XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/45

COMPARAÇÃO DAS ABORDAGENS DE PROJETO PARA ANÁLISES DE CONEXÃO GRAMPO-FACE EM ESTRUTURAS DE SOLO GRAMPEADO

Yan de Souza Ascoli
Mestrando, Universidade Federal de São Carlos - SP, Brasil, yansouzaascoli08@gmail.com

Pabst, Eugênio
INTERACT Engenharia, eugenio@interact.eng.br

Fernando H. M. Portelinha
Professor Doutor, Universidade Federal de São Carlos - SP, Brasil, fportelinha@ufscar.br

RESUMO: O dimensionamento da interface grampo–face constitui um aspecto fundamental no desempenho estrutural e no custo de contenções em solo grampeado. Apesar de sua relevância, não há consenso na prática da engenharia quanto à metodologia de cálculo mais adequada. No Brasil, o dimensionamento estrutural do paramento é usualmente conduzido com base nos critérios da NBR 6118. Contudo, diretrizes internacionais, como as da FHWA, propõem uma metodologia específica. Neste contexto, o presente trabalho realiza uma análise comparativa entre essas abordagens por meio da avaliação de um estudo de caso da literatura nacional originalmente dimensionado segundo a NBR 6118. A partir dos parâmetros geométricos e mecânicos do projeto, foram estimadas as resistências estruturais à flexão e à punção de acordo com a metodologia da FHWA. Os resultados indicam que, para a condição de carregamento de serviço, o dimensionamento adotado atende às verificações de resistência à flexão e à punção. Entretanto, no cenário excepcional, embora a resistência à flexão permaneça satisfatória, observa-se insuficiência quanto à resistência à punção na região da ligação grampo–face. Esses resultados evidenciam a importância da verificação específica desse mecanismo de ruptura e ressaltam a necessidade de estudos adicionais que quantifiquem a resistência dessa interface para diferentes configurações de ligação utilizadas na prática construtiva.

PALAVRAS-CHAVE: Solo Grampeado, Interface Grampo–Face, Encostas e Muros de contenção, Paramento, Dimensionamento Estrutural.

ABSTRACT: The design of the nail–facing interface is a key aspect influencing both the structural performance and the cost of soil nail wall systems. Despite its relevance, there is still no consensus in engineering practice regarding the most appropriate design methodology. In Brazil, the structural design of the facing is commonly performed according to the criteria of ABNT NBR 6118. However, international guidelines, such as those issued by the Federal Highway Administration, propose specific methodologies for this verification. In this context, the present study performs a comparative analysis between these approaches through the evaluation of a case study from the Brazilian literature originally designed according to NBR 6118. Based on the geometric and mechanical parameters of the project, the flexural and punching resistances were estimated according to the FHWA methodology. The results indicate that, under service loading conditions, the adopted design satisfies both flexural and punching resistance requirements. However, under an exceptional scenario, although the flexural resistance remains adequate, insufficient punching resistance is observed at the nail–facing connection. These findings highlight the importance of explicitly verifying this failure mechanism and emphasize the need for additional studies aimed at quantifying the resistance of this interface for different connection configurations used in construction practice.

KEYWORDS: Soil nailing; Nail–facing interface; Slopes and retaining walls; Facing; Structural design.

1 INTRODUÇÃO

A técnica de solo grampeado consolidou-se como uma das soluções mais versáteis e eficientes para a estabilização de taludes e escavações. O embasamento científico moderno da técnica deve muito a projetos pioneiros como o francês (CLOUTERRE, 1991), que através de ensaios em escala real estabeleceu diretrizes fundamentais para a compreensão da interação solo-reforço, mas também às normativas como o manual da FHWA (2015) e o código britânico BS 8006-2 (2011), fundamentais por terem estruturado as metodologias de cálculo. No Brasil, a técnica tem sido largamente utilizada, principalmente nas últimas décadas, em escavações com paramento vertical em áreas densamente povoadas, desafiando limites de deslocamentos e exigindo um rigoroso controle executivo (Mucheti e Albuquerque, 2024).

