

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA RESISTÊNCIA AO
ARRANCAMENTO VERTICAL DE ESTACAS DE SUÇÃO
ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

ELISA MARIA BENEVENUTO BARRETO TAVARES

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO - UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
ABRIL - 2018**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA RESISTÊNCIA AO
ARRANCAMENTO VERTICAL DE ESTACAS DE SUCÇÃO
ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

ELISA MARIA BENEVENUTO BARRETO TAVARES

“Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia da Universidade
Estadual do Norte Fluminense, como
parte das exigências para a obtenção de
título de Mestre em Engenharia Civil”.

Orientador: Prof. Aldo Durand Farfán
Campos dos Goytacazes - RJ
Abril – 2018

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO VERTICAL DE ESTACAS DE SUCÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

ELISA MARIA BENEVENUTO BARRETO TAVARES

“Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia da Universidade
Estadual do Norte Fluminense, como
parte das exigências para a obtenção de
título de Mestre em Engenharia Civil”.

Aprovada em 13 de abril de 2018.

Comissão Examinadora:

Prof. Fernando Saboya Albuquerque Júnior, D. Sc., UENF

Prof. José Tavares Araruna Júnior, PhD., PUC-Rio

Prof. Sérgio Tibana, D. Sc., UENF

Prof. Aldo Durand Farfán, D. Sc., UENF
Orientador

AGRADECIMENTOS

Consagro a Deus a realização desta pesquisa com êxito.

Agradeço a Nossa Senhora Aparecida pelas inúmeras intercessões durante este percurso.

Ao meu orientador, Aldo, pela paciência, disponibilidade, empenho e conhecimentos transmitidos ao longo do curso de mestrado.

Aos meus pais, Edmar e Maria das Graças, palavras não são suficientes para agradecer o apoio e o incentivo que me ofereceram durante a minha pesquisa. Vocês são parte integrante do meu crescimento pessoal e profissional.

Ao meu marido, Cássio, por ser tão compreensivo, por não me deixar desanimar nos momentos difíceis, por ler e ouvir pacientemente repetidas vezes as mesmas coisas e por ser tão companheiro ao me ajudar no que foi preciso para a obtenção desse título.

À minha tia Edda, sempre me animando com atenção, carinho e fé!

À minha irmã e aos meus amigos, que abriram mão da minha companhia em momentos importantes de suas vidas, que torceram por mim e me encheram de palavras motivadoras quando eu estive desanimada.

Ao meu amigo Daniel Moura, sem você nada disso teria se tornado realidade. Obrigada por me incentivar tanto a começar o mestrado.

A todos os colegas do Laboratório de Engenharia Civil (LECIV). Muitas vezes tomar um café e bater um papo despretenso e rápido na copa tornou tudo mais leve.

“Toda vitória se fundamenta na perseverança, pois sem espírito de sacrifício ninguém concretiza os seus ideais.”

(Chico Xavier)

RESUMO

A instalação de estruturas *offshore* em grandes profundidades demanda avanços tecnológicos na Engenharia, principalmente no que diz respeito aos sistemas de ancoragem de plataformas. Sendo assim, as fundações dessas estruturas têm sido estudadas de forma intensiva para fornecer diretrizes de projeto a plataformas flutuantes. O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de modelos numéricos de estacas de sucção cravadas em solo argiloso por meio da metodologia de retroanálise numérica, para estudar o comportamento tensão-deformação da interação solo-estaca. A capacidade de carga ao arrancamento vertical de estacas de sucção foi avaliada em relação a geometrias rugosas atribuídas ao fuste. No intuito de verificar a influência da rugosidade nesses modelos, foram atribuídos quatro perfis de rugosidade distintos em estacas de mesma dimensão, instaladas em um mesmo tipo de solo argiloso, cravadas a uma mesma profundidade. As análises foram baseadas em simulações numéricas tridimensionais e axissimétricas, executadas no *software* computacional Abaqus, que utiliza o Método dos Elementos Finitos para a obtenção dos resultados. A fim de se certificar da confiabilidade desses resultados, foi feita uma validação, por meio de resultados de estudos anteriores, com estacas de sucção ensaiadas a partir de modelos centrifugados em escala reduzida, que mostrou boa concordância entre eles. Os resultados das simulações numéricas mostraram que a ranhura aplicada nas paredes externas das estacas de sucção tem papel importante na resistência ao arrancamento das mesmas e pode ser uma alternativa para o aumento do desempenho deste tipo de fundação em sistemas de ancoragem vertical.

PALAVRAS-CHAVE: estacas de sucção; retroanálise numérica; Método dos Elementos Finitos; capacidade de carga ao arrancamento vertical.

ABSTRACT

The installation of offshore structures at great depths demands technological advances in Engineering, especially with regard to platform anchoring systems. Thus, the foundations of these structures have been studied intensively to provide design guidelines to floating platforms. The objective of this work was the development of numerical models of suction caissons embedded in clay soil by of the numerical back-analysis methodology, to study the tension-deformation behavior of the soil-piles interaction. The vertical holding load capacity of suction caisson was evaluated in relation to rough geometries attributed to the shaft. In order to verify the influence of roughness in these models, four different roughness profiles were assigned to caissons of the same size installed in the same type of clay soil. The analysis were based on three-dimensional and axissimetric numerical simulations, executed in Abaqus software, which uses the Finite Element Method to obtain the results. In order to ascertain the reliability of these results, a validation was made by results from previous studies of suction caissons tested with reduced scale in geotechnical centrifuge, which showed good agreement among them. The results of the back-analysis showed that the roughness applied to the external surfaces of the suction caissons plays an important role in the pullout resistance of the piles and can be an alternative to increase the performance of this type of foundation in vertical anchorage systems.

