

Efeitos do Atrito nos Sistemas de Conexão em Revestimento Modernos de Túneis com Aduelas Pré-Fabricadas de Concreto

David Oliveira

Diretor Técnico, Túneis, Aurecon, Brisbane, Austrália, dafo407@gmail.com

Tiago de Jesus Souza

Dsc. Engenheiro Geotécnico, Solotechnique, Jundiaí, São Paulo, Brasil, tiago.souza@solotechnique.com.br

RESUMO: Uma vez grauteados em suas posições de montagem e comprimidos pelo maciço e pela pressão da água subterrânea, revestimentos de túneis modernos utilizando aduelas pré-fabricadas não necessitam de qualquer elemento de conexão durante sua operação, exceto em condições especiais de solicitação. Os sistemas de conexão das aduelas pré-fabricadas têm duas funções: para auxiliar no processo de construção das aduelas pré-fabricadas e/ou para prevenir ações não desejadas durante a instalação. Um objetivo especial está focado na criação e manutenção de força de compressão suficiente nas vedações das aduelas e anéis do túnel para garantir a estanqueidade imediata e de longo prazo. O dimensionamento e o projeto desses sistemas de conexões usualmente envolvem um processo de cálculo unidimensional, ignorando a realidade geométrica e a presença de outras aduelas e conectores. Este estudo se debruça sobre uma condição de projeto real, evidenciando o papel do atrito entre os elementos adjacentes e a utilidade de barras guia nas juntas radiais.

PALAVRAS-CHAVE: Aduelas Pré-Fabricadas Pra Tuneladoras, Sistemas de Conexão, Parafusos de Conexão, Barras de Transferência, Barras Guia.

ABSTRACT: Once grouted in their assembly positions and compressed by the ground and groundwater pressure, modern tunnel linings using precast concrete segments do not require connections during operation, except under special loading conditions. The connection systems of precast concrete segments serve two functions: to assist in the construction process of precast concrete segments and/or to prevent undesired actions during installation. A special objective focuses on creating and maintaining sufficient compressive force in the gaskets of the segments and tunnel rings to achieve the tunnel's immediate and long-term water tightness. The sizing and design of these connection systems usually involve a one-dimensional calculation process, ignoring the geometric reality and the presence of other segments and connectors. This study focuses on a real design condition, highlighting the role of friction between adjacent elements and the usefulness of guide rods in the radial joints.

KEYWORDS: Precast Concrete Segments for Tunnel Boring Machines, Connection Systems, Connection Bolts, Transfer Bars, Guide Bars.

1 INTRODUÇÃO

Parafusos de conexão em revestimentos pré-fabricados de tuneis foram inicialmente incluídos para auxiliar na construção de anéis de concreto com flanges, com geometria similar aos revestimentos de túneis de ferro fundido. Nos revestimentos modernos de túneis com aduelas de concreto, os cilindros hidráulicos da tuneladora mantêm as aduelas posicionadas, impedindo a sua queda após sua elevação na posição de projeto. Os cilindros hidráulicos geralmente só são removidos para colocar a aduela do próximo anel, exceção para o caso de falhas mecânicas ou hidráulicas ou por erros do operador. O risco de remoção acidental dos cilindros hidráulicos devido a erros do operador também foi reduzido na construção moderna de túneis, com recursos de segurança adotados no PLC (Controlador Lógico Programável) da tuneladora. Nesse contexto, os parafusos temporários podem ter perdido seu objetivo de projeto, especialmente em juntas longitudinais. Portanto, são

características herdadas no projeto sem um papel claro e a justificativa tem se concentrado em comprimir e prender as forças de vedação. (Harding et al., 2014).

A função de comprimir a vedação durante a montagem da aduela por meio de parafusos está obsoleta na construção de túneis modernos. Para as juntas vedações localizadas ao longo das juntas circunferenciais, é aceito que as forças dos cilindros hidráulicos são significativamente maiores do que as forças dos parafusos, proporcionando assim essa função. Os braços hidráulicos com dispositivos de transporte de aduelas a vácuo modernos também podem oferecer essa função para as juntas longitudinais. Depois de ser colocado e a vedação longitudinal comprimida pelo braço de levantamento, a aduela recém-instalada é mantida em posição, incluindo a resistência das forças de vedação, pelos cilindros hidráulicos da tuneladora, permitindo a instalação da aduela adjacente no mesmo anel.