Embora o comportamento global do solo grampeado seja amplamente estudado na literatura, as rupturas nestas estruturas ainda ocorrem, expondo deficiências de projeto e execução (Mucheti et al., 2021). Destacam-se algumas incertezas nas análises de estabilidade envolvendo o mecanismo de arrancamento dos grampos e na segurança global, bem como no papel cumprido pelo grampo (tração, flexão e cisalhamento). No entanto, o paramento frontal (face), responsável por conter o solo e transferir os esforços para a cabeça dos grampos, é um elemento crítico cuja ruptura estrutural pode levar a um colapso progressivo da contenção além de afetar na interação solo-estrutura.

No contexto normativo brasileiro, a publicação da NBR 16920-2:2021 representou um avanço significativo para a padronização da técnica. No que se refere ao dimensionamento estrutural do paramento, a norma brasileira utiliza-se de verificações contidas na NBR 6118, que é concebida para estruturas prediais e não contabiliza os efeitos da interação solo-estrutura, como o efeito de arqueamento do solo, além de não prever metodologias específicas para diferentes ligações grampo-face presentes na prática construtiva nacional. Alguns exemplos de diferentes tipos de ligação são mostrados na Figura 1.

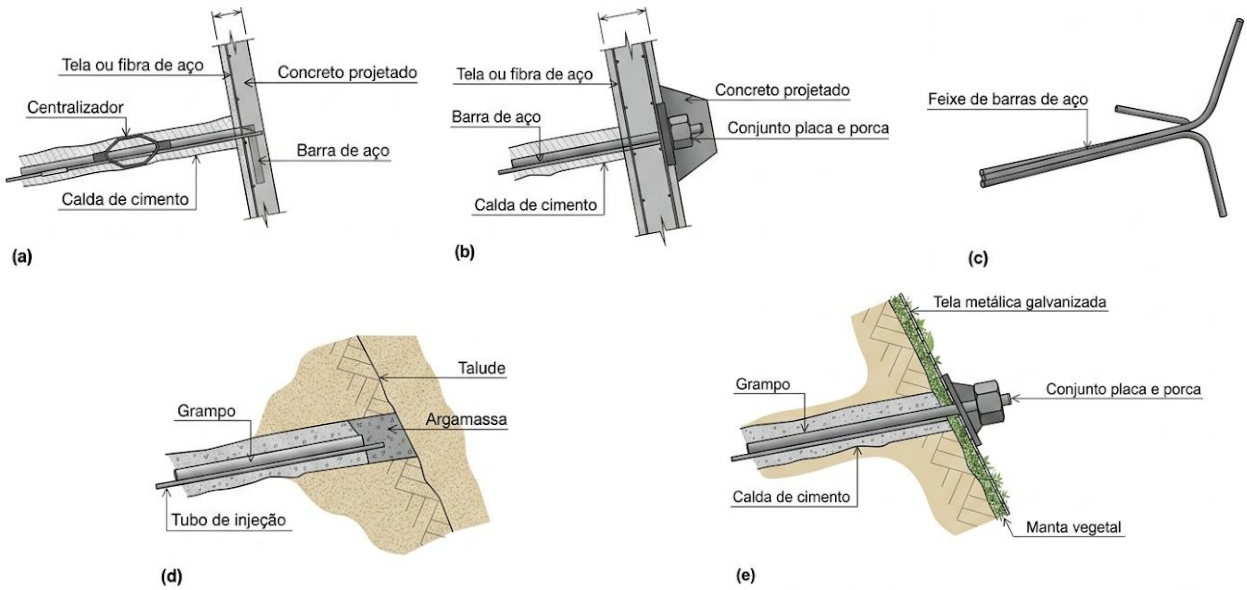


Figura 1. Tipos de cabeças para grampos: (a) embutida na face por meio de dobra no aço; (b) fixada por placa metálica, rosca e porca; (c) feixe de barras embutido na face por dobra; (d) sem cabeça; e (e) com manta vegetal, tela placa e porca. Fonte: Adaptado de GeoRio (2014).