KEYWORDS: suction caissons; numerical back-analysis; Finite Element Method; vertical holding load capacity.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	viii
1. Introdução.....	1
1.1. Contexto e motivação.....	1
1.2. Objetivos e justificativas	2
1.3. Organização da dissertação.....	4
2. Revisão bibliográfica.....	5
2.1. Ancoragem de plataformas flutuantes.....	5
2.2. Estacas de sucção	8
2.2.1. Breve histórico das estacas de sucção	8
2.2.2. Definição de estacas de sucção	8
2.2.3. Instalação de estacas de sucção	9
2.2.4. Penetração de estacas de sucção	11
2.2.5. Carregamento em estacas de sucção	13
2.2.6. Capacidade de carga axial à tração de estacas de sucção	14
2.3. Método dos Elementos Finitos	17
2.3.1. Definição do Método dos Elementos Finitos	17
2.3.2. Aplicações do Método dos Elementos Finitos.....	18
2.4. Programa computacional Abaqus	19
3. Definição dos modelos.....	21
3.1. Aspectos gerais.....	21
3.2. Modelo das estacas de sucção	22
3.3. Modelo de solo argiloso	28
4. Simulações numéricas.....	33
4.1. Aspectos gerais.....	33
4.2. Construção dos modelos numéricos	33
4.2.1. Etapa inicial.....	34
4.2.1.1. Modelos tridimensionais	35
4.2.1.2. Modelos axissimétricos.....	40
4.2.2. Etapa contato.....	43
4.2.3. Etapa carregamento	46

4.2.4. Etapa arrancamento	49
5. Análise de resultados.....	51
5.1. Modelos tridimensionais.....	51
5.1.1. Simulações numéricas com deslocamento controlado	51
5.1.1.1. Estaca de sucção lisa	52
5.1.1.2. Estaca de sucção menos rugosa.....	56
5.1.1.3. Estaca de sucção rugosa	57
5.1.1.4. Estaca de sucção mais rugosa	58
5.1.1.5. Análise de resultados da resistência ao arrancamento vertical	58
5.1.2. Simulações numéricas com tensão controlada.....	63
5.1.2.1. Estaca de sucção lisa	63
5.1.2.2. Estaca de sucção menos rugosa.....	64
5.1.2.3. Estaca de sucção rugosa	64
5.1.2.4. Estaca de sucção mais rugosa.....	65
5.2. Modelos axissimétricos	66
5.2.1. Deslocamentos	68
5.2.2. Tensões cisalhantes	68
5.2.3. Tensões normais	73
5.2.4. Deformações plásticas.....	73
5.2.5. Análise do comportamento do solo.....	78
6. Conclusões e indicações para trabalhos futuros	83
6.1. Conclusões	83
6.2. Indicações para trabalhos futuros	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
ANEXO A – DISTRIBUIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS VERTICAIS ATUANTES NO SOLO	89
ANEXO B – DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES CISALHANTES ATUANTES NO SOLO	100
ANEXO C – DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES NORMAIS ATUANTES NO SOLO	111
ANEXO D – DISTRIBUIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS ATUANTES NO SOLO	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Recordes mundiais de maiores profundidades em lâmina d'água atingidas na produção de petróleo (Jornal GGN, 2016)	1
Figura 2: Estaca de sucção (First Subsea, 2016).....	2
Figura 3: Ancoragem convencional (SciELO Brazil, 2016)	6
Figura 4: Ancoragem <i>taut-leg</i> executada com fundação composta por estaca de sucção (SciELO Brazil, 2016)	6
Figura 5: Ancoragem vertical em plataforma do tipo TLWP (Corrêa, 2003)	7
Figura 6: Etapas de instalação de estacas de sucção	9
Figura 7: Esquema de forças durante a instalação de uma estaca de sucção	10
Figura 8: Componentes de forças durante o arrancamento de uma estaca de sucção com tampa fechada.....	15
Figura 9: Definição do modelo numérico	22
Figura 10: Modelo da estaca de sucção L.....	23
Figura 11: Dimensões em centímetros da estaca de sucção L.....	23
Figura 12: Modelo da estaca de sucção R1 (cinco ranhuras)	24
Figura 13: Dimensões em centímetros da estaca de sucção R1	24
Figura 14: Modelo da estaca de sucção R2 (oito ranhuras).....	25
Figura 15: Dimensões em centímetros da estaca de sucção R2	25
Figura 16: Modelo da estaca de sucção R3 (dezessete ranhuras)	26
Figura 17: Dimensões em centímetros da estaca de sucção R3	26
Figura 18: Condições de contorno para o modelo tridimensional da estaca de sucção lisa.....	29
Figura 19: Divisão do maciço de solo em três porções distintas	31
Figura 20: Perfil de resistência ao cisalhamento não drenado do solo	31
Figura 21: Montagem das partições do modelo da estaca de sucção lisa, com maciço de solo dividido em três porções	35
Figura 22: Elemento finito hexaédrico linear com oito nós (Ribeiro, 2010 <i>apud</i> Sosa, 2015)	36
Figura 23: Elemento finito hexaédrico quadrático com vinte nós (Ribeiro, 2010 <i>apud</i> Sosa, 2015)	36
Figura 24: Malha de elementos finitos dos modelos tridimensionais das estacas de sucção lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	36