As orientações disponíveis para o projeto dos conectores geralmente recomendam que os parafusos sejam projetados para suportar as forças de vedação sob a compressão desejada (DAUB, 2013; ACI 533.5R, 2020). No entanto, essa função só seria necessária em casos específicos quando os cilindros hidráulicos da TBM são removidos de um anel para montar as aduelas do anel seguinte ou acidentalmente no mesmo anel.

Este artigo investigará como os fatores geométricos das aduelas influenciam o desempenho dos conectores para conter movimentos sob diferentes condições de carga. Também comparará três sistemas de conectores em diferentes casos de carga para o projeto de uma tuneladora de grande diâmetro. Uma análise detalhada das juntas demonstrará como o uso combinado de conectores de cisalhamento e barras guia pode evitar movimentos excessivos das aduelas sob cargas de vedação de forma mais confiável do que os parafusos de conexão temporários em juntas longitudinais. É importante ressaltar que, se as barras guia forem utilizadas para fornecer impedimento do movimento das aduelas, elas devem ser especificadas e testadas corretamente como elemento estrutural com a capacidade de cisalhamento temporária necessária, incluindo alguma margem para fluência dentro da escala de tempo da aplicação

2 AVALIAÇÃO DE UM ANEL SEM CARGA

Um caso crítico para o desempenho dos conectores ocorre quando os cilindros hidráulicos da tuneladora são removidos para colocar uma aduela durante a construção do próximo anel. Em alguns casos, manter um cilindro hidráulico segurando a aduela pode não ser sempre possível devido a restrições de espaço. Isso significa que a aduela está livre para se deslocar longitudinalmente sob as forças de vedação. Esse movimento precisa ser resistido pelos conectores da aduela, principalmente onde existem preocupações de que os cilindros hidráulicos na nova aduela à frente possam não recomprimir a vedação anterior, por exemplo, devido a intrusão de material no invertido. Esta seção examina o desempenho dos conectores em um túnel de grande diâmetro TBM sob este caso de carga.

O revestimento pré-fabricado do túnel é composto por oito aduelas romboidais e duas aduelas trapezoidais com uma espessura de 500 mm e comprimento de 2,4 m, formando um anel universal com um diâmetro externo de 15,85 m. Todas as aduelas têm um comprimento de perímetro aproximado de 4,82 m (36 graus ao longo do PCD). Todas as juntas são modeladas com uma largura de contato de 300 mm, uma vedação simétrica e sulcos de calafetagem de 100 mm.

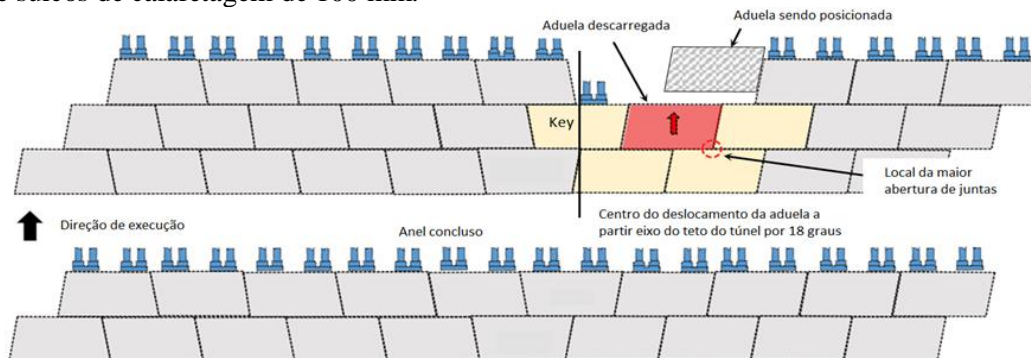


Figura 1. Esquema descritivo simplificado do problema: Aduela não carregada em hachura vermelha com vizinhas em dourado.

As juntas longitudinais têm um ângulo de junção de 10 graus em relação ao eixo do túnel. As juntas longitudinais das aduelas-chave são formadas com um ângulo de chanfro de 7,5 graus com o raio para melhorar a montagem da aduela-chave durante a elevação par montagem. A inclinação do anel é ignorada.

