes com um único material considerando-se os valores obtidos nas associações em paralelo. Os valores considerados e os resultados obtidos estão na Tabela 5.3 e Tabela 5.4. Observando-se os valores da Tabela 5.4 e a Figura 5.50 e Figura 5.51 pode-se também dizer que os valores dos encurtamentos, bem como, o comportamento na fase linear dos modelos são muito parecidos com os demais modelos considerados.

Tabela 5.3 – Valores dos módulos de elasticidade considerado nos modelos teóricos.

Modelo	$E_{experimental}$ (kN/cm^2)				$E_{equivalente}$ (kN/cm^2)
	bloco	argamassa		parede	
		Ass.	Rev.		
Teórico 1	921,3	527,87	—	—	873,29
Teórico arg. fraca	—	—	500	936,5	790,34
Teórico arg. forte	—	—	2.171	936,5	1.161,67

Tabela 5.4 – Valores do encurtamento máximo obtidos segundo os diversos modelos teóricos analisados.

Modelo	Encurtamento adotando-se $E_{experimental}$	Encurtamento adotando-se $E_{equivalente}$
Teórico 1	0,48883 mm	0,48883 mm
Teórico arg. fraca	0,49035 mm	0,52839 mm
Teórico arg. forte	0,33628 mm	0,35972 mm

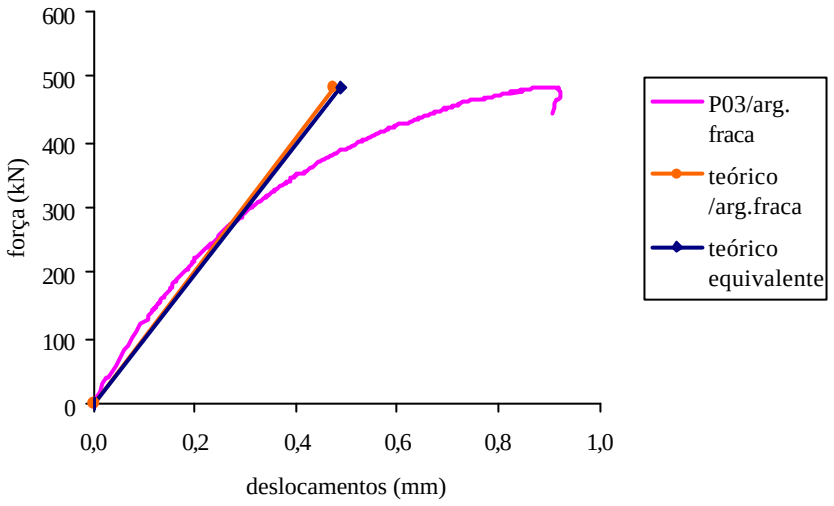


Figura 5.50 - Gráfico força x deslocamento das paredes revestidas com argamassa fraca (análise teórica considerando o $E_{equivalente}$).

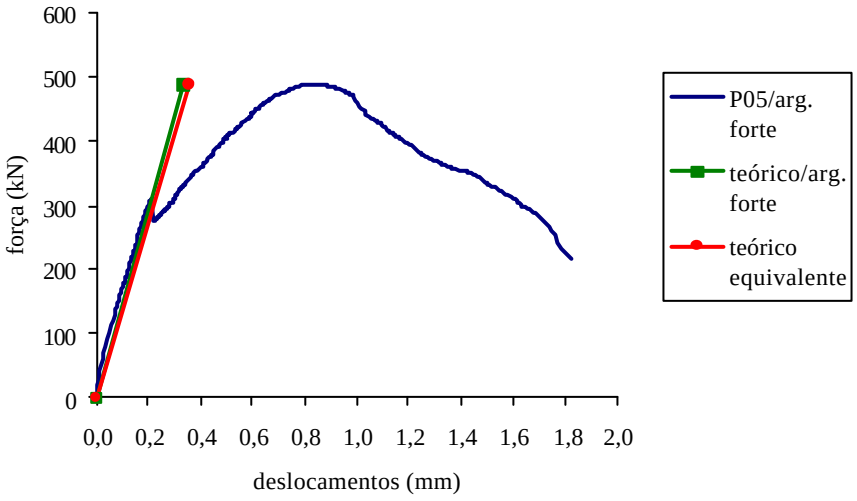


Figura 5.51 - Gráfico força x deslocamento das paredes revestidas com argamassa forte (análise teórica considerando o $E_{equivalente}$).

5.4. Conclusões parciais dos ensaios de compressão axial

- as paredes sem revestimento demonstraram comportamento estrutural de acordo com o esperado, apresentando nas proximidades da ruína fissuras longitudinais nas faces maiores e nos septos. A aplicação da fórmula dada pela NBR-10837 forneceu uma previsão razoável da capacidade resistente da parede com base na resistência avaliada em ensaios de prismas, com uma perda de rendimento da ordem de 10%.