Figura 25: Malha de elementos finitos dos modelos tridimensionais dos maciços de solo referentes às estacas de sucção lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	37
Figura 26: Detalhe da malha de elementos finitos dos modelos tridimensionais dos maciços de solo referentes às estacas de sucção lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	38
Figura 27: Detalhe da malha de elementos finitos dos maciços de solo, enfatizando as ranhuras aplicadas para os modelos tridimensionais com estacas menos rugosa (A), rugosa (B) e mais rugosa (C)	38
Figura 28: Detalhe da malha de elementos finitos das estacas, enfatizando as ranhuras aplicadas, para os modelos tridimensionais, às estacas menos rugosa (A), rugosa (B) e mais rugosa (C)	39
Figura 29: Malha de elementos finitos dos modelos axissimétricos das estacas de sucção lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	40
Figura 30: Malha de elementos finitos dos modelos axissimétricos dos maciços de solo referentes às estacas de sucção lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	41
Figura 31: Detalhe da malha de elementos finitos dos modelos axissimétricos dos maciços de solo referentes às estacas de sucção lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	42
Figura 32: Detalhe da malha de elementos finitos das estacas, enfatizando as ranhuras aplicadas para os modelos axissimétricos com estacas lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	42
Figura 33: Contato tipo superfície-superfície referente ao maciço de solo, representando a superfície mestre na simulação do modelo tridimensional com estaca de sucção lisa.....	45
Figura 34: Contato tipo superfície-superfície referente à estaca, representando a superfície escrava na simulação do modelo tridimensional com estaca de sucção lisa	45
Figura 35: Trajetória do estado de tensões iniciais do solo em relação à profundidade do modelo tridimensional para a estaca de sucção lisa	47
Figura 36: Gráfico Tensão (KPa) x Profundidade do solo (m).....	47
Figura 37: Representação gráfica das tensões efetivas atuantes no maciço de solo	48
Figura 38: Superfície de aplicação de sucção para o modelo 3D da estaca lisa.....	49
Figura 39: Força de arrancamento em seu ponto de aplicação, para os modelos tridimensionais, com estaca de sucção saindo do leito marinho	50
Figura 40: Superfície de arrancamento para o modelo axissimétrico.....	50
Figura 41: Gráfico força de arrancamento por deslocamento de estacas de sucção lisas, sem aplicação de sucção, com variação de alturas de cravação no maciço de solo.....	52

Figura 42: Gráfico força de arrancamento por deslocamento de estacas de sucção lisas sem aplicação de sucção e deslocamento controlado	54
Figura 43: Gráfico força de arrancamento por deslocamento de estacas lisas com aplicação de sucção e deslocamento controlado	56
Figura 44: Gráfico força de arrancamento por deslocamento de estacas menos rugosas com aplicação de sucção e deslocamento controlado.....	57
Figura 45: Gráfico força de arrancamento por deslocamento de estacas rugosas com aplicação de sucção e deslocamento controlado	57
Figura 46: Gráfico força de arrancamento por deslocamento de estacas mais rugosas com aplicação de sucção e deslocamento controlado	58
Figura 47: Gráfico força de arrancamento por deslocamento dos modelos numéricos tridimensionais com aplicação de sucção e deslocamento controlado	59
Figura 48: Gráfico força de arrancamento máxima por deslocamento dos modelos numéricos tridimensionais com aplicação de sucção e deslocamento controlado	60
Figura 49: Gráfico do comportamento do parâmetro adimensional para as estacas menos rugosas dos modelos numérico e experimental	61
Figura 50: Gráfico do comportamento do parâmetro adimensional para as estacas rugosas dos modelos numérico e experimental	61
Figura 51: Gráfico do comportamento do parâmetro adimensional para as estacas mais rugosas dos modelos numérico e experimental.....	62
Figura 52: Gráfico força de arrancamento por deslocamento da estaca de sucção lisa com aplicação de sucção e tensão controlada.....	63
Figura 53: Gráfico força de arrancamento por deslocamento de estacas de sucção menos rugosa com aplicação de sucção e tensão controlada	64
Figura 54: Gráfico força de arrancamento por deslocamento da estaca de sucção rugosa com aplicação de sucção e tensão controlada.....	65
Figura 55: Gráfico força de arrancamento por deslocamento de estacas de sucção mais rugosas com aplicação de sucção e tensão controlada	65
Figura 56: Trajetórias definidas para análise de comportamento do maciço de solo	67
Figura 57: Gráfico de deslocamento por distância das trajetórias verticais para as estacas com geometria de fuste lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	69
Figura 58: Gráfico de razão de afastamento por deslocamento das trajetórias horizontais para as estacas com geometria de fuste lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	70
Figura 59: Gráfico de tensão cisalhante por distância das trajetórias verticais para as estacas com geometria de fuste lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	71
Figura 60: Gráfico de razão de afastamento por tensão cisalhante das trajetórias horizontais para as estacas com geometria de fuste lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	72

Figura 61: Gráfico de tensão normal por distância das trajetórias verticais para as estacas com geometria de fuste lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	74
Figura 62: Gráfico de razão de afastamento por tensão normal das trajetórias horizontais para as estacas com geometria de fuste lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	75
Figura 63: Gráfico de deformação plástica por distância da trajetória vertical para as estacas com geometria de fuste lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	76
Figura 64: Gráfico de razão de afastamento por deformação plástica da trajetória horizontal para as estacas com geometria de fuste lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	77
Figura 65: Gráfico da força de arrancamento vertical em função do ângulo de atrito	80
Figura 66: Curva de desempenho da interface solo-fuste	81
Figura 67: Gráfico de deslocamento por distância da Trajetória 1 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	89
Figura 68: Gráfico de deslocamento por distância da Trajetória 2 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	90
Figura 69: Gráfico de deslocamento por distância da Trajetória 3 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	91
Figura 70: Gráfico de deslocamento por distância da Trajetória 4 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	92
Figura 71: Gráfico de deslocamento por distância da Trajetória 5 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	93
Figura 72: Gráfico de deslocamento por distância da Trajetória 6 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	94
Figura 73: Gráfico de deslocamento por distância da Trajetória 7 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	95
Figura 74: Gráfico de deslocamento por distância da Trajetória 8 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	96
Figura 75: Gráfico de deslocamento por distância da Trajetória 9 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	97
Figura 76: Gráfico de deslocamento por distância da Trajetória 10 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	98
Figura 77: Gráfico de deslocamento por distância da Trajetória 11 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	99
Figura 78: Gráfico de tensão cisalhante por distância da Trajetória 1 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	100
Figura 79: Gráfico de tensão cisalhante por distância da Trajetória 2 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)	101

