

RELATÓRIO TÉCNICO

CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS EM PAREDES DE CONCRETO PELO INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DE SÃO PAULO – IPT

São Paulo, 22 de janeiro de 2009

À
Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP
Comunidade da Construção.
São Paulo - SP

1 – Introdução

Como é do conhecimento de V.Sas, foram realizados ensaios em paredes de concreto no Instituto de Pesquisas Tecnologias do IPT.

Este documento apresenta as considerações da OSMB a respeito dos resultados encontrados nos referidos ensaios.

2 – Objetivo dos ensaios

Apesar do elevado nível de confiabilidade que hoje se pode atribuir aos métodos numéricos empregados na verificação da segurança de elementos estruturais de concreto armado, a existência de resultados experimentais, que possam respaldar a aplicação de tais métodos, assume significativa importância.

Nos trabalhos já publicados pela ABCP, foi apresentada formulação para a determinação da força normal resistente de cálculo (Nrd), desenvolvida especialmente para tal finalidade pelo Prof. Francisco Paulo Graziano.

Além dessa formulação, baseada na teoria do concreto armado e nos procedimentos aplicáveis da NBR6118:2003 “Projetos de estruturas de concreto”, há no meio técnico outras alternativas a respeito da estimativa da carga Nrd.

Visando ao aumento da confiança nesses procedimentos de dimensionamento, bem como a criação de uma cultura impulsionadora de pesquisa tecnológica nesse campo, foram projetados e realizados 12 ensaios de compressão não centrada em paredes de concreto.

3 – Descrição dos ensaios realizados

Foram realizados ensaios em 12 paredes, com altura de 270 cm, a saber:

- 3 paredes com espessura de 14 cm, armadas, denominadas Pd14-AR1 a Pd14-AR3;
- 3 paredes com espessura de 14 cm, não armadas, denominadas Pd14-NR1 a Pd14-NR3;
- 3 paredes com espessura de 10 cm, armadas, denominadas Pd10-AR1 a Pd10-AR3;
- 3 paredes com espessura de 10 cm, não armadas, denominadas Pd10-NR1 a Pd10-NR3;

Todos os ensaios foram realizados com excentricidade correspondente à espessura de 1/6 da espessura da parede.

As seguintes empresas contribuíram na execução dos ensaios:

- Gerdau S.A: fornecimento das armaduras;
- Trisul S.A: montagem das formas e trabalhos de concretagem;
- Polimix Ltda: fornecimento do concreto;
- ABESC: Apoio técnico para a montagem dos ensaios.
- LENC Engenharia & Consultoria Ltda: ensaios de caracterização do concreto.

Na data da realização de cada ensaio, os respectivos corpos de prova moldados de cada parede, foram ensaiados para determinação da resistência e módulo de elasticidade do concreto.

A tabela 1 apresenta a identificação das paredes ensaiadas e os respectivos resultados dos ensaios de determinação das propriedades do concreto.

Tabela 1 – Resumo dos resultados dos ensaios dos painéis de concreto

Data do ensaio (2009)	Idade (dias)	Parede		Corpo-de-prova	
		Painel	Carga Máxima (kN)	Tensão de ruptura (MPa)	Módulo de deformação Eci (GPa)
5/10	27	Pd10-NA-1	1700 ¹	36,6	25,0
6/10	28	Pd10-NA-2	1700 ¹	36,8	25,1
7/10	29	Pd14-NA-1	1700 ¹	37,0	25,2
8/10	30	Pd10-AR-1	1700 ¹	37,4	25,4
9/10	31	Pd10-AR-2	1700 ¹	39,2	25,5
13/10	35	Pd10-AR-3	1700 ¹	39,6	26,7
3/11	7	Pd10-NA-3	1400 ²	24,2	— ³
4/11	8	Pd14-NA-2	1700 ¹	25,8	20,3
5/11	9	Pd14-NA-3	1700 ¹	27,4	20,9
6/11	10	Pd14-AR-3	1700 ¹	28,6	21,5
9/11	13	Pd14-AR-2	1700 ¹	29,4	22,1
10/11	14	Pd14-AR-1	1700 ¹	30,6	22,4

¹ Sem ocorrência de ruptura.

² Ocorrência de ruptura.