Uma aduela na parte inferior do anel (invert) provavelmente tem o risco mais significativo de intrusão de material na junta, o que afetaria a recompressão da vedação. No entanto, as aduelas no invert geralmente são apoiados por barras guias de construção na tuneladora, portanto, menos afetados pelas forças gravitacionais que impactam a abertura da junta. Portanto, uma aduela instalada próxima à aduela-chave no teto do túnel é uma representação crítica dos movimentos de rotação e cisalhamento.

A junta de vedação adotada possui uma largura superior de 37 mm, projetada para uma pressão da água de 12 bars, incluindo um fator de segurança a longo prazo de 2 para relaxamento de juntas de vedação de EPDM e outras incertezas. A folga máxima permitida para satisfazer a pressão de projeto de 12 bars seria de 8 mm a 9 mm para deslocamentos entre 15 mm e 20 mm.

Um modelo numérico 3D foi desenvolvido no software FLAC3D V7 da Itasca para considerar os fatores geométricos do anel não carregado, i.e. durante sua instalação, conforme descrito na próxima seção.

2.1 Descrição do modelo numérico

As Figuras 2 e 3 apresentam o layout dos modelos numéricos. A aduela não carregada é modelada com elementos sólidos limitados pelas juntas de três aduelas (destacadas na Figura 1). As juntas são modeladas com elementos de contato, permitindo a separação. Três sistemas de conectores diferentes são examinados:

- Sistema A: Parafusos de conexão temporários em ambas as juntas circunferenciais e longitudinais.
- Sistema B: Conectores de cisalhamento na circunferência e parafusos (de conexão) temporários na longitudinal.
- Sistema C: Conectores de cisalhamento na circunferência barras guias na longitudinal.

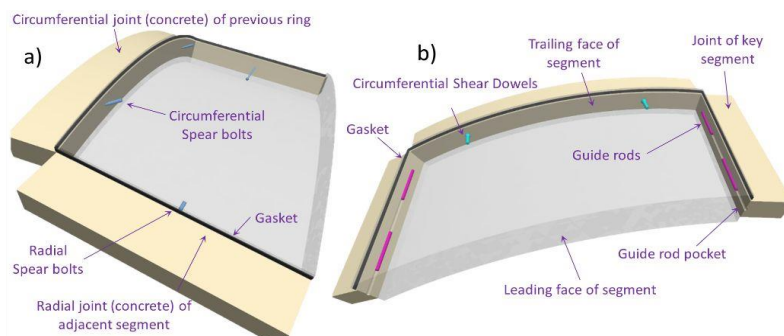


Figura 2. Vista em perspectiva da geometria do modelo com (à direita) e sem barras guias (à esquerda).

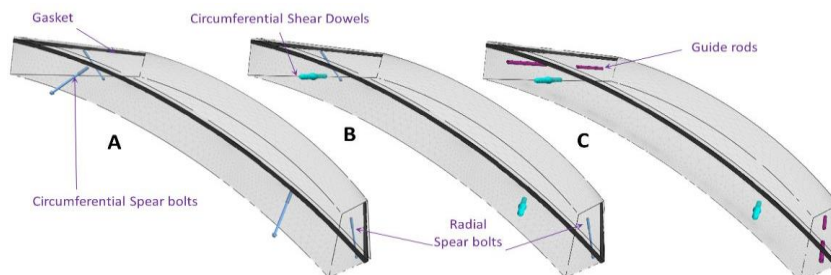


Figura 3: Vista em perspectiva da geometria do modelo dos três sistemas investigados.

As vedações são modeladas com elementos sólidos. Apenas as faces carregadas são incluídas, ou seja, a face frontal é ignorada. Elas são posicionadas a 61,7 mm da borda da aduela.

Tanto o concreto quanto a vedação são modelados com materiais elásticos lineares. O concreto possui um módulo de Young de $E = 38 \text{ GPa}$, coeficiente de Poisson de $\nu = 0,2$ e peso específico de 24 kN/m^3 . Os elementos de interface das juntas são modelados com um coeficiente de atrito de $\mu = 0,58$ e rigidez normal e de cisalhamento de 10 GPa/m e $1,5 \text{ GPa/m}$, respectivamente. As rigidezes normal e de cisalhamento são

estimadas com base nas relações empíricas propostas por Bandis (1980), assumindo uma abertura inicial típica de 0,1 mm aplicável às tolerâncias de moldagem.