Figura 80: Gráfico de tensão cisalhante por distância da Trajetória 3 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D).....	102
Figura 81: Gráfico de tensão cisalhante por distância da Trajetória 4 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D).....	103
Figura 82: Gráfico de tensão cisalhante por distância da Trajetória 5 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D).....	104
Figura 83: Gráfico de tensão cisalhante por distância da Trajetória 6 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D).....	105
Figura 84: Gráfico de tensão cisalhante por distância da Trajetória 7 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D).....	106
Figura 85: Gráfico de tensão cisalhante por distância da Trajetória 8 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D).....	107
Figura 86: Gráfico de tensão cisalhante por distância da Trajetória 9 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D).....	108
Figura 87: Gráfico de tensão cisalhante por distância da Trajetória 10 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D).....	109
Figura 88: Gráfico de tensão cisalhante por distância da Trajetória 11 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D).....	110
Figura 89: Gráfico de tensões normais por distância da Trajetória 1 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D).....	111
Figura 90: Gráfico de tensões normais por distância da Trajetória 2 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D).....	112
Figura 91: Gráfico de tensões normais por distância da Trajetória 3 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D).....	113
Figura 92: Gráfico de tensões normais por distância da Trajetória 4 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D).....	114
Figura 93: Gráfico de tensões normais por distância da Trajetória 5 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D).....	115
Figura 94: Gráfico de tensões normais por distância da Trajetória 6 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D).....	116
Figura 95: Gráfico de tensões normais por distância da Trajetória 7 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D).....	117
Figura 96: Gráfico de tensões normais por distância da Trajetória 8 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D).....	118
Figura 97: Gráfico de tensões normais por distância da Trajetória 9 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D).....	119
Figura 98: Gráfico de tensões normais por distância da Trajetória 10 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D).....	120
Figura 99: Gráfico de tensões normais por distância da Trajetória 11 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D).....	121

Figura 100: Gráfico de deformações plásticas por distância da Trajetória 3 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D).122

Figura 101: Gráfico de deformações plásticas por distância da Trajetória 8 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D).123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Definição das variáveis do modelo numérico	22
Tabela 2: Ângulos de atrito e coeficientes de atrito para os modelos de estaca de sucção	27
Tabela 3: Ângulos de atrito e deslocamentos referentes ao ensaio de cisalhamento direto realizado a 1g por Melo (2015).....	27
Tabela 4: Dimensões dos modelos de estaca de sucção utilizados.....	28
Tabela 5: Propriedades da estaca de sucção	28
Tabela 6: Dimensões dos modelos de solo.....	32
Tabela 7: Propriedades geotécnicas dos modelos de solo	32
Tabela 8: Quantidade de elementos finitos para os modelos numéricos tridimensionais	39
Tabela 9: Quantidade de elementos finitos para os modelos numéricos axissimétricos	43
Tabela 10: Comportamento da força de arrancamento das estacas de sucção lisas de acordo com seu percentual de cravação.....	53
Tabela 11: Forças de arrancamento máximas encontradas para os protótipos de Melo (2015).....	54
Tabela 12: Diferença de forças de arrancamento máximas encontradas para os modelos experimentais de Melo (2015) e para os modelos numéricos.....	55
Tabela 13: Comparativo de forças de arrancamento máximas para estacas de sucção entre os ensaios experimentais (Melo, 2015) e as simulações numéricas tridimensionais	59
Tabela 14: Percentual de aumento de resistência ao arrancamento vertical para os modelos numéricos tridimensionais estudados	62
Tabela 15: Resumo dos resultados para as simulações numéricas realizadas	66
Tabela 16: Resumo dos resultados da força de arrancamento para os modelos calibrados a partir da estaca de sucção L para $\gamma_{sub, bucha} = 12\text{KN/m}^2$	78
Tabela 17: Percentuais de variação de força de arrancamento ($\gamma_{sub, bucha} = 12\text{KN/m}^2$)	79
Tabela 18: Resumo dos resultados da força de arrancamento para os modelos calibrados a partir da estaca de sucção R3 para $\gamma_{sub, bucha} = 10\text{KN/m}^2$	79
Tabela 19: Percentuais de variação de força de arrancamento ($\gamma_{sub, bucha} = 10\text{KN/m}^2$)	80

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

3D	três dimensões
A_e	área externa da estaca em contato com o solo
A_i	área interna da estaca em contato com o solo
$A_{lateral}$	área lateral da estaca
API	<i>American Petroleum Institute</i>
A_{parede}	área da lateral externa da estaca
A_{plugue}	área da seção transversal da bucha de solo
A_{ponta}	área da ponta da estaca
A_{si}	área interna da tampa da estaca
A_{ua}	pressão máxima admissível
D	diâmetro externo da estaca de sucção
E	módulo de Young
E	módulo de deformabilidade
f	atrito unitário
F_A	força de arrancamento das estacas de sucção
$F_{A,máx\ lisa}$	força de arrancamento máxima da estaca lisa
$F_{A,rugosidade}$	força de arrancamento da estaca com rugosidade aplicada
F_w	pressão da água acima da estaca
HM	profundidade do modelo
HR	profundidade da rugosidade da estaca de sucção
L/D	relação de aspecto
l	comprimento enterrado da estaca

L	comprimento da estaca de sucção
LECIV	Laboratório de Engenharia Civil
MEF	Método dos Elementos Finitos
N_c	fator de capacidade de carga
q	resistência de ponta unitária
Q	resistência ao arrancamento vertical
$Q_{lateral}$	resistência lateral da estaca
Q_{ponta}	resistência de ponta da estaca
R	resistência total do solo
S_u	resistência ao cisalhamento não drenado
$S_{u, altura\ média}$	resistência ao cisalhamento não drenado na altura média da estaca
$S_{u, base}$	resistência ao cisalhamento não drenado da ponta da estaca
t	espessura da estaca de sucção
t_R	espessura da rugosidade da estaca de sucção
TLWP	<i>Tension Leg Wellhead Platform</i>
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
VLA	<i>Vertical Load Anchor</i>
W_{est}	peso da estaca submersa
W_{estaca}	peso da estaca
W_M	largura do modelo
W_{plugue}	peso da bucha de solo
α	fator de atrito
α_e	fator de atrito externo
α_i	fator de atrito interno