Em contrapartida, manuais internacionais consagrados, como o *Geotechnical Engineering Circular No. 7* da *Federal Highway Administration* (FHWA, 2003; FHWA, 2015), estabelecem formulações próprias para o dimensionamento do paramento contra rupturas por flexão e punção. A FHWA considera ativamente o confinamento do solo e estabelece fatores de redução de esforço que otimizam o dimensionamento, ao mesmo tempo em que impõe critérios rigorosos de segurança LRFD (*Load and Resistance Factor Design*) para a região crítica da cabeça do grampo.

Diante da carência de estudos que avaliam as diferenças de segurança entre estas abordagens, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa do dimensionamento estrutural de

um paramento em concreto armado. Para tal, confrontam-se os resultados de um estudo de caso da literatura nacional (Pabst *et al*., 2023), projetado segundo as premissas gerais da NBR 6118, com a metodologia específica da FHWA (2015). O foco da avaliação recai sobre a capacidade resistente à flexão e à punção na região da ligação sob um cenário de carga normal e extraordinária (falha de um grampo).

2 MECÂNICA DA INTERAÇÃO GRAMPO-FACE E MODOS DE RUPTURA

O avanço progressivo da escavação em estruturas de solo grampeado promove o alívio de tensões no maciço, resultando na expansão da zona ativa potencial de ruptura. Em decorrência dessa dinâmica, as maiores movimentações horizontais e verticais tendem a concentrar-se na região superior da escavação, particularmente em estruturas com face verticalizada. De acordo com Lazarte *et al*. (2015), o aprofundamento da superfície crítica implica a redução do comprimento ancorado dos grampos superiores, diminuindo sua contribuição relativa para a estabilidade global do sistema.

Paralelamente, as deformações progressivas do maciço promovem a redistribuição e a transferência contínua de esforços para o paramento. Nesse contexto, a força de tração mobilizada na cabeça do grampo (T_0) passa a ser diretamente condicionada pela sequência executiva da escavação (Figura 2), exigindo que a face de contenção resista a solicitações localizadas de elevada intensidade, acumuladas ao longo das etapas construtivas.

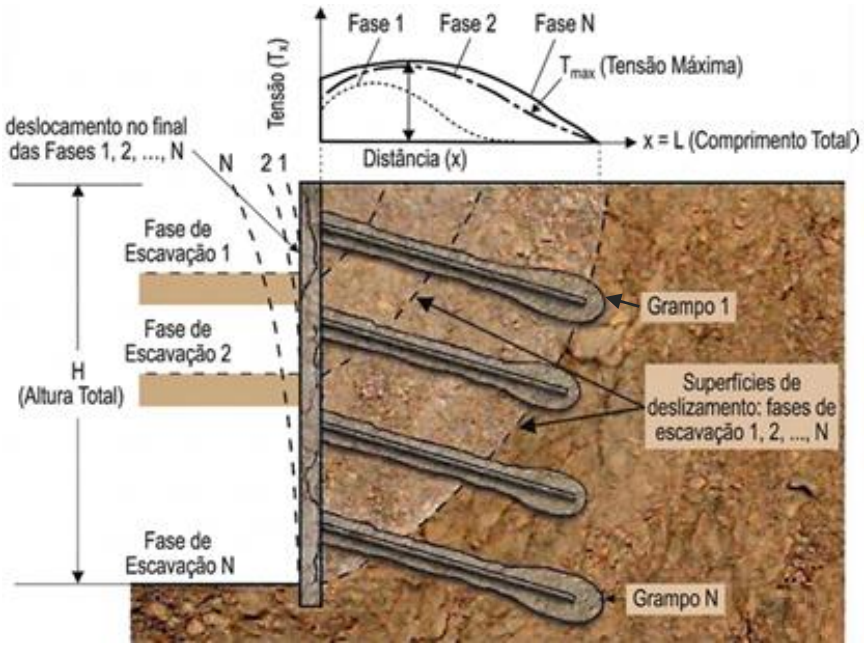


Figura 2. Efeito da escavação no comportamento do grampo. Fonte: Adaptado de Lazarte *et al*. (2015).