³ Ensaio não realizado

A descrição completa das características das paredes, instrumentação, procedimentos e equipamentos utilizados para a realização dos ensaios encontram-se no Relatório do IPT.

4 – Determinação teórica da curva carga x deslocamento

Foi desenvolvido pela OSMB um procedimento (denominado modelo teórico), a seguir descrito, para obtenção das curvas carga x deslocamento:

- Cada barra foi modelada com metade de sua altura, considerada engastada numa extremidade e livre na outra, como ilustra esquematicamente a figura 1.

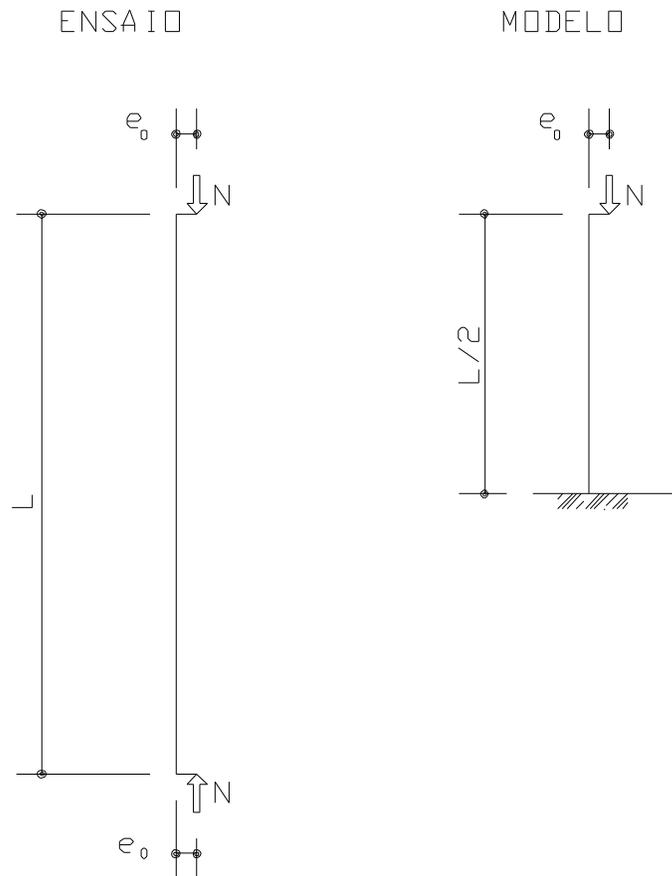


Figura 1 – Esquemas dos ensaios e dos modelos.

- A barra do modelo foi dividida em 10 partes.
- A força N foi aplicada em acréscimos sucessivos até que se atingisse a ruptura, com o seguinte procedimento:
 - Obtem-se o momento $M1d = Nd.e_0$, com $e_0=t/6$.
 - Com os dados da seção transversal e das características do concreto, obtiveram-se, com o uso da calculadora M,N,1/r do TQS – versão 13.7.12, os respectivos valores de 1/r e produto EI, para curva tensãoxdeformação do concreto correspondente a 1,1 fcd.

- Com os valores $1/r$ e EI de cada uma das 10 seções transversais, obteve-se, numa primeira integração numérica (pelo Método das Diferenças Finitas) as rotações em cada seção, impondo-se como condição de contorno que a rotação no engaste é nula.
- A partir da rotação, por processo análogo, obtiveram-se os valores dos deslocamentos de 2ª ordem, e_2 para cada seção.
- Determinou-se, ainda para a mesma carga, a nova distribuição de momentos fletores $M_d = N_d \cdot e_0 + N_d \cdot e_2$.
- Esse processo foi repetido até a convergência dos valores de e_2 .
- Aplicou-se novo acréscimo de carga na estrutura deformada, caracterizando assim um procedimento que emprega não linearidade física e geométrica.
- Os valores de N foram acrescidos até que o M_d atingisse M_{rd} da seção transversal.
- No processo numérico desenvolvido considerou-se apenas a excentricidade acidental $t/6$. O efeito de 2ª ordem decorrente da fluência foi desprezado

Observa-se que como se empregou a curva tensãoxdeformação do concreto, correspondente a 1,1 fcd, o respectivo resultado do modelo teórico não pode ser diretamente comparado aos respectivos valores dos ensaios. Assim, os resultados do referido modelo teórico devem ser empregado apenas para balizamento e enriquecimento da análise entre o que se obtém em ambiente de projeto e os valores de laboratório.