γ	peso específico
γ'	peso específico efetivo do solo
γ_{am}	peso específico da água do mar
γ_{sat}	peso específico saturado do solo
γ_{sub}	peso específico submerso do solo
δ	deslocamento da estaca de sucção em relação ao eixo y
ΔF_1	variação da força de sucção entre a estaca lisa ensaiada com a estaca menos rugosa (centrífuga) e o modelo numérico
ΔF_2	variação da força de sucção entre a estaca lisa ensaiada com a estaca mais rugosa (centrífuga) e o modelo numérico
ΔF_s	média da diferença entre os valores da força de arrancamento dos modelos experimentais e dos modelos numéricos
Δp	pressão necessária para a instalação da estaca de sucção
ρ	parâmetro adimensional
μ	coeficiente de atrito
ν	coeficiente de Poisson
σ_s	pressão de sucção
σ_{total}	tensão total
φ	ângulo de atrito

1. Introdução

1.1. Contexto e motivação

A descoberta dos primeiros campos de petróleo no Brasil ocorreu, segundo Moraes (2013), em águas rasas, o que levou ao desenvolvimento de plataformas fixas que operavam em locais próximos ao litoral.

A crescente demanda de energia alterou as necessidades da indústria petrolífera e acarretou na busca por campos de petróleo em locais mais distantes da costa e em lâminas d'água cada vez mais elevadas. Isso causou impacto nas estruturas empregadas na extração *offshore*, em que a utilização de plataformas fixas tornou-se inviável. Essas estruturas evoluíram para um novo conceito de plataformas flutuantes, que necessitam de sistemas de ancoragem mais robustos, diante de deslocamentos e de cargas ambientais mais intensos em águas profundas e ultraprofundas.

A Figura 1 retrata a evolução das lâminas d'água, cada vez mais elevadas, e a evolução das plataformas utilizadas para exploração de petróleo.

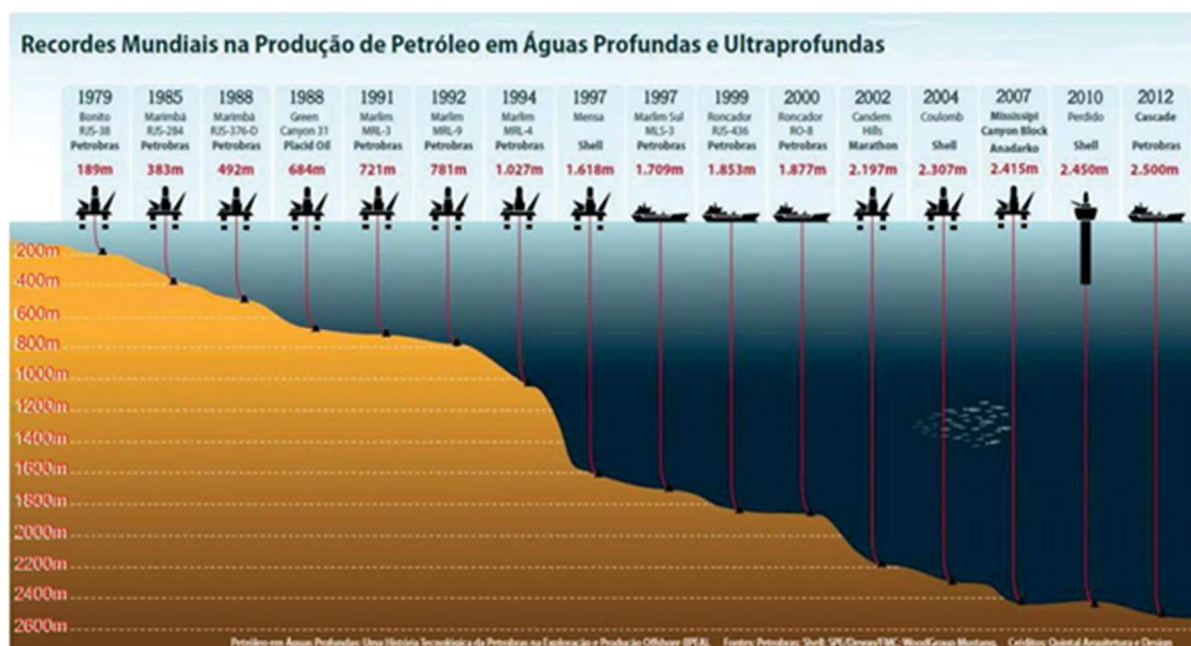


Figura 1: Recordes mundiais de maiores profundidades em lâmina d'água atingidas na produção de petróleo (Jornal GGN, 2016)

São classificadas como rasas as águas de profundidade entre 0m e 300m, como profundas, entre 300m e 1500m, e, como ultraprofundas, acima de 1500m (Petrobrás, 2012 *apud* Diário do Nordeste, 2018). Conforme pode ser observado na Figura 1, as explorações da indústria petrolífera em águas ultraprofundas tiveram início em 1997, atingindo a profundidade de 1618m.

Operar em águas profundas e ultraprofundas hoje é um desafio para a indústria petrolífera. Devido a isso, a Engenharia busca constantemente inovações tecnológicas a fim de otimizar e/ou expandir essas atividades. Sendo assim, faz-se necessário o desenvolvimento de fundações que sejam capazes de suportar os esforços à tração que crescem em profundidades maiores.

Para a fixação das estruturas flutuantes no leito marinho, foram desenvolvidos diversos tipos de fundação, como a estaca de sucção (Figura 2), escolhida para este estudo. Esse tipo de estaca também está sendo utilizada para a fixação de turbinas eólicas *offshore* em vários países (Ahn *et al.*, 2014).



Figura 2: Estaca de sucção (First Subsea, 2016)

1.2. Objetivos e justificativas

O objetivo principal deste trabalho foi estudar o comportamento tensão-deformação da interação solo-estaca, a fim de contribuir com novos projetos que utilizem esse tipo de fundação para ancoragem de plataformas flutuantes. Para isso, foram desenvolvidos, através da metodologia de retroanálise numérica, modelos numéricos calibrados com resultados de estudos experimentais. A capacidade de carga ao arrancamento vertical

da estaca de sucção, com preenchimento interno proveniente de sua penetração em leito marinho, foi avaliada em relação a geometrias rugosas atribuídas ao fuste.