Conforme estabelecido em Clouterre (1991), os valores da razão T_0/T_{max} são condicionados por diversos parâmetros, dentre os quais se destacam a rigidez do solo, a rigidez do paramento, a rigidez axial dos grampos, a profundidade de instalação e o espaçamento entre eles. Entre esses fatores, o espaçamento dos grampos exerce influência preponderante, uma vez que controla a distribuição de deformações no maciço e, consequentemente, o nível de esforço transferido à face.

Baseado em resultados de monitorações de campo, Clouterre (1991) propõe que a força de tração nas cabeças dos grampos (T_0), para condições de trabalho, seja estimada como apresentado na Equação 1.

$$T_0 = T_{max} \cdot \left[0{,}5 + \frac{S-0{,}5}{5}\right] \quad \text{, quando } 1 \leq S \leq 3\ m$$
$$T_0 = 0{,}6 \cdot T_{max} \quad \text{, quando } S \leq 1\ m$$
$$T_0 = T_{max} \quad \text{, quando } S \geq 3\ m \qquad (1)$$

Onde:

S = espaçamento máximo da malha de grampos (adotando-se o maior valor entre o espaçamento vertical S_v e o horizontal S_h), e

T_{max} = força de tração máxima mobilizada ao longo do grampo (frequentemente localizada na interseção com a com a superfície potencial de ruptura).

Para garantir a estabilidade do sistema frente aos esforços solicitantes, as verificações estruturais do paramento concentram-se em dois mecanismos principais de colapso: a ruptura por flexão da face e a falha por punção na região de conexão com a cabeça do grampo.

3 ESTUDO DE CASO

Para a realização da análise comparativa, este trabalho adota como referência os parâmetros de projeto documentados no estudo de caso de Pabst et al. (2023). O projeto descreve o dimensionamento de um paramento definitivo em concreto armado com espessura de 12 cm, fck = 30 MPa, aço CA50 e CA60, fator parcial de segurança do aço $\gamma_s = 1{,}15$ (normal), $\gamma_s = 1{,}00$ (excepcionais), fator parcial de segurança do concreto $\gamma_c = 1{,}40$ (normal e excepcionais), uma vez que este material tem menor grau de controle em relação ao aço, com uma carga normal de $T_0 = 40$ kN e uma carga excepcional de T_0 = 59 kN, suportado por grampos dispostos em uma malha quadrada, com espaçamentos vertical e horizontal de 1,25 m.

3.3 Estimativa da Capacidade Resistente à Flexão e ao Puncionamento Segundo a FHWA (2015)

Segundo a metodologia da FHWA, a resistência nominal à flexão da face (R_{FF}) corresponde à força na cabeça do grampo mobilizada no instante em que o paramento atinge sua capacidade limite de flexão. Esse esforço é quantificado a partir da contribuição conjunta das capacidades resistentes na região de apoio (ao redor das ancoragens) e no meio do vão (cabeça dos grampos), modelando-se o paramento de forma análoga ao comportamento de uma laje bidirecional equivalente.

Devido ao efeito de arqueamento, a pressão exercida contra a face não é uniforme. Logo, ocorre um alívio de tensões no meio do vão em virtude dos maiores deslocamentos da estrutura, o que concentra as pressões na região de maior confinamento, situada imediatamente atrás da cabeça dos grampos (Figura 3).