A vedação é modelada com módulo de Young dependente da deformação, com base em um comportamento calibrado discutido posteriormente. Os valores adotados na análise não são os verdadeiros módulos de Young da vedação de EPDM, pois apenas uma vedação é modelada sem vazios internos. Os módulos calibrados consideram implicitamente os efeitos dos vazios no comportamento carga-deslocamento da vedação e apenas uma vedação.

Todos os parafusos e conectores de cisalhamento são modelados com elementos estruturais de viga, capturando a capacidade de tração e cisalhamento quando aplicável. Os elementos de viga estão embutidos nas zonas de concreto, com comportamento calibrado com base nos dados do fornecedor. A cabeça dos parafusos de conexão é fixada apenas para forças de tração, e o comprimento não soquetado é modelado com interação zero com a aduela para permitir os vazios nos furos dos parafusos.

As barras guia são modeladas como zonas sólidas e material elástico. Um sulco contínuo é incluído na aduela superior, conforme mostrado na Figura 2b, são introduzidos elementos de contato entre as barras guia e a aduela, com uma redução na rigidez normal do contato (5 GPa/m) para considerar as pequenas tolerâncias do sulco. As barras guia foram modeladas com um módulo de Young $E = 2.5$ GPa para um plástico do tipo poliamida.

Os alinhamentos externos das aduelas vizinhas são fixados na direção normal, assumindo que eles estão mantidos no lugar pelos cilindros hidráulicos no próximo anel que está sendo construído. A condição de contorno da aduela não carregada na face dianteira varia da seguinte forma:

- Estágio 1: As vedações são comprimidas para eliminar espaços vazios e as juntas das aduelas são carregadas na direção normal com a mesma força que a força total da vedação.
- Estágio 2: As cargas são removidas da face dianteira e a aduela pode se mover sob as cargas de reação da vedação e da gravidade. As faces traseiras das vedações são fixadas na direção normal para permitir a descompressão.

As forças de aro no anel construído foram inicializadas com a mesma magnitude que as forças totais da vedação.

Os dados fornecidos pelo fornecedores foram utilizados para calibrar o comportamento do modelo correspondente a fim de representar os conectores com mais precisão. Essa calibração e maiores detalhes do modelos são apresentadas em Oliveira et al. (2024)

2.2 Curvas de interação simples

Antes de examinar os modelos numéricos 3D, vale a pena fazer estimativas preliminares usando equilíbrio de forças simples e compatibilidade de deslocamento. Dois casos são considerados para as juntas circunferenciais: (1) sem e (2) com espaçadores plásticos. As forças devem ser resolvidas para o componente correto com base no ângulo de instalação na junta.

2.2.1 Sem espaçadores

As juntas de vedação estão totalmente comprimidas para um espaço zero nos casos sem espaçadores plásticos de construção. Uma vez que os cilindros são removidos, as juntas de vedação das juntas circunferenciais empurrarão a aduela para longe, abrindo o espaço da junta (Fig. 4). Este movimento precisa ser resistido pelos conectores na junta circunferencial para limitar o espaço, assumindo que a junta de vedação não seja recomprimida assim que a próxima aduela seja instalada. O espaço da junta de vedação deve ser limitado a 9 mm para manter a estanqueidade à água requerida para um desnivelamento máximo de 15 mm.



Figura 4. Equilíbrio de forças horizontais em juntas circunferenciais

É possível identificar em que deflexão da junta de vedação ocorre uma compatibilidade de forças e deslocamentos traçando as curvas da junta de vedação em relação às curvas dos conectores ajustadas para o seu comprimento de vedação efetivo (2,45 m no caso da junta circunferencial). Como mostrado na Figura 5, o sistema A com parafusos de conexão nas juntas circunferenciais requereria aproximadamente 1,8 mm para alcançar o equilíbrio. Em contraste, os sistemas B e C com conectores de cisalhamento exigiriam uma deflexão mínima de 4 mm, ou pelo menos 6 mm se considerarmos uma absorção de carga de 3 mm. Se uma tolerância total do sulco onde é colocada a vedação de 1 mm for adicionada, a folga final seria inferior a 3 mm para o sistema A e 7 mm para os sistemas B e C. É evidente que os parafusos de conexão são consideravelmente mais rígidos para movimentos tão restritos, principalmente ao longo das juntas longitudinais.

