

Considerações sobre a necessidade de armação da base de tubulões

Waldemar Hachich

Professor Titular, Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil, whachich@usp.br

Marcelo Ferreira dos Santos

Diretor Técnico, Consultrix, São Paulo, Brasil, ferreira@consultrix.com.br

Guilherme Araújo Velasco Silva

Projetista, Consultrix, São Paulo, Brasil, guilherme.araujo@consultrix.com.br

RESUMO: No que se refere a fundações diretas, a NBR6122:2010 determina que o dimensionamento estrutural de sapatas seja feito segundo a NBR6118 e que, para blocos, se respeite um ângulo β mínimo, obtido a partir do f_{ck} do concreto utilizado e da tensão admissível no solo. Para tubulões, no entanto, é apenas prescrito o ângulo $\beta=60^\circ$ para o alargamento da base. A prática indica não haver necessidade de armação para tração no nível de apoio de tubulões, talvez também em função do efeito de confinamento. Todavia, não há ainda um consenso geral, havendo projetistas que preferem utilizar bases armadas para resistir a tensões que poderiam exceder a resistência do concreto simples à tração. Este trabalho busca elucidar esse ponto por meio de um estudo numérico, utilizando o *software* geotécnico Plaxis 3D, de elementos finitos, para a previsão das tensões horizontais de tração na base do tubulão em situações reais de obra.

PALAVRAS-CHAVE: tubulões, tração, base, armação, MEF-3D

ABSTRACT: On the subject of direct foundations, NBR6122:2010 establishes that structural design of footings must follow NBR6118, while the geometry of blocks must exhibit a minimum β angle, calculated from the concrete f_{ck} and the maximum allowable stress on the soil. For caissons, however, just an angle $\beta=60^\circ$ is required for the base enlargement. Practice indicates that steel reinforcement is not necessary at the level of support of the caissons, possibly also because of the confining effect. However, there is no general consensus, and some designers prefer to use steel reinforced bases to resist tension that might exceed the tensile strength of concrete. This study tries to clarify this point by means of numerical analyses conducted using Plaxis 3D, a geotechnical finite element software, so as to predict horizontal tensile stresses in the base of caissons in real world situations.

KEYWORDS: caissons, tension, base, steel reinforcement, 3D-FEM

1 Introdução

Há cerca de 15 anos, inquieto com a ausência de explicações bem fundamentadas, o Prof. Mário Franco iniciou uma polêmica quanto à necessidade de se armarem as bases de tubulões nos casos em que tensões admissíveis bastante elevadas no solo pudessem gerar, na base dos tubulões, tensões de tração inadmissíveis para o concreto simples. Na época, a Consultrix projetava uma fundação em tubulões para uma tensão de 19 kgf/cm^2 (1900 kPa) no solo.

O Prof. Mário Franco embasou sua argumentação nos resultados obtidos a partir de um modelo de cálculo tridimensional no *software* estrutural SAP 2000 e posteriormente, preocupado com a redação proposta na revisão de 2006 da NBR6122, escreveu um breve relato técnico daquele estudo (Franco, 2007). Em 2004 a Consultrix havia consultado também o Prof. Augusto Carlos de Vasconcelos, que havia considerado perfeito o trabalho de modelagem 3D do Prof. Mário Franco, ressaltando porém a sua sensação de que fatores inerentes ao comportamento do solo, não representáveis naquele modelo de elementos finitos, poderiam contribuir para a redução das tensões de tração na base dos tubulões (Vasconcelos, 2004).

Este trabalho retoma a polêmica, apresentando previsões de comportamento obtidas a partir de um *software* geotécnico de elementos finitos 3D, o qual permite incluir comportamentos mais realistas do solo e, com isto, tentar ajudar a entender os argumentos daqueles dois mestres que são, ainda hoje, motivos de orgulho para a engenharia brasileira.

2 Modelos de análise

2.1 Os modelos originais do Prof. Mário Franco (Franco, 2007)

2.1.1 Hipóteses gerais

Os modelos foram, na ocasião, analisados no *software* SAP-2000, admitindo comportamento elástico linear para o concreto e para o solo.

O modelo básico consistia em um tubulão com fuste de 1,20 m de diâmetro, base circular de 3,00 m de diâmetro, altura da base de 1,56 m, ângulo da base $\beta=60^\circ$ e chanfro de 0,2 m. A seção transversal desse modelo 3D está representada na Figura 1.