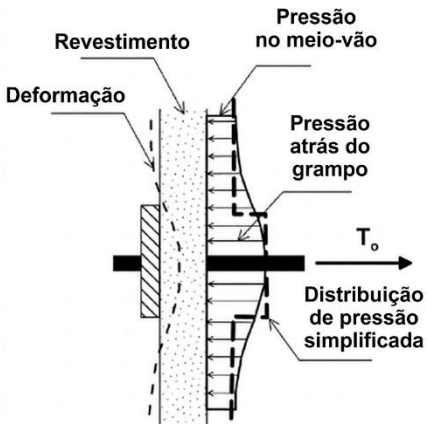


Figura 3. Distribuição das pressões de solo atrás do revestimento. Fonte: Lazarte *et al*. (2015).

3.3.1 Capacidade Resistente à flexão

O dimensionamento à flexão preconizado pela FHWA (2015), faz a verificação analítica de dois elementos estruturais distintos: o revestimento provisório (fase construtiva) e o definitivo (fase final de obra).

Ambas as estruturas devem ser projetadas para suportar integralmente à força de tração de cálculo na cabeça do grampo (T_0). A distinção entre as verificações estruturais dessas duas fases está associada ao coeficiente C_F, que considera o efeito das pressões não uniformes do solo atuando na fase posterior do revestimento. Esse coeficiente empírico tem por finalidade, contabilizar o efeito da distribuição não uniforme das tensões transmitidas pelo maciço, sendo influenciada pela magnitude dos deslocamentos da parede, pelas características geotécnicas do solo e pela rigidez e espessura do revestimento.

Estabelecidas essas premissas de interação solo-estrutura, o fator de resistência à flexão R_{FF} é determinado pela formulação a seguir.

$$T_0 \leq R_{FF} = \frac{C_F}{265} \cdot (a_{vn} + a_{vm})[mm^2/m] \cdot \left(\frac{S_h \cdot h_i}{S_v}\right)[m] \cdot f_{y,w}[MPa] \qquad 2$$

Onde:

a_{vn} é a área de aço adotada no meio do vão, a_{vm} é a área de aço adotada na cabeça do grampo e $f_{y,w}$ é a tensão de escoamento do aço.

3.3.2 Capacidade Resistente à Punção

O dimensionamento à punção preconizada pela FHWA (2015), impõe que o mecanismo de ruptura por cisalhamento seja rigorosamente avaliado nas duas etapas executivas da contenção. A distinção entre as verificações estruturais dessas duas fases está associada ao coeficiente C_P, que considera a contribuição do suporte do solo sob a cabeça do grampo. O presente trabalho, contudo, concentra-se no caso "a" apresentado na Figura 4, visto que é o modelo que mais se aproxima da prática construtiva brasileira.

Estabelecidas essas premissas de interação solo-estrutura, o fator de resistência à punção R_{FP} é determinado pela formulação a seguir.

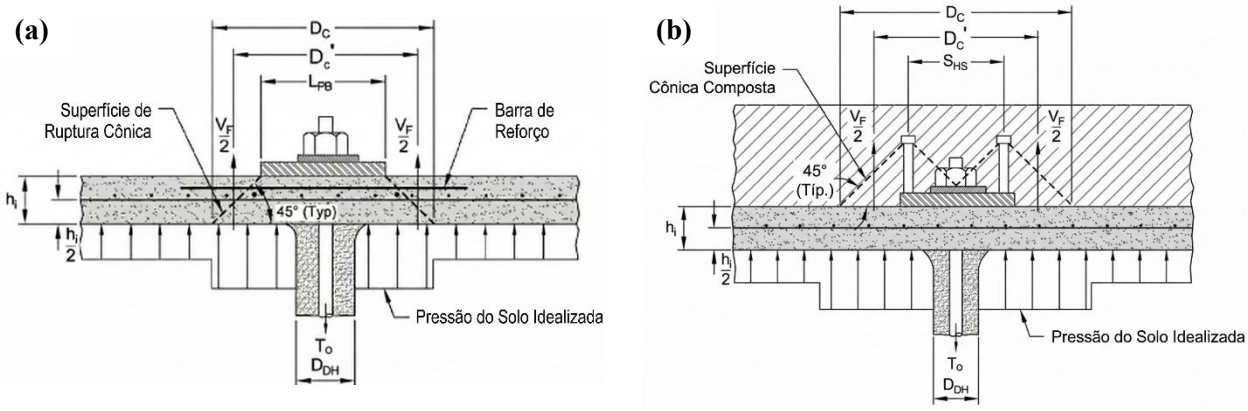


Figura 4. Estados-limites para o cisalhamento por punção em revestimentos: (a) conexão da placa de apoio, (b) conexão de Pino com cabeça. Fonte: Lazarte *et al.* (2015).