5 – Comparações das curvas carga x deslocamento

Apresenta-se no Anexo gráficos contendo:

- As curvas, teórica e experimental, da força normalxdeslocamento no ponto médio da altura L de cada parede ensaiada. Para obtenção das curvas experimentais foram descartados os deslocamentos correspondentes à escorva do espécime.
- Nos gráficos a força N é apresentada com seu valor característico.
- Os valores de N_{rd} obtidos com¹:
 - A expressão do item 17.5 da Coletânea de Ativos da Comunidade da Construção – 2007-2008;
 - A expressão do capítulo 14 do ACI 318M-05
 - A expressão do item 24.6 da NBR6618:2003, aplicável a elementos estruturais de concreto simples.

¹ Para o cálculo de N_{rd} utilizando as expressões, foram desprezadas as armaduras verticais das paredes.

- Os valores de N_r , esperados empregando-se a expressão do item 17.5 da Coletânea de Ativos da Comunidade da Construção – 2007-2008, assumindo o valor $0,85f_{cd}$ igual ao próprio $f_{c,j}$ obtido no ensaio do concreto empregado.

Os gráficos foram agrupados por parede e pela resistência do concreto obtida nos respectivos ensaios de caracterização.

6 – Comentários e recomendações

Do exame dos gráficos apresentados no Anexo deste Relatório, pode-se depreender:

- Que em nenhum dos ensaios realizados se atingiu o colapso das paredes. Apenas no ensaio da Pd10-NA-3, observou-se ruptura de cunha de concreto junto ao equipamento de aplicação da força normal, provavelmente como decorrência de concentração de tensões e da baixa idade do concreto, apesar de sua resistência ter atingido cerca de 24 MPa. A ausência de ruptura se deu fundamentalmente em função dos elevados valores de f_c na data dos ensaios. Dada a grande importância do conhecimento das cargas de ruptura das paredes, recomenda-se que novos ensaios sejam realizados com resistências do concreto compatível com a capacidade de carga dos equipamentos a serem utilizados.
- Segundo o Relatório do IPT, em nenhum ensaio, constatou-se o início de fissuração das paredes, mesmo até o atingimento da carga máxima do ensaio.
- Para as paredes de 10 cm, os valores de N_{rd} , obtidos com a expressão do item 17.5 da Coletânea de Ativos da Comunidade da Construção; com a expressão do capítulo 14 do ACI 318M-05 e com a expressão do item 24.6 da NBR6618:2003, corresponderam a valores entre 30% a 50% do respectivo valor de N_{rd} obtido no modelo teórico. Essa considerável diferença pode ser decorrente do fato de que o modelo teórico não levou em conta os efeitos de 2ª ordem oriundos da fluência. Recomenda-se que sejam elaborados modelos teóricos mais aprimorados nos quais os efeitos acima possam ser considerados.
- Para as paredes de 14 cm, os valores de N_{rd} , obtidos com as expressões acima mencionadas aproximaram-se com razoável precisão do valor de N_{rd} obtido no modelo teórico.
- Os valores de N_r , esperados foram sempre maiores do que o valor máximo atingido nos ensaios (1700 kN) devido à limitação dos equipamentos empregados.
- Sobre a evolução das curvas tensão-deslocamento:
 - Em praticamente todos os ensaios, observou-se desvio da curva experimental, indicando movimentação contrária ao esperado. Após a análise da montagem dos ensaios, observou-se que esses desvios foram decorrentes do deslocamento simultâneo dos pontos de aplicação de carga até a acomodação do sistema. Em ensaios análogos que vierem a ser realizados com o mesmo objetivo, recomenda-se a instalação de transdutores de deslocamentos também no topo e na base das paredes.

- Analisando-se as curvas apresentadas, desconsiderando-se o efeito acima descrito, pode-se observar, em todos os casos, boa aderência no andamento das curvas experimentais com a curva do modelo teórico.
- O valor de N_{rd} do item 17.5 da Coletânea de Ativos da Comunidade da Construção, pode ser considerado seguro para o dimensionamento de paredes de concreto com as mesmas características apresentadas neste trabalho.