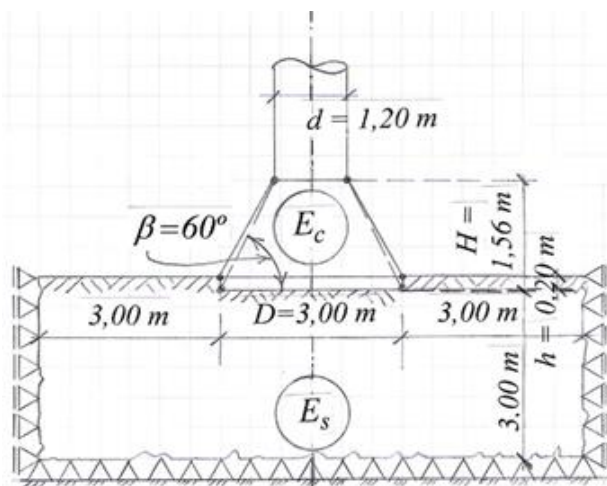


Figura 1. Seção transversal do tubulão e solo para análise 3D no SAP-2000 (Franco, 2007)

Vale destacar o afastamento modesto das fronteiras (3,0 m lateral e verticalmente).

A Tabela 1 apresenta as propriedades dos materiais e seus símbolos, adotados por Franco (2007).

Tabela 1. Propriedades dos materiais (Franco, 2007)

Material	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson
Concreto	$E_c = 20.000$	não informado
Solo	Variável ($20 \leq E_s \leq 12.000$)	não informado

2.1.2 Verificação da aplicabilidade da solução aproximada baseada na Teoria da Elasticidade

O modelo da Figura 1, com exclusão do solo e com tubulão sujeito a tensão normal uniforme na base, foi utilizado para verificar a validade da expressão, derivada da Teoria da Elasticidade, de tensão máxima de tração ($\sigma_{t,max}$) na base de blocos alongados, proposta por Langendonck (1944) também para tubulões.

2.1.3 Verificação das tensões de tração ($\sigma_{t,max}$), com presença de solo, comportamento elástico linear

Conforme ainda a Figura 1, o modelo mais completo incluía tubulão e solo, para verificação das tensões de tração na base em situação de interação elástica linear tubulão-solo. A Figura 2 apresenta a discretização em elementos finitos utilizada na análise 3D com o SAP-2000.

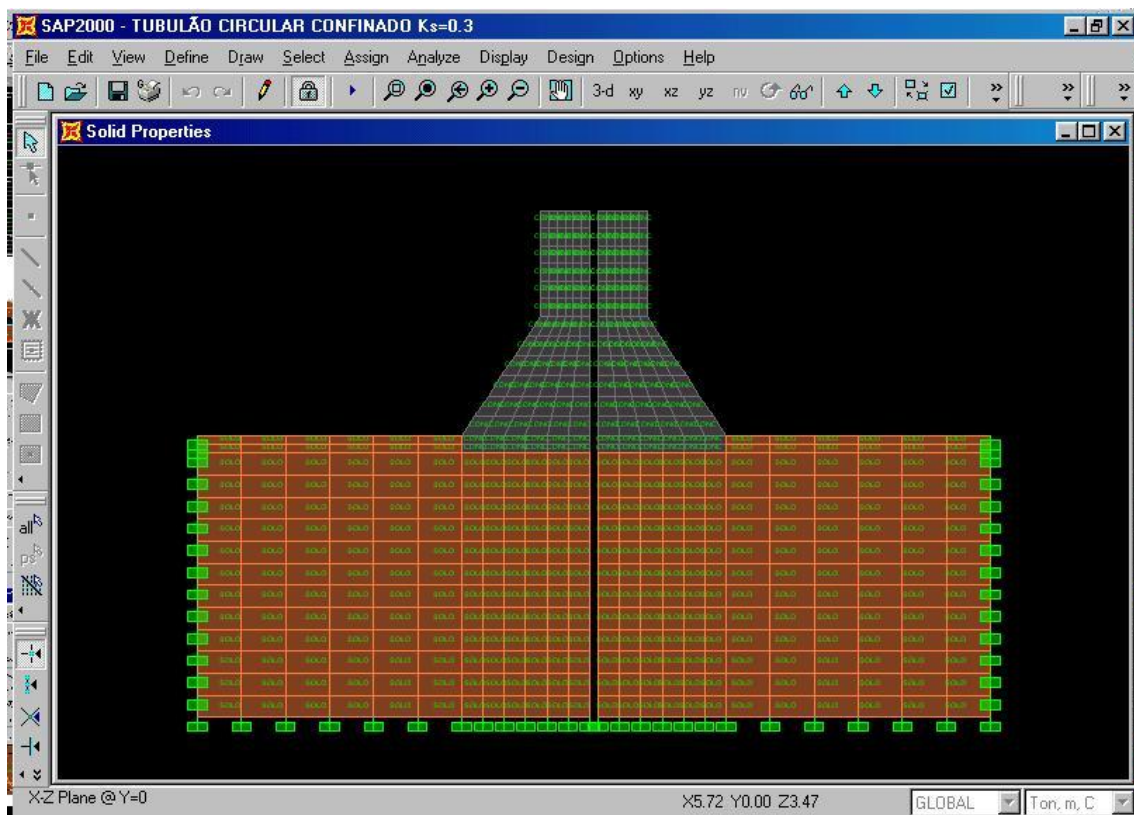


Figura 2. Discretização do modelo tubulão-solo para análise 3D com o SAP-2000 (Franco, 2007)

Vale destacar o comprimento diminuto do fuste (cerca de 1,2 m apenas).