$$T_0 \leq R_{FP} = C_P \cdot V_F = C_P \cdot 330 \cdot \sqrt{f'_c[MPa]} \cdot \pi \cdot D'_c[m] \cdot h_c[m] \qquad 3$$

Onde:

D'_c = diâmetro efetivo da superfície de falha cônica no centro da seção;

h_c = profundidade efetiva da superfície cônica, e

f'_c = Resistência a compressão do concreto.

$$D'_c[m] = L_{BP} + h_i \quad (4)$$

$$h_c = h_i \quad (5)$$

Onde:

L_{BP} = dimensão da placa de apoio, e

h_i = espessura útil do revestimento.

Ressalta-se que os coeficientes 265 e 330, presentes nas formulações da FHWA (2015) para o Sistema Internacional, atuam como fatores de conversão embutidos que aglutinam, respectivamente, os preceitos da teoria das linhas de ruptura e as constantes de resistência ao cisalhamento do ACI 318, permitindo a determinação direta das capacidades resistentes em kN. A dedução completa das formulações apresentadas pode ser encontrada em Lazarte et al. (2015).

3.4 Resultados e Discussões

A análise comparativa consistiu em submeter o paramento, originalmente dimensionado pelos critérios da NBR 6118 no estudo de Pabst et al. (2023), conforme as diretrizes internacionais da FHWA (2015). Foi mantido as variáveis de projeto rigorosamente: utilizando a área de aço (As) calculada conforme a norma brasileira como entrada direta nas equações da FHWA. Ao manter constantes a espessura, o concreto e as mesmas solicitações de carga, permitindo isolar o desempenho estrutural intrínseco de cada método de cálculo.

No cenário de carregamento padrão, a armadura adotada para combater o momento fletor negativo foi a tela Q246, enquanto para o momento positivo utilizou-se a tela Q138.

Cálculo da resistência à flexão:

$$40\ kN \leq 91\ kN = \frac{1}{265} \cdot (138 + 246)[mm^2/m] \cdot (0{,}12)[m] \cdot \frac{600}{1{,}15}[MPa] \quad (6)$$

Para o cálculo da resistência à punção, foram feitas as seguintes considerações:

$$L_{BP}[mm] = 20(barra\ principal) + 2 \cdot 12{,}5(Barras\ de\ ancoragem) = 45mm \quad (7)$$

$$h_i[mm] = 90mm\ (comprimento\ de\ ancoragem, \text{Figura 5}) \quad (8)$$

$$40\ kN \leq 58{,}31kN = 1 \cdot 330 \cdot \sqrt{\frac{30}{1{,}4}[MPa]} \cdot \pi \cdot (0{,}045 + 0{,}085)[m] \cdot 0{,}085[m] \quad (9)$$

Por fim, apresenta-se na Tabela 1 um resumo dos resultados obtidos nos cálculos realizados para o cenário de carregamento normal e para o cenário de colapso progressivo, avaliados conforme as recomendações da FHWA (2015).

Tabela 1. Resultados das análises a luz da FHWA (2015).

Cenário	T_0 (kN)	$*A_{vn}$ (mm^2/m)	$*A_{vm}$ (mm^2/m)	$C_F = C_P$	R_{FF} (kN)	R_{FP} (kN)	Status	Observação
Normal	40	138	246	1	91	58	Atende	A NBR 6118 é mais rigorosa na flexão.
Colapso progressivo	59	138	246 + 138	1	142	58	Não atende	FHWA é mais rigorosa na punção.