Tendo-se em vista que as paredes não atingiram a ruptura, os diagramas tensão-deformação nas armaduras e concreto, não foram analisados neste trabalho.

Sem mais para o momento, colocamo-nos à disposição de V.S.as para eventuais esclarecimentos,

Atenciosamente

OSMB Engenheiros Associados SS Ltda

Dr. Eng. José Roberto Braguim

Anexo
Gráficos Forçaxdeslocamento

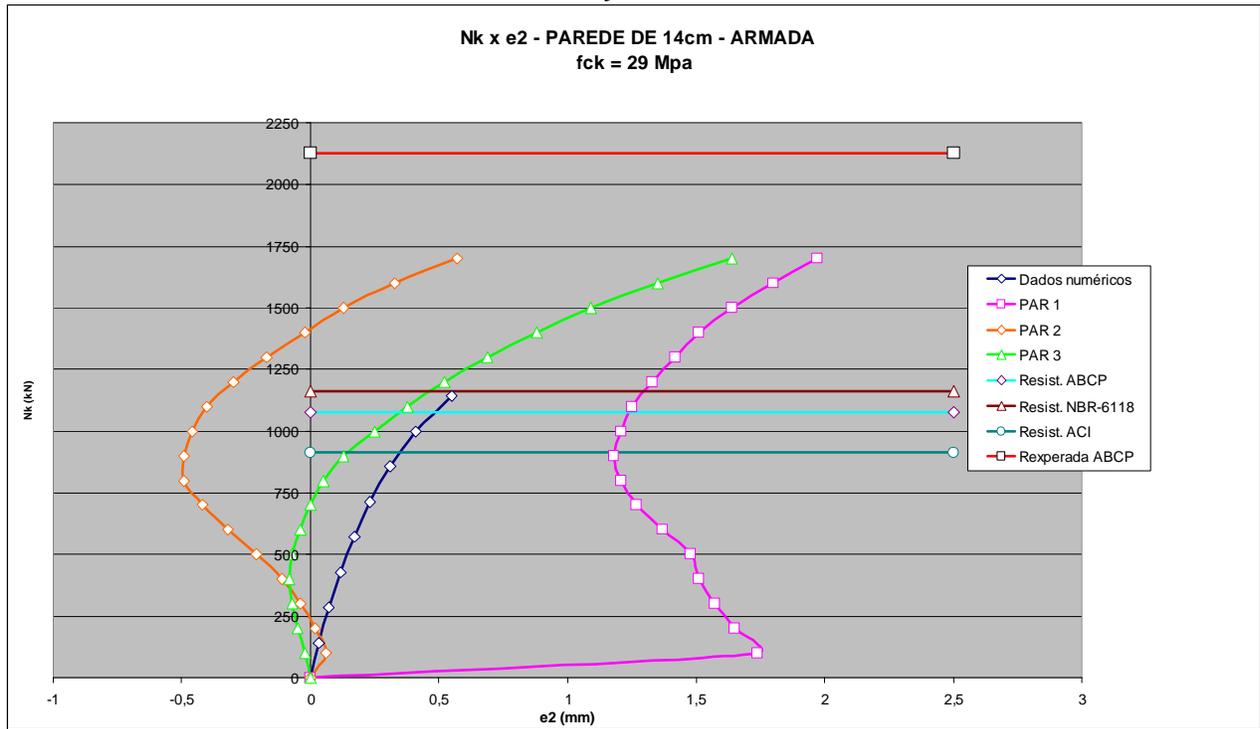


Figura 1 – Curvas Carga x deslocamento para paredes t=14, armadas, $f_c=29$ MPa.