Neste estudo, foi utilizado o Método dos Elementos Finitos (MEF) simulando modelos axissimétricos e tridimensionais, em que os resultados das simulações numéricas foram obtidos através do programa computacional Abaqus. Esses resultados foram validados com resultados experimentais de modelos reduzidos ensaiados em centrífuga geotécnica no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), onde Melo (2015) realizou ensaios de estacas de sucção cravadas em solos argilosos, atribuindo geometria rugosa às paredes externas da estaca, o que aumentou a sua capacidade de carga ao arrancamento vertical. Os resultados das simulações numéricas possibilitaram a avaliação da distribuição do campo de deslocamentos, de tensões e de deformações no maciço de solo, assim como a análise do desempenho da força de arrancamento devido ao número de ranhuras presentes na interface solo-fuste.

O sucesso obtido com o uso desse tipo de estaca gerou o aumento de sua demanda, porém seus projetos de fundação possuem incertezas significativas. Devido a isso, estudos com formulações analíticas, modelos físicos reduzidos centrifugados e modelos numéricos continuam auxiliando novos projetos de estacas de sucção para análise de capacidade de carga, evitando o uso de protótipos, que geram custos e riscos mais altos (Clukey *et al.*, 1993).

Um dos motivos para a escolha deste estudo, conforme o trabalho de Chen (2013), é a simplicidade do procedimento de instalação das estacas de sucção, que minimiza o uso de equipamentos pesados necessários para a instalação de estacas comuns ou outros tipos de fundação, gerando baixos custos. Além disso, esse tipo de fundação tem a possibilidade de reaproveitamento, pois pode ser desinstalada e reinstalada em outro local.

Outro motivo é a eficiência desse tipo de estaca, que, segundo Tjelta (2001), é capaz de resistir à combinação de cargas verticais e horizontais.

Este é um trabalho pertinente, devido ao comportamento de fundações submetidas à tração ainda ser pouco conhecido, que incentiva novos estudos nesta área.

1.3. Organização da dissertação

Esta dissertação de mestrado é composta por seis capítulos descritos a seguir.

A introdução, elaborada no primeiro capítulo, contextualiza e identifica os objetivos e as justificativas para a importância do desenvolvimento deste estudo.

No segundo capítulo, foi feita uma revisão bibliográfica abrangendo ancoragem de plataformas flutuantes, estacas de sucção, Método dos Elementos Finitos e o programa computacional Abaqus.

A definição dos modelos numéricos analisados, apresentando os parâmetros geométricos e os parâmetros dos materiais adotados para as estacas e para o solo argiloso utilizados, foi abordada no terceiro capítulo.

No quarto capítulo, encontram-se as descrições das simulações numéricas desenvolvidas com os quatro modelos avaliados.

Os resultados das simulações numéricas, obtidos a partir do Abaqus, são relatados no quinto capítulo, juntamente com a descrição de cada caso analisado.

Finalmente, no sexto capítulo, são apresentadas as conclusões e algumas indicações para trabalhos futuros a serem desenvolvidos.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Ancoragem de plataformas flutuantes

Para manter a estabilidade de plataformas flutuantes e para garantir a integridade de todos os equipamentos que nelas operam, são essenciais os sistemas de ancoragem. Gonçalves *et al.* (2002) definem sistema de ancoragem como um conjunto de elementos capazes de manter uma unidade flutuante em uma posição de equilíbrio sem auxílio de propulsão. Normalmente, um sistema de ancoragem é composto por um conjunto de linhas, sendo cada linha composta de um ponto fixo no solo marinho e de elementos que conectam este ponto à unidade. Estes elementos de ligação podem ser compostos de amarras, cabos de aço e/ou cabos de poliéster.

Os sistemas de ancoragem podem ser do tipo convencional, *taut-leg* e vertical. O sistema de ancoragem convencional (Figura 3) é constituído por linhas de ancoragem em catenária, apresentando um trecho considerável apoiado no solo, onde o efeito do atrito linha-solo dissipa parte dos esforços transmitidos pela plataforma flutuante. Neste tipo de sistema de ancoragem, são utilizadas âncoras convencionais, que são eficientes contra os esforços horizontais transmitidos à fundação.

Conforme relatado por Kunitaki (2006), em um sistema convencional, o valor do raio de ancoragem é cerca de três vezes a profundidade da lâmina d'água, o que pode tornar a sua utilização em águas profundas inviável devido ao aumento do peso das linhas de ancoragem.

Além disso, problemas de instalação podem surgir em locais com plataformas próximas entre si, que geram congestionamentos de linhas de ancoragem e interferências de linhas com equipamentos submarinos.

Composta por linhas de ancoragem retesadas, que fazem um ângulo de topo em torno de 45° com a vertical, a ancoragem *taut-leg* atua com eficiência em águas profundas. Isso porque ela proporciona redução nos custos, pois requer comprimentos menores das linhas, bem como nos problemas de instalação, devido ao raio de ancoragem ser aproximadamente igual a profundidade da lâmina d'água. Ademais, a ancoragem *taut-leg* proporciona aumento na rigidez do sistema, reduzindo os *offsets* da unidade flutuante.

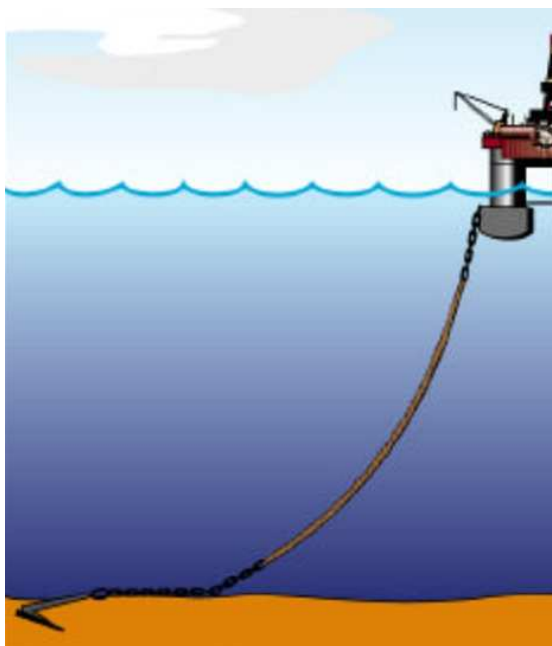


Figura 3: Ancoragem convencional (SciELO Brazil, 2016)

Esse tipo de sistema de ancoragem não apresenta trechos apoiados no leito marinho, podendo transmitir cargas verticais à fundação. Em função disso, surge a necessidade do emprego de fundações que resistam tanto a esforços horizontais quanto a verticais, como estacas de sucção (Figura 4), estacas torpedo e VLA's (*Vertical Load Anchor*).