Nota: * Área de aço obtida nos cálculos da NBR 6118.

Os dados apresentados na Tabela 1 demonstram que, sob condições normais, a armadura dimensionada conforme a NBR 6118 mostra-se significativamente mais conservadora em relação à requerida pela FHWA para resistência à flexão (R_{FF}), ultrapassando o esforço solicitante de 40 kN. No caso de colapso progressivo, observa-se que a verificação à flexão permanece adequada e ainda mais conservadora, porém a resistência à punção pela FHWA (58 kN) revela-se insuficiente, mas muito próximo do valor limite. O estudo original de Pabst et al. (2023), baseado na NBR 6118, identificou deficiência na flexão nesse cenário excepcional, recomendando reforço de aço, mas não reportou colapso por punção. Tal diferença evidencia que a armadura complementar, embora aumente substancialmente a capacidade à flexão, não modifica o diâmetro da superfície de ruptura cônica, mantendo o elemento suscetível ao puncionamento conforme os critérios rigorosos da metodologia internacional.

A Figura 5 ilustra a influência do posicionamento da ligação grampo-face na superfície cônica composta de punção.

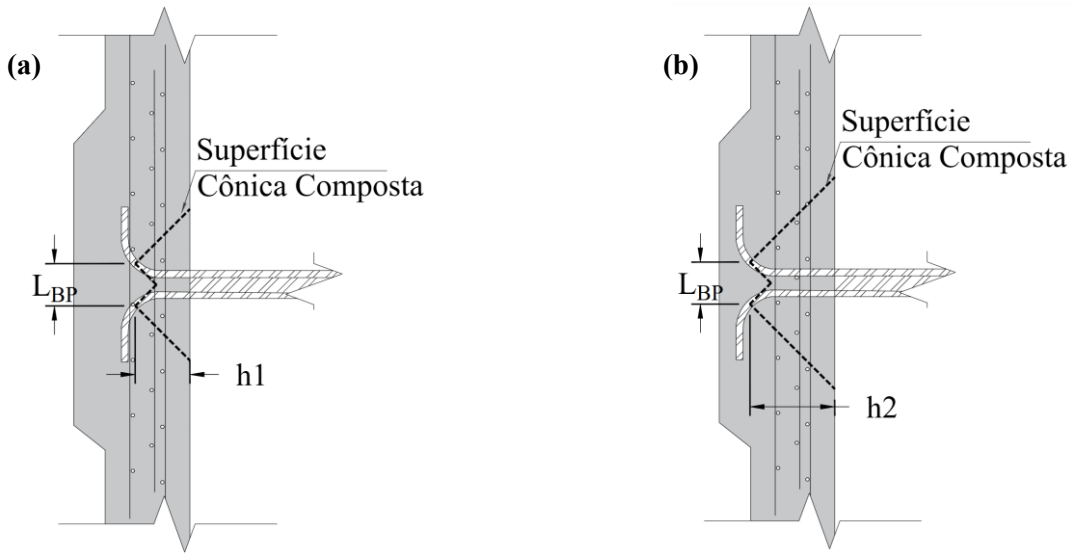


Figura 5. Influência do posicionamento da ligação grampo-face na superfície cônica composta de punção: (a) ligação com comprimento de ancoragem h1, (b) ligação com comprimento de ancoragem h2.

Cabe ressaltar que, embora o manual da FHWA (2015) fundamente o dimensionamento estrutural nas premissas do método LRFD, onde fatores de majoração incidem sobre a carga T_0 e fatores de minoração sobre as capacidades nominais (R_{FF}, R_{FP}), optou-se por uma adaptação metodológica neste trabalho. Para viabilizar o comparativo direto, a força T_0 foi mantida em seu valor nominal, enquanto os coeficientes de minoração foram aplicados diretamente às resistências dos materiais (γ_c e γ_s), alinhado aos preceitos da NBR 6118. A equiparação dos fatores de segurança foi fundamental para garantir que apenas as diferenças inerentes às formulações analíticas de cada norma fossem consideradas, evitando a influência de diferentes abordagens de segurança.