2.2 O modelo deste estudo

2.2.1 Hipóteses gerais

O modelo foi analisado no *software* Plaxis 3D (2017). Para efeito de comparação com os resultados do estudo anterior adotou-se, inicialmente, comportamento elástico linear tanto para o concreto quanto para o solo. Para estudos subsequentes adotou-se, para o solo, comportamento elástico linear-perfeitamente plástico, com critério de plastificação de Mohr-Coulomb.

O modelo analisado no Plaxis 3D foi sempre tridimensional mas, considerando a sua característica axissimétrica, na Figura 3 está representada apenas a metade da seção transversal completa. Em todas as análises $\beta=60^\circ$, além de ter sido adotado um afastamento bem mais generoso das fronteiras e a representação completa do fuste.

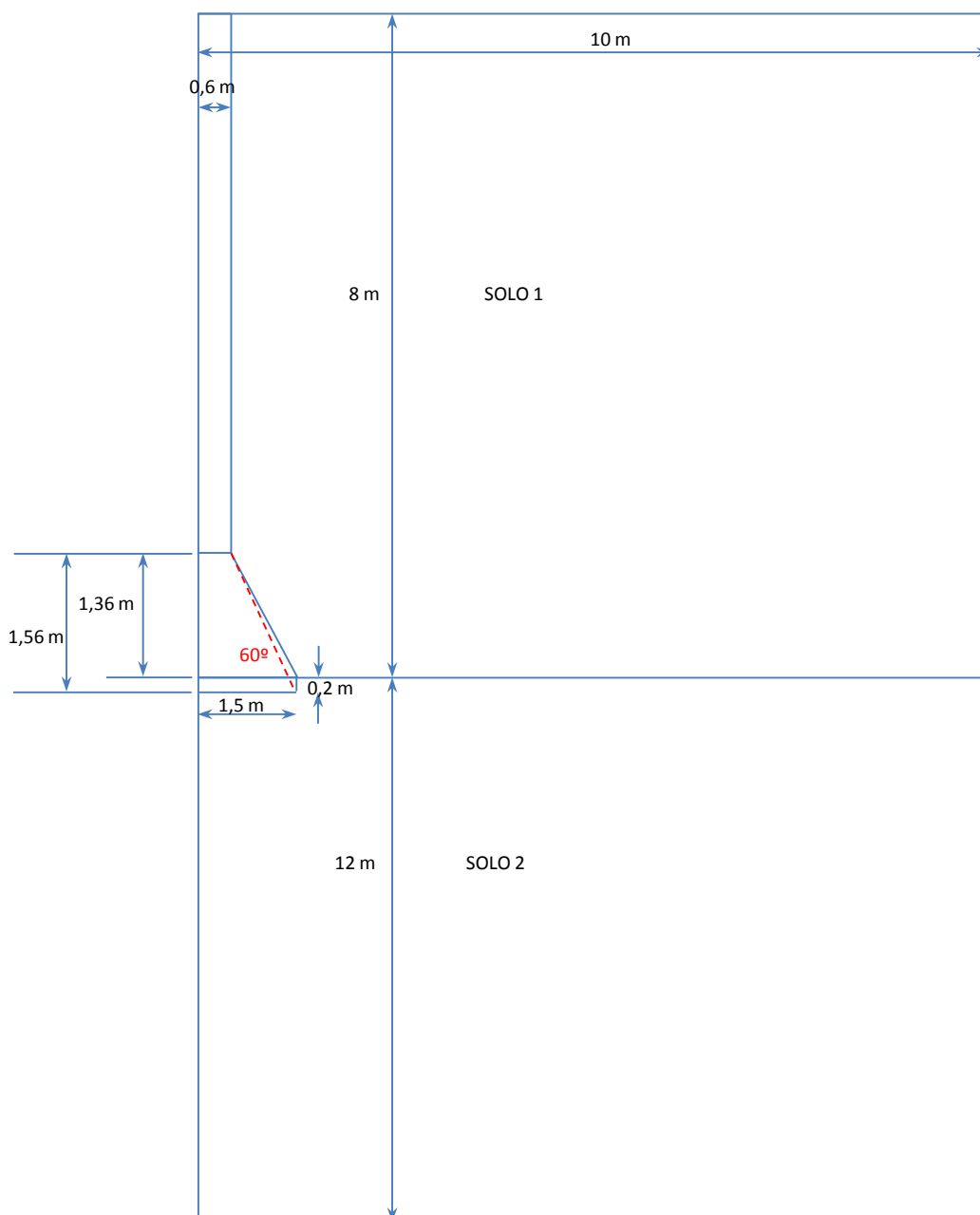


Figura 3. Meia seção transversal do modelo tubulão-solo deste estudo

A Tabela 2 apresenta os valores das propriedades dos materiais e seus símbolos, adotados neste estudo.