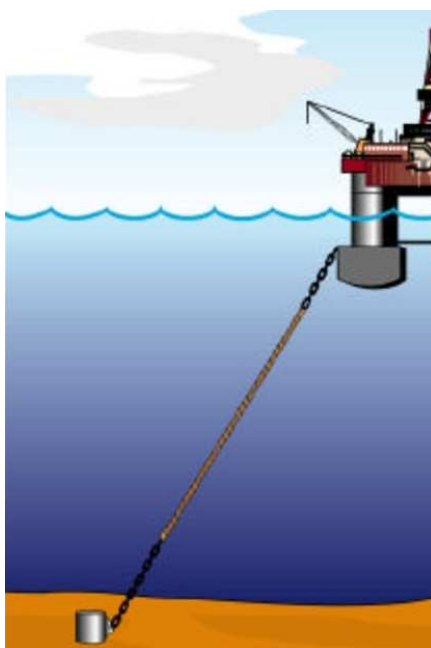


Figura 4: Ancoragem *taut-leg* executada com fundação composta por estaca de sucção (SciELO Brazil, 2016)

O sistema de ancoragem vertical possui linhas de ancoragem tracionadas – compostas por tendões verticais – e sua estabilidade é possível em decorrência da parcela do empuxo proveniente da parte submersa da plataforma flutuante superar o peso próprio da mesma. Em outras palavras, a ancoragem vertical consiste na constante tração promovida pelo excesso de empuxo fornecido pelo casco da plataforma. Elas atuam em pequenas áreas de ancoragem, otimizando ao máximo a utilização do espaço no leito marinho quando comparadas aos outros sistemas de ancoragem, evitando, assim, interferências com outras estruturas.

Os tendões verticais são compostos por cabos de aço ou materiais sintéticos. Segundo Lima (2006), eles conferem a esse sistema elevada rigidez no plano vertical e baixa rigidez no plano horizontal. A força de restauração no plano horizontal é fornecida pela componente horizontal da força de tração nos tendões, tais como vento, onda, corrente, entre outras.

A ancoragem vertical (Figura 5) é utilizada somente em plataformas do tipo TLWP (*Tension Leg Wellhead Platform*), que são mais utilizadas em lâminas d'água de até 1500m, e pode ser empregada em ancoragens de bóias e monobóias (Melo, 2015).

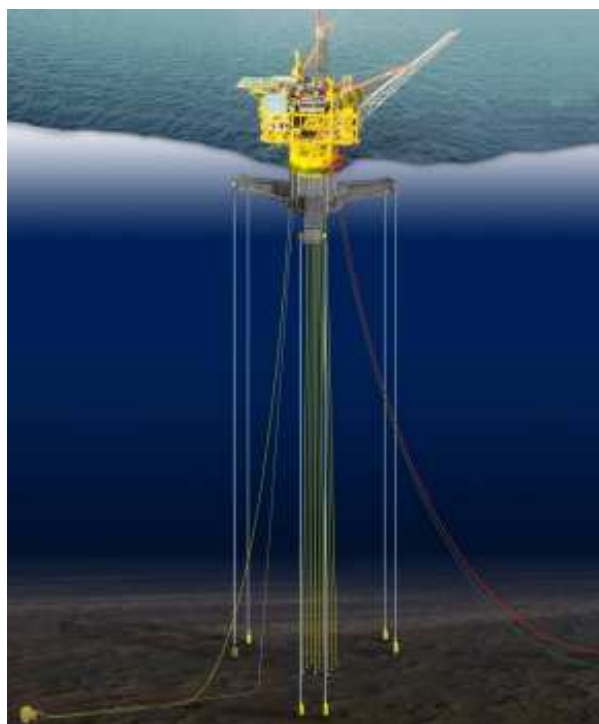


Figura 5: Ancoragem vertical em plataforma do tipo TLWP (Corrêa, 2003)

O critério de escolha do tipo de sistema de ancoragem depende, principalmente, do tipo de unidade flutuante a ser utilizada, do tipo de operação a ser realizada, das características do solo, das condições ambientais (cargas de onda, vento, correnteza e maré), da profundidade da lâmina d'água, do número de *risers* a serem instalados e do custo.

2.2. Estacas de sucção

2.2.1. Breve histórico das estacas de sucção

Os primeiros relatos de conceitos de estacas de sucção foram feitos por Goodman *et al.* (1961), com o desenvolvimento de estudos sobre resistência ao arrancamento de âncoras a vácuo.

Durante a década de 70, foram realizados estudos com a análise da capacidade de carga de âncoras a vácuo em vários tipos de solo (Wang *et al.*, 1975; Helfrich *et al.*, 1976).

Muitas pesquisas vêm sendo realizadas desde então para investigar o desempenho das estacas de sucção, incluindo modelagem física usando modelos reduzidos ensaiados em centrífuga geotécnica (Andersen *et al.*, 1993; Cluckey *et al.*, 1993; House *et al.*, 2001; Kelly *et al.*, 2006; Melo, 2015), simulações analíticas e numéricas (Rahman *et al.*, 2001; Randolph *et al.*, 2002; Albeny *et al.*, 2003; Cao *et al.*, 2003; Zhan *et al.*, 2010; Ahn *et al.*, 2014).