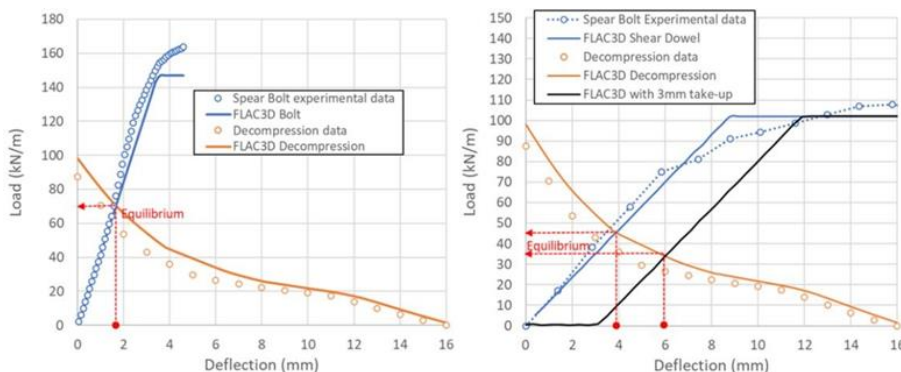


Figura 5. Compatibilidade de forças horizontais em juntas circunferenciais para (esquerda) Sistema A e (direita) Sistemas B e C.

2.2.2 Com espaçadores

As tolerâncias fora do plano durante a construção podem exigir peças para correção e ajustes de montagem, ou seja, espaçadores de contato, nas juntas circunferenciais, para regularizar as superfícies de contato entre anéis adjacentes, ou seja, para correção de planicidade, e para centralizar a força da tuneladora na espessura das aduelas.

Como o sulco da junta de vedação não é alterado, a presença dos espaçadores durante a construção significa que as juntas de vedação não estão totalmente comprimidas durante a instalação. A espessura da junta de vedação comprimida aumentará a distância do fundo do sulco (Fig. 6). Adotar um espaçador com uma espessura comprimida de 5 mm significa que o espaço da junta de vedação começa com 5 mm com uma força de aproximadamente 40 kN/m e a distância do fundo do sulco em 29 mm.

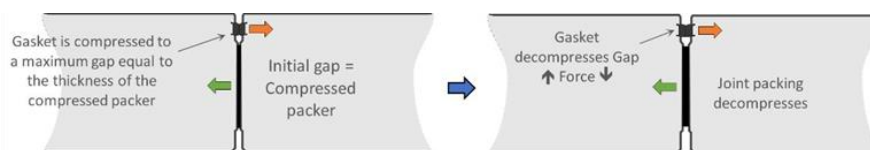


Figura 6. Efeito dos espaçadores na compressão da junta de vedação.

A Figura 7 mostra que se um espaçador de aduelas de 5 mm for utilizado, o sistema A exigiria um adicional de 0,8 mm para alcançar o equilíbrio, enquanto os sistemas B e C exigiriam um mínimo adicional de 2,3 mm. Este último valor aumentaria para 4,8 mm se uma absorção de carga de 3 mm fosse considerada. A folga final seria inferior a 6 mm para o sistema A e até 11 mm para os sistemas B e C. Este resultado indica que se um espaçador de 5 mm for utilizado e os conectores de cisalhamento estiverem desalinhados com uma absorção de carga de 3 mm, os sistemas B e C podem não alcançar a estanqueidade à água requerida (FS 2), enquanto o sistema A alcançaria. Este risco pode ser mitigado impondo uma espessura máxima de espaçador comprimido de 3 mm, selecionando conectores mais rígidos para limitar as deflexões ou redesenhando o sistema de encaixe dos conectores para limitar as absorções de carga. No entanto, como será demonstrado posteriormente neste artigo, se toda a geometria 3D da aduela for considerada, outros fatores influenciam o desempenho desses sistemas, reduzindo esse risco para uma faixa aceitável.