Tabela 2. Propriedades dos materiais utilizados neste estudo para comparação com estudos anteriores

Material	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson
Concreto	$E_c = 20.000$	0,15
Solo 1 (envolvendo fuste e base, acima do rodapé)	10	0,30
Solo 2 (apoio do tubulão, envolvendo também o rodapé)	Variável ($20 \leq E_s \leq 12.000$)	0,30

2.2.2 Verificação da aplicabilidade da solução aproximada baseada na Teoria da Elasticidade

Para esta verificação considerou-se, como no estudo original, somente o tubulão, sujeito a tensão normal uniforme na sua base.

2.2.3 Verificação das tensões de tração ($\sigma_{t,max}$), com presença de solo, comportamento elástico linear

O modelo mais completo incluía tubulão, solo 1 e solo 2, para verificação das tensões de tração na base em situação de interação tubulão-solo, conforme a Figura 4.

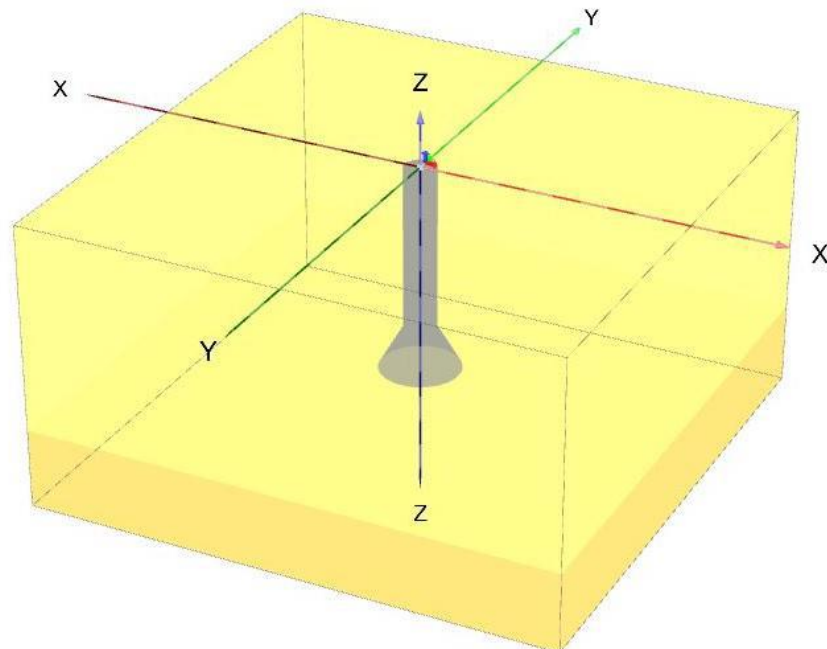


Figura 4 – Modelo tridimensional (tubulão, solo 1 e solo 2) analisado no Plaxis 3D

2.2.4 Verificação das tensões de tração ($\sigma_{t,max}$), com presença de solo, comportamento elástico linear-perfeitamente plástico, critério de plastificação de Mohr-Coulomb

Este modelo também incluiu tubulão, solo 1 e solo 2, conforme a Figura 4. Modificaram-se, porém, as propriedades dos solos e as tensões normais admissíveis, com dois objetivos:

a) considerar comportamento um pouco mais realista dos solos, levando em conta a provável plastificação de regiões do maciço, com alteração da distribuição de tensões normais na base;

b) compatibilizar parâmetros de deformabilidade, parâmetros de resistência e tensões admissíveis, de modo a simular situações mais aderentes à prática do projeto de fundações profundas em tubulões.

Os valores adotados nesta etapa estão reunidos na Tabela 3.

Tabela 3. Propriedades dos materiais mais realistas utilizados neste estudo

Material	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (graus)	Tensão admissível (kPa)
Concreto	$E_c = 20.000$	0,15			
Solo 1 (envolvendo fuste e base, acima do rodapé)	10	0,30	20	35	
Solo 2 (apoio do tubulão, envolvendo também o rodapé)	Variável ($20 \leq E_s \leq 200$)	0,30	10 a 50	35 a 45	600 a 2000

3 Análises e resultados

3.1 Verificação da aplicabilidade da solução aproximada baseada na Teoria da Elasticidade

Tabela 4. Resultados obtidos nas análises da base sujeita a tensão admissível uniforme (σ_s)

Estudo - software	Geometria	$\sigma_{t,max}/\sigma_s$
Langendonck (1944) – Aplicação aproximada da Teoria da Elasticidade Linear	Bloco alongado	1,53
Franco (2007) – SAP-2000 elástico linear	Tubulão circular	2,12
Este estudo (2019) – Plaxis 3D elástico linear	Tubulão circular	1,71