Nk x e2 - PAREDE DE 14cm - NÃO ARMADA
fck = 37 MPa

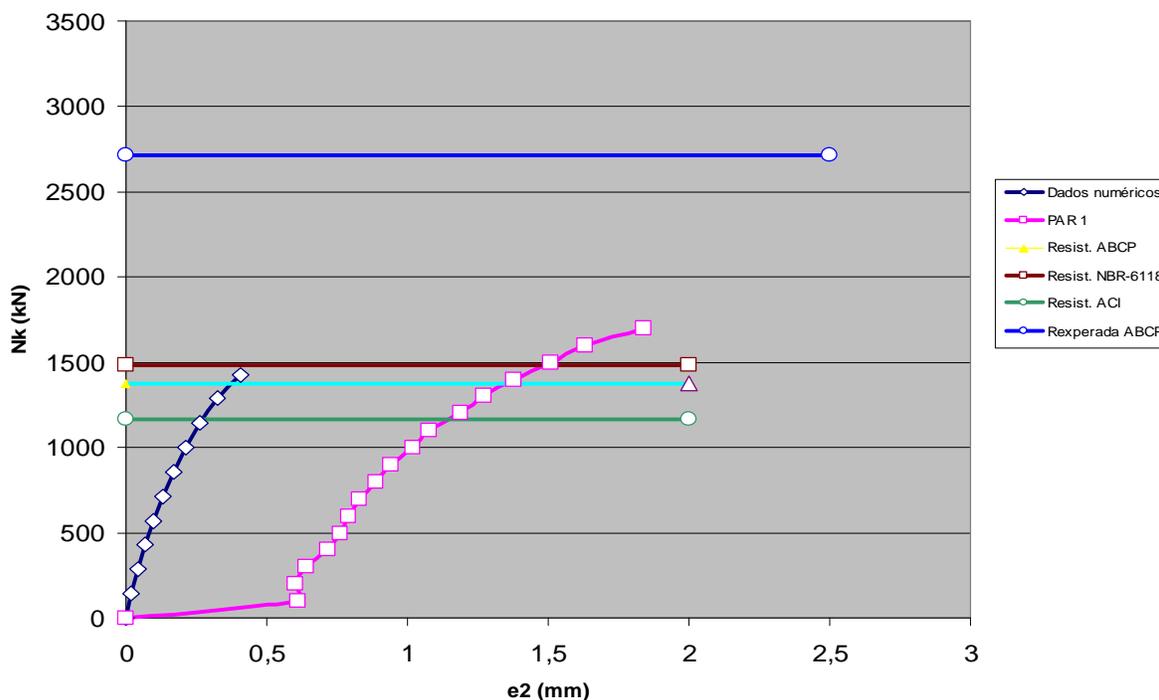


Figura 2 – Curvas Carga x deslocamento para paredes t=14, não armadas, $f_c=37$ MPa.