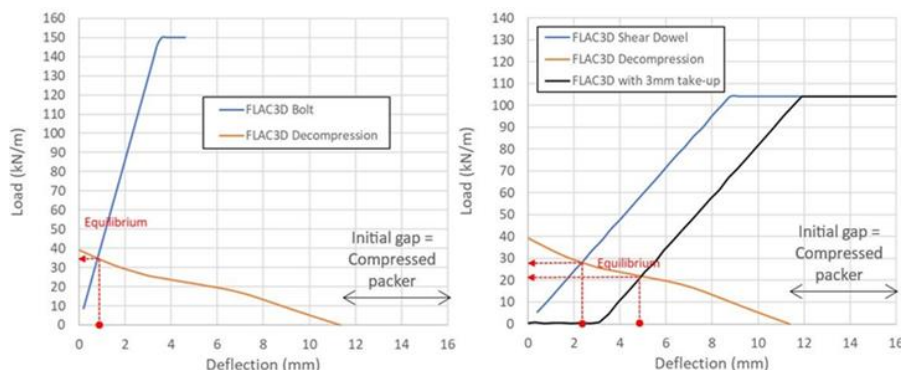


Figura 7 Compatibilidade de forças horizontais na junta circunferencial com espaçadores de 5 mm para (a esquerda) Sistema A e (a direita) Sistemas B e C.

2.3 Resultados do modelo numérico

A análise dos três sistemas de conectores foi dividida em diferentes casos com todos os sistemas submetidos a um caso de compressão completa da junta de vedação com um segundo subcaso utilizando espaçadores comprimidos de 5 mm. A Tabela 1 apresenta uma descrição detalhada dos diferentes casos analisados.

Tabela 1. Casos base

Caso	Descrição
A1	Parafusos nas juntas circunferenciais e longitudinais
A2	A1, mas com um espaçador de 5 mm
B1	Conectores de cisalhamento com uma absorção de 3 mm nas juntas circunferenciais e parafusos de conexão nas juntas longitudinais
B2	B1, mas com um espaçador de 5 mm
C1	Conectores de cisalhamento com uma absorção de 3 mm nas juntas circunferenciais e barras guias nas juntas longitudinais
C2	C1, mas com um espaçador de 5 mm

A Tabela 2 resume a deflexão máxima ao longo da junta de vedação circunferencial observada nos modelos. Os resultados do modelo são aumentados em 1 mm para permitir tolerâncias do sulco para determinar as folgas máximas. Portanto, as folgas para os sistemas A, B e C sem os espaçadores seriam de 2,8 mm, 5,9 mm e 4,8 mm, respectivamente. Em todos os casos, a abertura máxima da junta ocorre próxima ao canto da junta circunferencial destacado na Figura 1.

Tabela 2. Deflexão máxima da junta de vedação ao longo da junta circunferencial para os casos base.

Deflexão da Junta de Vedação (mm) ¹					
A1	B1	C1	A2	B2	C2
1,8	4,9	3,8	5,72	8,62	6.22

Notas:

- 1 Todos os resultados devem adicionar 1 mm para permitir as tolerâncias do sulco da junta de vedação.
- 2 A espessura do espaçador (5 mm) foi adicionada à deflexão para encontrar a folga.

Os sistemas A e B apresentam uma comparação relativamente boa com as previsões utilizando o equilíbrio simples de forças e deflexões compatíveis. No entanto, é essencial observar que a compatibilidade de deslocamento e forças depende apenas parcialmente das forças dos conectores, ao contrário dos diagramas de interação simples. Como mostrado na Tabela 3, o atrito ao longo das juntas longitudinais dissipa parte das forças da junta de vedação. Utilizando o diagrama de interação simples à esquerda da Figura 5, as forças dos parafusos no caso A1 corresponderiam a 343 kN (70 kN/m x 4,9 m), enquanto no modelo numérico, apenas 215 kN, com outros 123 kN dissipados por atrito. Para B1, as forças das cavilhas no diagrama de interação simples (Fig. 5, à direita) são de 171 kN (35 kN/m x 4,9 m), enquanto no modelo numérico, apenas 109 kN, com 98 kN dissipados por atrito. O efeito do atrito também explica por que o sistema com conectores e barras guias apresenta um desempenho ligeiramente melhor no modelo numérico do que na estimativa de interação simples. A presença física das barras guias restringe melhor a rotação, como observado na Figura 8. Esta menor

rotação promove um melhor contato da junta (Figura 9) do que nos casos A1 e B1, mantendo assim forças de atrito mais altas.

Tabela 3. Resumo das forças na direção Y observadas nos modelos.