- a aplicação dos distintos tipos de revestimento de argamassa de cimento e areia nas paredes não acarretou acréscimos de resistência e de rigidez de modo uniforme, nem proporcionais à resistência das argamassas de revestimento empregadas, o que demonstra que diferentes mecanismos de resistência podem se manifestar, em função das propriedades de deformação de todas as partes envolvidas e da interação entre elas.

- em alguns casos as paredes revestidas mostraram resistência menor. É possível também que tenha ocorrido deficiências de moldagem, e que focos de concentração de tensões tenham aparecido e prejudicado a resistência da parede revestida.

- esperava-se que com a adição de fibras curtas de polipropileno a argamassas fracas houvesse uma melhoria na resistência e na ductilidade da parede, pela possibilidade de se controlar melhor a eventual fissuração do revestimento no estado fresco e no estado endurecido, e também pelo aumento da tenacidade da argamassa. Isto não foi observado, pois, pelo contrário, houve redução da resistência da parede e a ductilidade não foi melhor do que a observada em paredes revestidas com argamassa forte não armada (na parede revestida com argamassa fraca simples a ruptura foi frágil). É possível que a adição de fibras de polipropileno tenha causado incorporação de ar à argamassa de revestimento, dificultado em demasia a sua aplicação manual com colher-de-pedreiro e acarretado defeitos de moldagem.

- o uso da combinação de argamassa forte com fibras de aço também foi testado com a expectativa de se observar melhoria da resistência e da ductilidade, mas isso também não foi observado, porque a capacidade resistente não foi maior do que a observada com a utilização de argamassas simples (fortes ou fracas). Numa das paredes (P14) observou-se uma boa ductilidade, mas na outra parede similar ensaiada (P13) observou-se ductilidade inferior à verificada em paredes revestidas com argamassa forte simples.

- a aplicação de revestimentos com telas aço soldadas sem conectores e com conectores tipo 1 (telas de aço nas juntas) ofereceu os melhores resultados, com acréscimos na capacidade resistente da ordem de 44%, mas ainda inferiores aos previstos pelas hipóteses da formulação aditiva. Embora não se tenha observado qualquer indício de melhor cintamento ou confinamento no sentido transversal, perpendicularmente ao plano da parede, pode-se dizer que as telas soldadas colaboraram no controle da fissuração no plano maior da parede e no retardamento de mecanismos de fratura que provocariam instabilidade das partes (núcleo e revestimento) da parede.

- o uso de telas de aço soldadas com conectores tipo 2 (armadura passante por furos nos blocos) não foi eficiente, pois os furos nos blocos acarretaram concentração de tensões e fissuração nesses locais. O aumento da capacidade resistente da parede não foi maior do que o observado em paredes revestidas com argamassa simples.

- a aplicação das hipóteses e o desenho de gráficos força x deslocamento com base na formulação aditiva ofereceu uma boa referência para a análise dos resultados experimentais. Pôde-se observar que a formulação aditiva representou bem a deformabilidade das paredes nos estágios iniciais de carregamento, em grande parte dos modelos ensaiados até cerca de 50% da sua capacidade resistente. Em outros modelos ensaiados, a formulação aditiva forneceu uma boa previsão do encurtamento de ruptura. Resultados mais próximos não ocorreram devido à

interação existente entre o revestimento e o núcleo, ou seja, com a progressiva instabilização do núcleo os revestimentos também passaram a ficar instáveis e vice-versa.

- a análise numérica linear efetuada mostrou-se útil na localização de zonas sujeitas à concentração de tensões e à fissuração. A aplicação de modelos simplificados também ofereceu boas indicações sobre o comportamento das paredes não-revestidas e revestidas, mostrando-se eficiente até mesmo em níveis de solicitação correspondentes a cerca de 40% da capacidade resistente. Isso demonstra que o desenvolvimento de processos de análise não-linear, com base nas equações constitutivas dos blocos e da argamassa de assentamento, pode chegar a bons resultados.

- a aplicação de valores de módulos de elasticidade aparente dos blocos, da argamassa de assentamento e da argamassa de revestimento, e a sua combinação em modelos reológicos em série e em paralelo, também levou a bons resultados, demonstrando-se que esses conceitos devem ser melhor desenvolvidos e sistematizados para o estabelecimento de métodos de cálculo mais requintados e precisos.

- no entanto, vale a pena ressaltar que uma simulação numérica mais fiel à realidade geométrica — ou seja, simulando os vazios dos blocos e as finas camadas de argamassa de assentamento — não leva necessariamente a melhores resultados. Simulações com blocos maciços e propriedades de deformação equivalentes, elementos de contato no lugar das camadas de argamassa de assentamento, ou até mesmo de paredes maciças, podem levar a resultados eficientes e de fácil manipulação.