3.2 Verificação das tensões de tração ($\sigma_{t,max}$), com presença de solo, comportamento elástico linear

Tabela 5. Resultados das análises elásticas lineares do tubulão em solo

E_s (MPa)	E_s/E_c	$\sigma_{t,max}/\sigma_s$ Franco (2007) ⁽¹⁾	$\sigma_{t,max}/\sigma_s$ Este estudo sem solo 1	$\sigma_{t,max}/\sigma_s$ Este estudo com solo 1
20	0,001	2,75	2,125	2,037
200	0,01	-	2,014	1,893
1000	0,05	-	1,633	1,558
2000	0,1	1,58	1,313	1,253
4000	0,2	0,99	0,918	0,872
6000	0,3	0,65	0,676	0,638
8000	0,4	0,45	0,510	0,477
10000	0,5	0,32	0,387	0,359
12000	0,6	0,22	0,293	0,268

⁽¹⁾ – Como indicado nas Figuras 1 e 2, não havia solo acima do rodapé do tubulão. O autor informa, porém, ter também verificado que “o embutimento, em toda sua altura, da base em solo com as características do solo suporte, não conduz a tensões de tração no concreto inferiores às obtidas com embutimento de apenas 20 cm”.

3.3 Verificação das tensões de tração ($\sigma_{t,max}$), com presença de solo, comportamento elástico-perfeitamente plástico, critério de plastificação de Mohr-Coulomb

Tabela 6. Parâmetros do solo 2 e resultados das análises elásticas lineares-perfeitamente plásticas, critério de plastificação de Mohr-Coulomb

E_s (MPa)	E_s/E_c	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (graus)	σ_s (kPa)	N_{SPT} indicativo (estimado)	$\sigma_{t,max}/\sigma_s$ Este estudo sem solo 1	$\sigma_{t,max}/\sigma_s$ Este estudo com solo 1
20	0,0010	10	35	600	18	1,93	1,47
50	0,0025	20	37	800	24	1,96	1,59
100	0,0050	35	40	1000	28	1,96	1,68
200	0,0100	50	45	2000	> 45	1,97	1,78

4 Discussão dos resultados

A Tabela 4 revela que a condição axissimétrica do tubulão é, de fato, um pouco mais crítica do que a solução de estado plano de deformação da Teoria da Elasticidade, proposta por Langendonck (1944). A diferença, no entanto, não é tão acentuada como sugere a análise de Franco (2007) no SAP-2000. As razões para essa discrepância não puderam ser plenamente esclarecidas.

Considerando que os resultados obtidos neste estudo foram verificados em análises complementares (tanto 3D quanto 2D axissimétricas), com a utilização de outros *softwares*, o valor de 1,71 apresentado na Tabela 4 parece confiável, pelo que seria necessário, para tubulões, um acréscimo de apenas cerca de 12% em relação à solução aproximada da Teoria da Elasticidade (1,53). Esse resultado não leva em conta, todavia, a distribuição não uniforme das tensões na superfície de apoio, pelo que também foram conduzidas análises que incluíam o solo e sua interação com o tubulão.

A Figura 5 permite examinar graficamente os resultados das análises elásticas-lineares (Tabela 5).

A relação $E_s/E_c \cong 0,3$ separa duas regiões: abaixo desse valor a relação $\sigma_{t,max}/\sigma_s$ assume valores inferiores àqueles encontrados por Franco (2007), acontecendo o contrário acima de 0,3, porém com diferenças bem menos significativas. Praticamente todas as diferenças observadas podem ser atribuídas ao afastamento insuficiente das fronteiras no estudo de Franco (2007).

Os resultados confirmam que, nessas análises elásticas lineares, a presença do Solo 1 envolvendo o fuste e a base tem influência relativamente modesta na relação $\sigma_{t,max}/\sigma_s$. Franco (2007) já observara a pequena influência do confinamento, ainda que restrito quase exclusivamente à base já que naquelas análises o fuste completo não havia sido modelado.

Admitindo-se uma resistência à tração do concreto da ordem de 2.000 kPa, os resultados indicam que uma tensão admissível de 2.000 kPa ($\sigma_{t,max}/\sigma_s=1$) só poderia ser adotada, sem armação da base, caso o solo de apoio tivesse, conservadoramente, $E_s \geq 3.500$ MPa ($E_s/E_c \geq 0,175$).

Nesse contexto, de análises elásticas lineares, é irrelevante o fato de todas as análises terem sido conduzidas para uma carga correspondente a uma tensão admissível de 2.000 kPa: prevalece o valor da relação entre a tensão de tração máxima na base ($\sigma_{t,max}$) e a tensão admissível (σ_s). A Figura 6, obtida a partir da Tabela 5, apresenta o limite superior para a tensão admissível, exclusivamente do ponto de vista de se evitar a armação da base do tubulão, para diversos valores de E_s . Trata-se apenas de um limite superior, devendo a tensão admissível ser adotada, como sempre, em função do conjunto de propriedades do solo de apoio.