Componente	Força-Y para os diferentes sistemas/casos (kN)					
	A1	B1	C1	A2	B2	C2
Vedação circunferencial	338	207	191	177	125	141
Parafuso circunferencial	-215	-	-	-76	-	-
Barras guia	-	-109	-25	-	-21	0
Atrito	-123	-98	-165	-101	-104	-141

Notas:

1 As forças axiais foram corrigidas para o ângulo do parafuso.

Embora todos os sistemas tenham atendido à estanqueidade à água requerida sem espaçadores, C1 apresenta um melhor desempenho contra a rotação da aduela do que os sistemas A1 e B1, como evidenciado pelos deslocamentos Z e X da Figura 9. O sistema A1 experimenta a maior rotação em torno do eixo Y devido ao desempenho inadequado dos parafusos de conexão em cisalhamento e rotação (Oliveira e Harding, 2023; Harding et al., 2014). O sistema B1 experimentou alguma rotação em torno do eixo X devido ao desempenho inadequado dos parafusos nas juntas longitudinais.

Quando um espaçador comprimido de 5 mm é adicionado às juntas circunferenciais, ou seja, nos casos A2, B2 e C2, as folgas máximas finais são previstas como sendo de 6,7 mm, 9,6 mm e 7,2 mm, respectivamente (Tabela 2 + 1 mm), em comparação com 5,7 mm, 11 mm e 11 mm com as curvas de interação simples (consulte a Figura 7 e a seção 2.2.2 acima). Com esses resultados, o único caso que não atende à estanqueidade à água requerida com espaçadores é o B2, por uma margem de 0,6 mm, o que, em princípio, poderia ser considerado satisfatório devido ao fator de segurança adotado e às cargas conservadoras sem relaxamento a curto prazo. No entanto, os modelos numéricos preveem deflexões menores do que os diagramas simples para os casos B2 e C2 devido às forças de atrito (Tabela 3) desenvolvidas durante a absorção de carga dos conectores de cisalhamento. Observa-se que os mapas de contorno para os casos A2, B2 e C2 não são apresentados neste artigo, pois os padrões de movimento são muito semelhantes aos observados na Figura 11, diferindo apenas em magnitude.

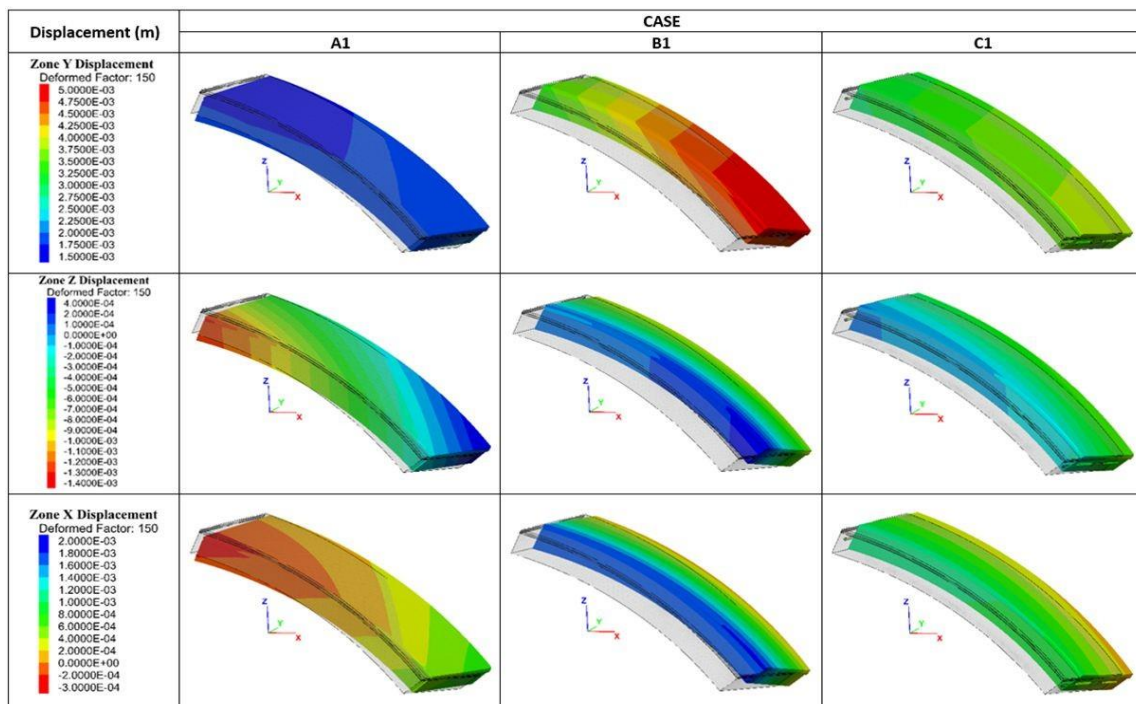


Figura 8. Contornos de deslocamento com exagero de 150x em relação à forma não deformada transparente.