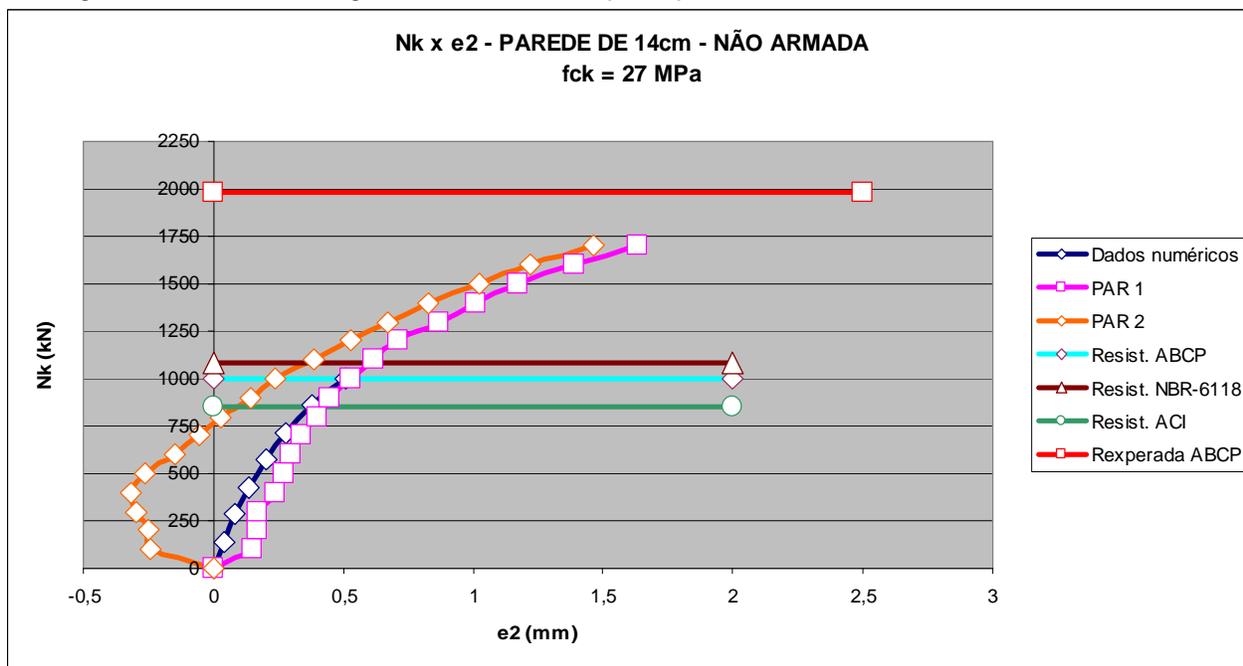


Figura 3 – Curvas Carga x deslocamento para paredes t=14, não armadas, $f_c=27$ MPa.

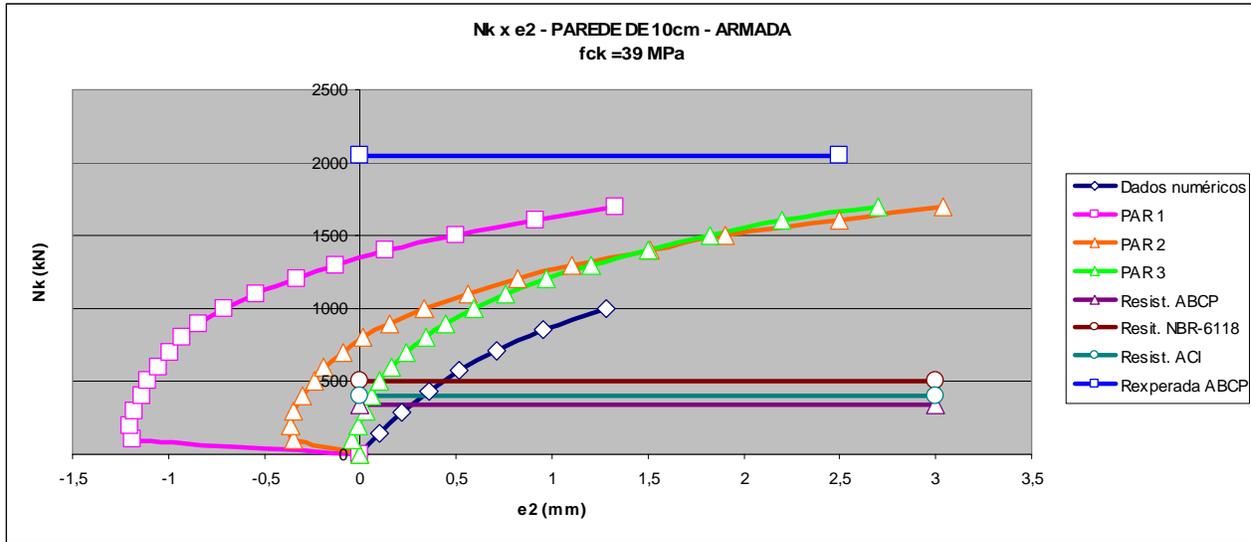


Figura 4 – Curvas Carga x deslocamento para paredes t=10, armada, fc=39 MPa.