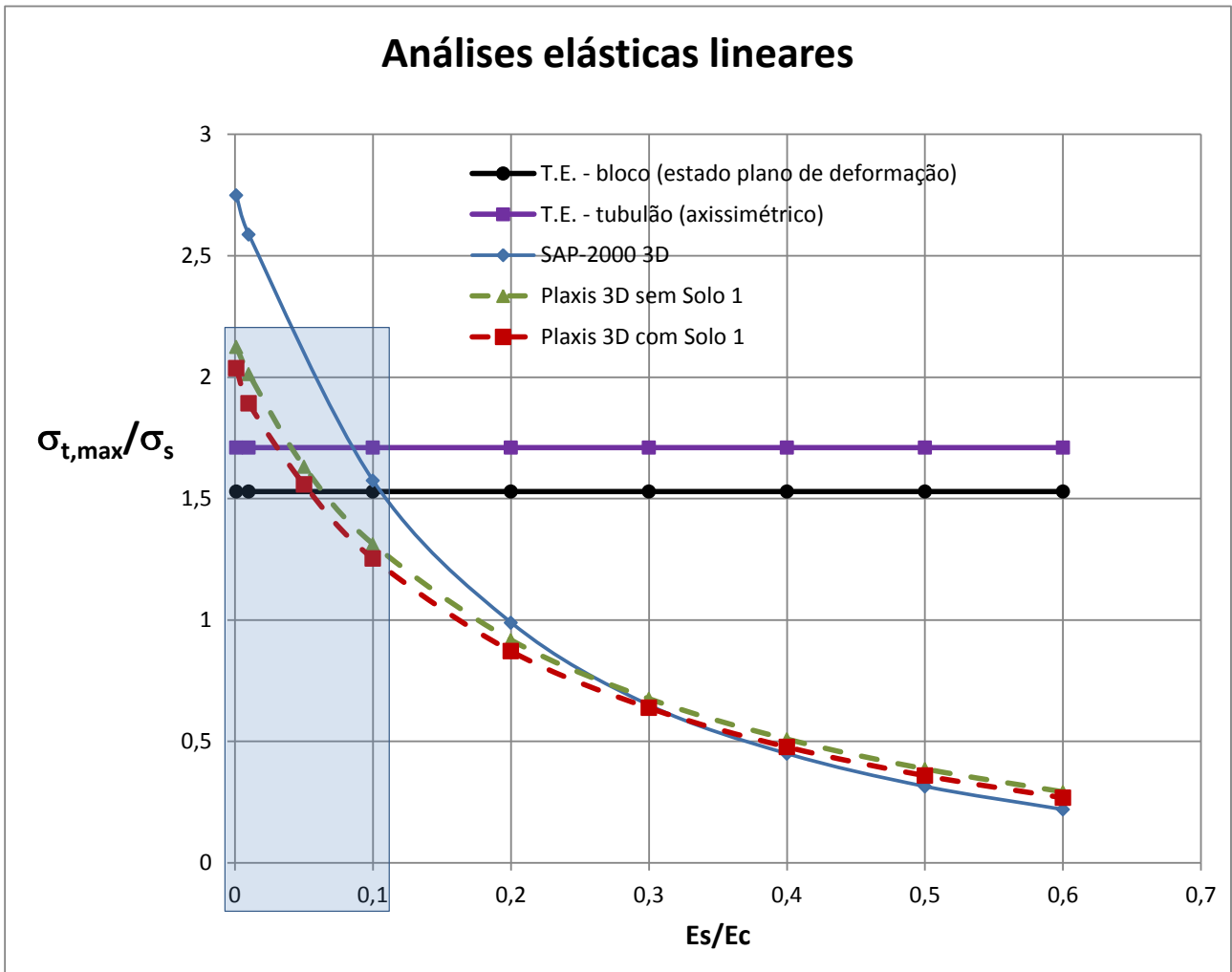


Figura 5 – Tensão máxima de tração na base, comportamento elástico linear

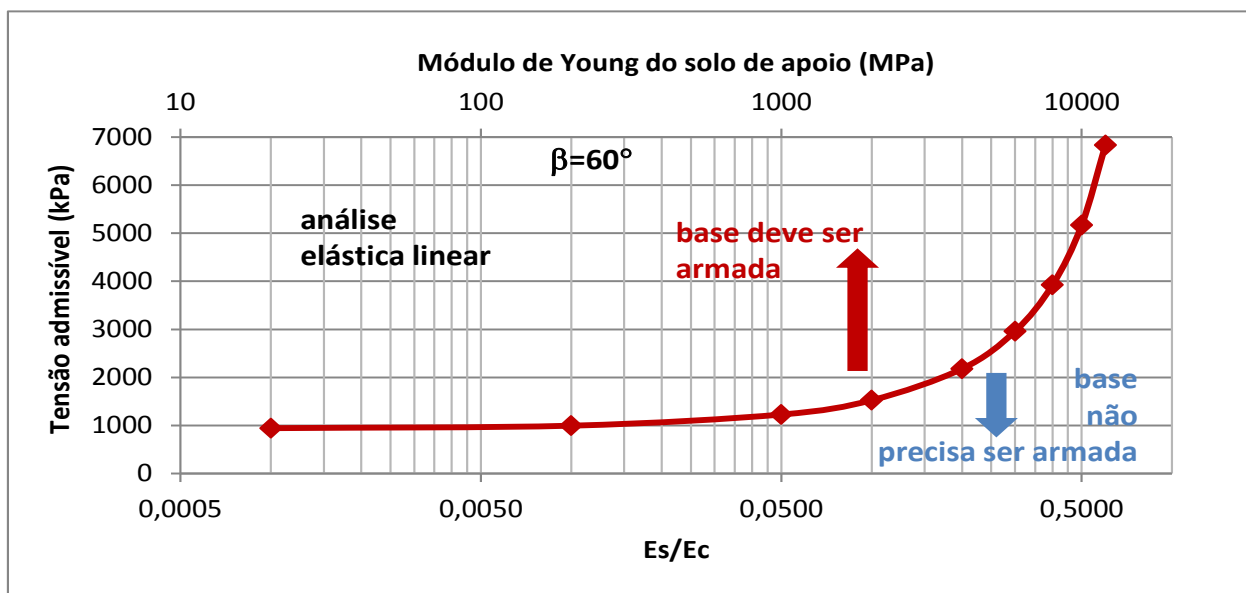


Figura 6. Limite superior da tensão admissível para base não armada

À relação $E_s/E_c \geq 0,1$ correspondem materiais com módulos de Young extremamente elevados ($E_s \geq 2.000$ MPa), bastante resistentes, mais próximos de rochas brandas (ou até de rochas) do que de solos, sendo provavelmente justificável a adoção de tensões admissíveis próximas do limite superior da Figura 6 e a hipótese de comportamento elástico linear.

Já na faixa de $E_s/E_c < 0,1$ (região sombreada da Figura 5), no entanto, situa-se a maioria dos solos propriamente ditos, mais deformáveis e comparativamente menos resistentes. Torna-se assim necessário proceder a análises com dados mais realistas para o Solo 2, pelo menos para $E_s/E_c \leq 0,01$ ($E_s \leq 200$ MPa). Regiões mais solicitadas desses solos menos rígidos, que tendem a ser também menos resistentes, podem sofrer plastificação, com provável alteração da distribuição de tensões normais na base, o que recomenda a utilização de modelos elasto-plásticos. Menores rigidez e resistência também conduzem a menores tensões admissíveis. A Tabela 6 reúne conjuntos de valores razoavelmente compatíveis dessas três propriedades do Solo 2, na faixa de $E_s/E_c \leq 0,01$.

A Figura 7 é a representação gráfica dos resultados das análises efetuadas com os dados da Tabela 6, em comparação com algumas das análises elásticas lineares da Figura 5 (estas últimas representadas pelas linhas tracejadas). As linhas azuis representam as tensões admissíveis admitidas em cada análise.

Uma primeira observação interessante é a proximidade entre as análises 3D elasto-plásticas (particularmente aquela que inclui o Solo 1) e a solução aproximada da Teoria da Elasticidade, devidamente corrigida para a condição axissimétrica dos tubulões (Tabela 4, última linha).