4 CONCLUSÃO

A análise comparativa desenvolvida neste trabalho evidencia diferenças entre os resultados obtidos no dimensionamento adotadas pela ABNT NBR 6118 e pela FHWA, tanto no contexto da resistência à flexão quanto da resistência à punção do paramento. Ao analisar a flexão, observa-se que o procedimento baseado na NBR 6118 se apresenta significativamente mais conservador, resultando em uma resistência à flexão (R_{FF}) mais que o dobro do valor requerido pelo esforço solicitante. Essa diferença sugere que, sob as condições normais de dimensionamento, a solução nacional proporciona maior margem de segurança frente à ruptura por flexão.

Por outro lado, a avaliação da punção revela um cenário oposto: a metodologia FHWA se mostra mais rigorosa, já que a resistência à punção estimada (R_{FP}), não depende do reforço adicional e não atende ao esforço solicitante, evidenciando a necessidade de ajustes no dimensionamento, como o aumento da espessura útil do paramento.

Desse modo, a análise comparativa evidencia que, enquanto a NBR 6118 proporciona maior segurança em relação à flexão, a FHWA estabelece critérios mais rigorosos para punção, além de implementar uma metodologia específica para esse dimensionamento. Diante disso, é fundamental considerar ambos os mecanismos de ruptura durante a avaliação. Essa abordagem integrada permite identificar possíveis deficiências, resultando em projetos estruturais robustos e alinhados com as melhores práticas internacionais.

Os resultados demonstram que a análise da punção na interface grampo-face altera significativamente o dimensionamento do paramento, reforçando a necessidade de estudos experimentais que quantifiquem essa resistência para as diversas ligações da prática construtiva. Essa preocupação converge com as diretrizes do Clouterre (1991), que recomenda o uso da tração máxima (T_{max}) no dimensionamento da face, evidenciando que negligenciar mecanismos de ruptura localizados pode comprometer a resiliência estrutural da contenção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. LRFD Bridge Design Specifications. 10th Edition. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2024.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
NBR 16920-2: Muros e taludes em solos reforçados – Parte 2: Solos grampeados. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.

BSI. BS 8006-2:2011: Code of practice for strengthened/reinforced soils – Part 2: Soil nail design. Londres: British Standards Institution, 2011.

GEORIO. Manual Técnico de Encostas. Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: GEO-RIO, 2014.

LAZARTE, C. A.; ROBINSON, H.; GÓMEZ, J. E.; BAXTER, A.; CADDEN, A.; BERG, R. Geotechnical Engineering Circular No. 7: Soil Nail Walls - Reference Manual. Publication No. FHWA-NHI-14-007 (FHWA GEC 007). Washington, DC: National Highway Institute, Federal Highway Administration, 2015.

MUCHETI, A. S.; ALBUQUERQUE, P. J. R. de; FALCONI, F. F. Rupturas de solo grampeado: reflexões do contexto anterior à Norma Brasileira ABNT-NBR 16920/2021. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS (COBRAE), 2021.

MUCHETI, A. S.; ALBUQUERQUE, P. J. R. de. Estimation of the displacement of soil nailing vertical face structures intended for building undergrounds. International Journal of Geotechnical Engineering, [S. l.], 2024. DOI: 10.1080/19386362.2024.2419654.

PABST, E.; LUDEMANN, S. M.; FRANÇA, D. C. de; FERNANDES, L. P. G. Solo grampeado: dimensionamento estrutural do paramento em concreto armado pela norma ABNT NBR6118:2014. São Paulo: ABMS - Núcleo Regional São Paulo / Instituto de Engenharia, 2023.

SCHLOSSER, M et al (1991) Project Clouterre: French National Research (Recommendations Couterre for the English version; ISBN 2-85978-170-6).