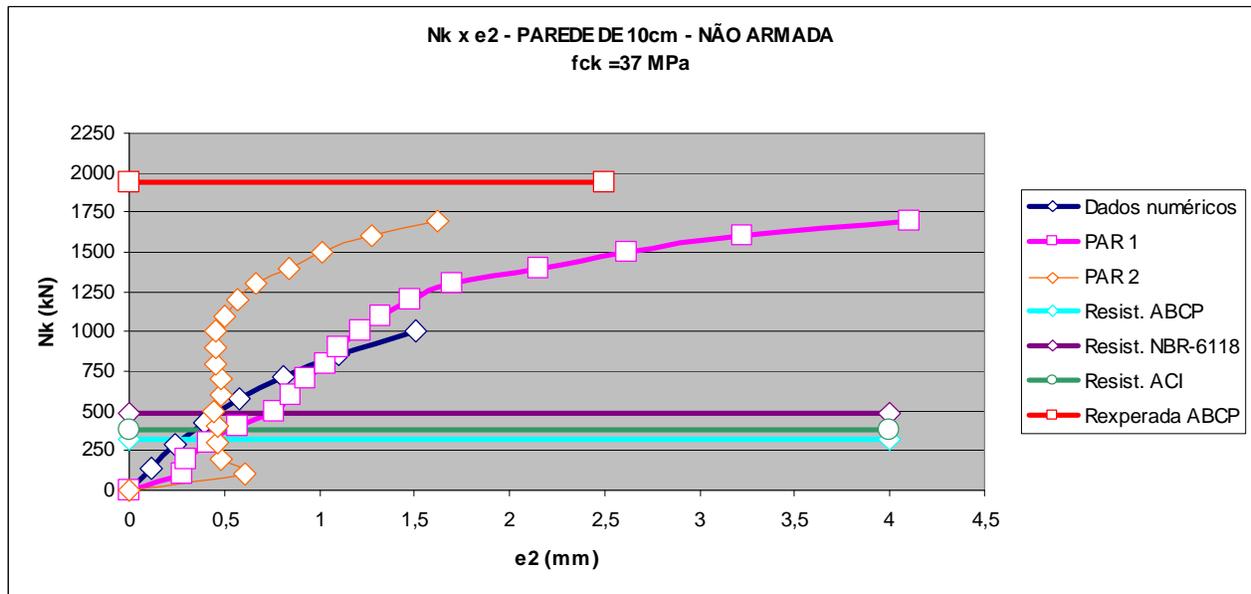


Figura 4 – Curvas Carga x deslocamento para paredes t=10, não armada, fc=37 MPa.

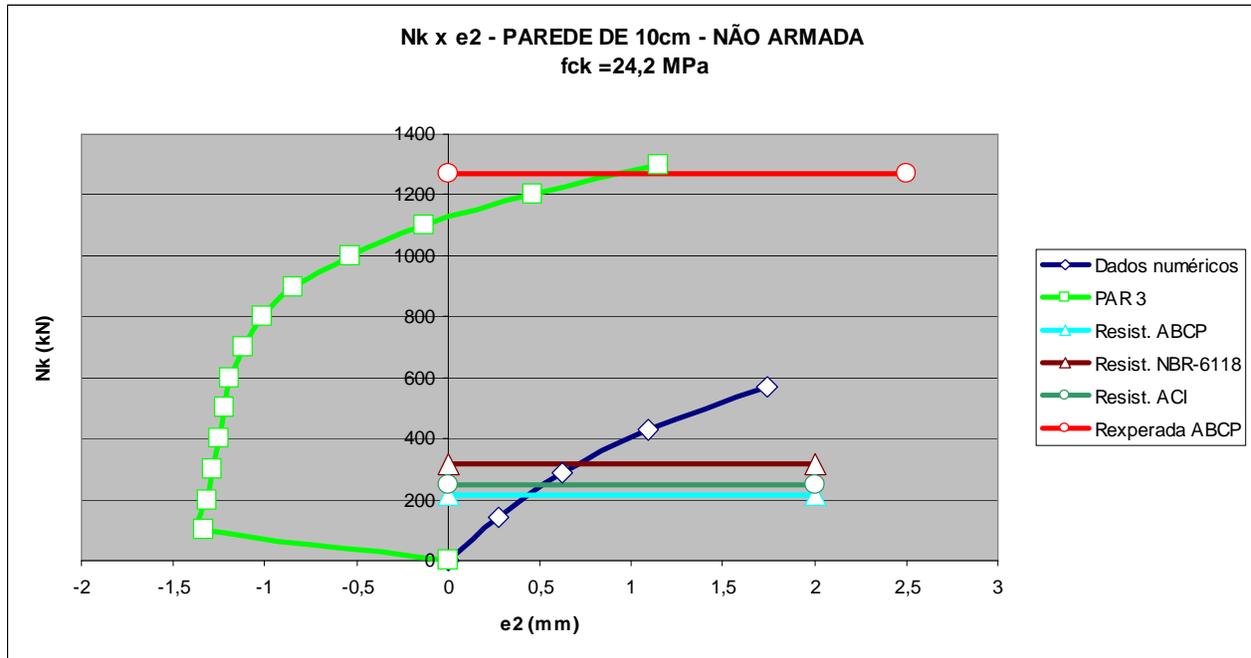


Figura 5 – Curvas Carga x deslocamento para paredes t=10, não armada, fc=24 MPa.