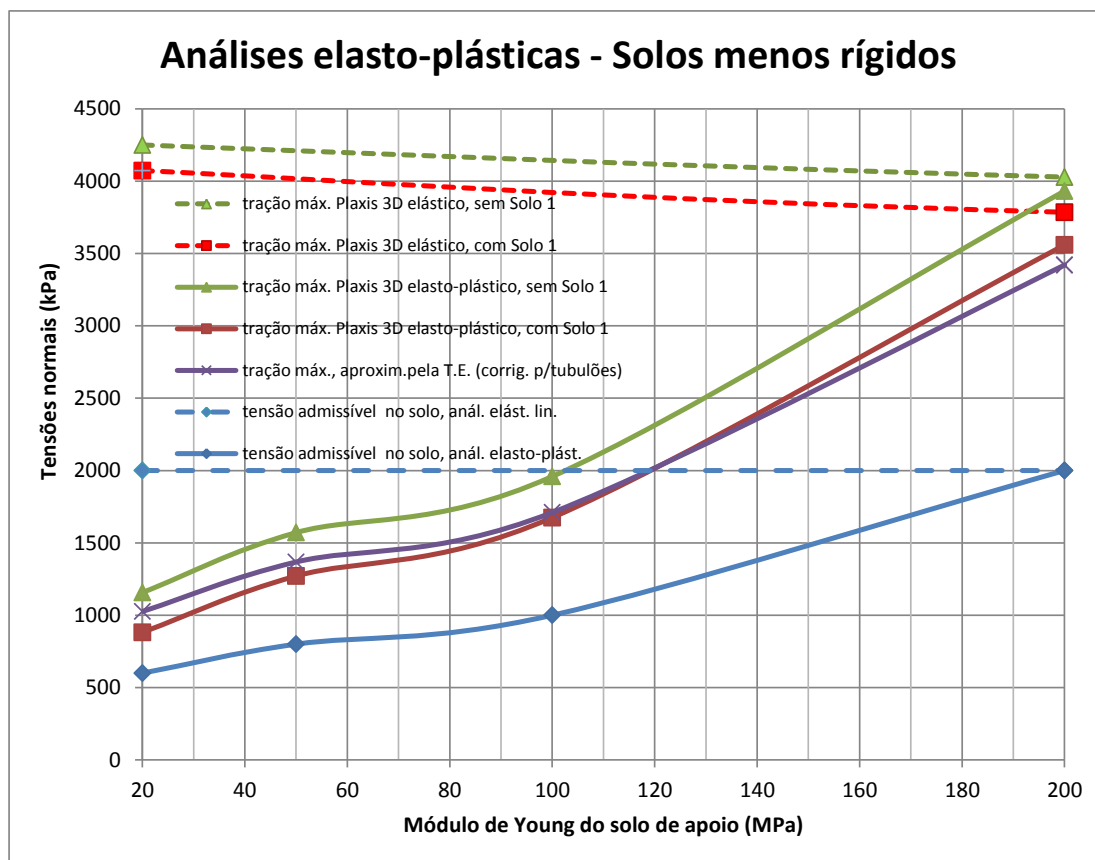


Figura 7 - Tensão máxima de tração na base, comportamento elástico-perfeitamente plástico, critério de plastificação de Mohr-Coulomb

A Figura 7 deixa claro que a adoção, para o solo de apoio (Solo 2), de tensões admissíveis compatíveis com os parâmetros de resistência e de deformabilidade, aliada à plastificação de regiões desse solo, leva a

tensões de tração inferiores à resistência à tração do concreto simples para o limite conservador $E_s \leq 100$ MPa. Para solos de apoio nos quais $100 \text{ MPa} < E_s \leq 200 \text{ MPa}$ a tensão admissível precisaria ser limitada para que a resistência à tração do concreto simples não fosse ultrapassada; alternativamente a base do tubulão precisaria ser armada para as tensões de tração da Figura 7.

5 Conclusões

Análises 3D permitem, atualmente (2019), representar comportamentos realistas de solos e sua interação com elementos de fundação.

De maneira geral, tensões admissíveis inferiores a cerca de 1.000 kPa não geram, na base de tubulões com $\beta=60^\circ$, tensões de tração superiores à resistência à tração do concreto (admitida como 2.000 kPa).

Do ponto de vista prático, em tubulões com $\beta=60^\circ$ a resistência à tração do concreto simples só poderá ser excedida se a rigidez do solo de apoio estiver no intervalo $100 \text{ MPa} \leq E_s \leq 3.500 \text{ MPa}$ ($0,005 \leq E_s/E_c \leq 0,175$). Abaixo de 100 MPa as tensões admissíveis, condicionadas pelas propriedades do solo de apoio, serão provavelmente inferiores a 1.000 kPa (Figura 7). Acima 3.500 MPa dificilmente os tubulões serão projetados para tensões admissíveis que se aproximem do limite superior representado pela curva da Figura 6, a qual exibe um crescimento muito acentuado nesse trecho.

Na faixa $100 \text{ MPa} < E_s \leq 200 \text{ MPa}$ ($0,005 < E_s/E_c \leq 0,01$) os resultados apresentados na Figura 7 podem servir de referência, porém não há razão, tendo em vista as facilidades computacionais atuais (2019), para não se conduzir uma análise elasto-plástica específica para o projeto, caso se pretenda utilizar uma tensão admissível superior a 1.000 kPa.

De maneira geral, a curva da Figura 6 pode servir como diretriz quanto ao limite superior das tensões admissíveis para projetos nos quais não se pretende armar as bases dos tubulões.

Verificou-se também que a solução de estado plano de deformação da Teoria da Elasticidade (Langendonck, 1944) precisaria ser adaptada para a condição axissimétrica dos tubulões: para $\beta=60^\circ$ a relação $\sigma_{t,max}/\sigma_s$ passaria a 1,71.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Consultrix pelo apoio ao estudo e aos colegas Luiz Eduardo Sózio, Eugenio Pabst Vieira da Cunha e Rafael Plácido pelas análises complementares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). NBR 6122. *Projeto e Execução de Fundações*. Rio de Janeiro.
- Franco, M. (2007) Efeito do confinamento pelo solo em tubulões de concreto simples. Correspondência pessoal ao co-autor Waldemar Hachich.
- Langendonck, T. (1944) *Cálculo de Concreto Armado*, Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), São Paulo, vol. 1, pp. 273-277
- PLAXIS 3D (2017) *Reference Manual*, Plaxis BV
- Vasconcelos, C.A. (2004) Torre Almirante, mensagem eletrônica e anexo enviados ao Eng. Eduardo Couso, da Consultrix.