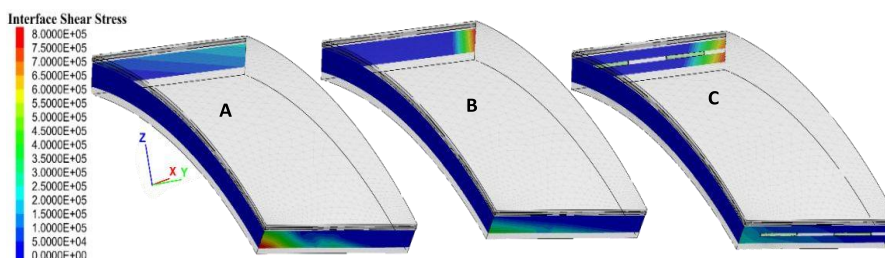


Figura 9. Tensões de atrito (cisalhamento) desenvolvido nas juntas.

CONCLUSÕES

A análise detalhada das juntas apresentada neste artigo, utilizando um exemplo de projeto realista, demonstrou como os fatores rotineiramente ignorados no projeto moderno de aduelas são cruciais para a capacidade dos parafusos de conexão de restringir o movimento das aduelas sob cargas de vedação.

Os exemplos mostraram que, enquanto os parafusos de conexão temporários podem fornecer alguma funcionalidade em juntas circunferenciais, eles fornecem função mínima em juntas longitudinais. Como os conectores de cisalhamento geralmente têm uma rigidez menor do que os parafusos de conexão temporários, o uso deles em juntas circunferenciais pode aumentar ligeiramente a folga potencial da vedação. No entanto, conectores de cisalhamento com rigidez maior podem ser selecionados em princípio, em contraste com o sistema flexível analisado neste artigo. Os benefícios de permitir maiores deslocamentos devido à restrição de rotações e movimentos de cisalhamento podem compensar as folgas potencialmente um pouco maiores. Além disso, o uso combinado de conectores de cisalhamento e barras guias estruturais, ou seja, com resistência adequada ao cisalhamento, pode evitar movimentos excessivos das aduelas sob cargas de vedação de forma melhor e mais confiável do que os parafusos de conexão temporários em juntas longitudinais sob condições semelhantes ao estudo neste artigo.

Os resultados numéricos também demonstraram o papel do atrito na junta em reduzir as cargas transferidas para os conectores. Nos casos base, o atrito dissipou entre 30% e 85% das forças da vedação assim que a aduela foi descarregado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI 533.5R (2020). Guia para Aduelas de Concreto Pré-Fabricado de Túneis. Relatório pelo Comitê 533 do American Concrete Institute (ACI).
- Bandis, S.C. (1980). Estudos Experimentais de Efeitos de Escala na Resistência ao Cisalhamento e Deformação de Juntas de Rocha. Tese de Doutorado. Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Leeds.
- ASTM International (2006). ASTM D2166: *Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil*.
- Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB) Comitê Alemão de Túneis - ITA-AITES (2013). Recomendações para o projeto, produção e instalação de anéis de aduelas pré-fabricadas. Colônia, Alemanha.
- Gruebl, F., 2006. Anéis com aduelas (Cargas críticas e prevenção de danos). In: Simpósio Internacional sobre Escavação Subterrânea e Túneis, Bangkok, Tailândia.
- Harding, A., Chappel, M., King, M., 2014. Mito e realidade: parafusos em revestimentos de túneis em aduelas de concreto modernos para túneis. Atas do Congresso Norte-Americano de Túneis, SME, EUA.
- Oliveira, D., Harding, A. (2023). Juntas longitudinais em revestimentos de túneis com aduelas pré-fabricadas: usar ou não usar parafusos? Na: Conferência Mundial de Túneis, ITA-AITES, Atenas, Grécia.
- Oliveira, D., Asche H. and Harding, A. (2024). "Friction effects on connection systems in modern concrete segmental linings". *Geomechanics and Tunneling* 17. <https://doi.org/10.1002/geot.202300044>