2.2.2. Definição de estacas de sucção

Uma estaca de sucção é um elemento de fundação oco, em formato cilíndrico, que possui parte superior fechada (topo) e parte inferior aberta (fundo). Esse tipo de fundação tem capacidade de resistência a cargas de arrancamento vertical e horizontal, ou seja, nas direções axial e lateral.

De acordo com Santos (1997), as estacas de sucção podem ter a tampa removida ou mantida após serem instaladas. Para determinar qual tipo de estaca de sucção utilizar, é necessário avaliar a carga que será aplicada, o solo do leito marinho, as operações *in situ* e os custos de fabricação. A vantagem da permanência da tampa na

fase operacional da estaca é a de garantir uma maior capacidade de carga ao arrancamento vertical e a vantagem de remover a tampa após a instalação da estaca é a de poder utilizá-la para a cravação de outras estacas, minimizando custos de fabricação.

2.2.3. Instalação de estacas de sucção

A Figura 6 mostra em quatro etapas a instalação das estacas de sucção.

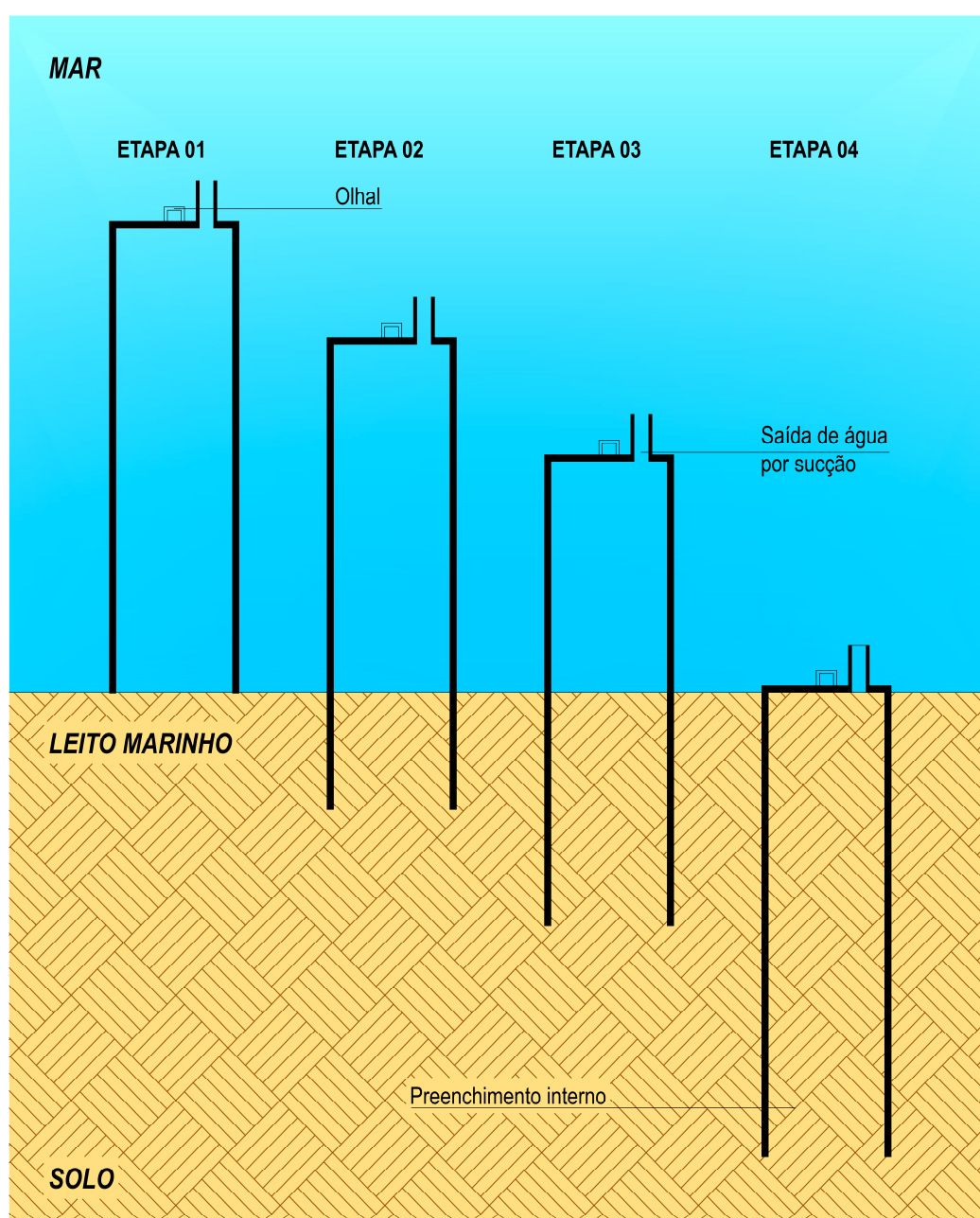


Figura 6: Etapas de instalação de estacas de sucção

De acordo com Randolph *et al.* (2011), durante o processo de instalação de uma estaca de sucção, ela penetra primeiro o leito marinho sob seu peso próprio com a válvula de sucção aberta. Depois disso, a penetração ocorre por meio do bombeamento da água presente no seu interior para o seu exterior, por intermédio de uma bomba centrífuga submersa, o que leva a pressão dentro da estaca a ficar menor do que a pressão fora da estaca e induz penetração adicional em leito marinho. As válvulas presentes no sistema fecham as aberturas de aplicação de sucção, assim que a estaca atinge sua posição de penetração de projeto. Devido à instalação, é formado o preenchimento interno de solo no interior da estaca de sucção, também chamado de bucha de solo, que aumenta a capacidade de permanência desta estaca no leito marinho.

A Etapa 1 representa a estaca antes de sua cravação. A Etapa 2 ilustra a penetração inicial, por peso próprio, da estaca no solo. A penetração adicional é mostrada na Etapa 3, com a aplicação da sucção. Na Etapa 4, a estaca de sucção está instalada e é possível observar a bucha de solo formada em seu interior.

O esquema de forças durante a instalação de uma estaca de sucção é apresentado na Figura 7.

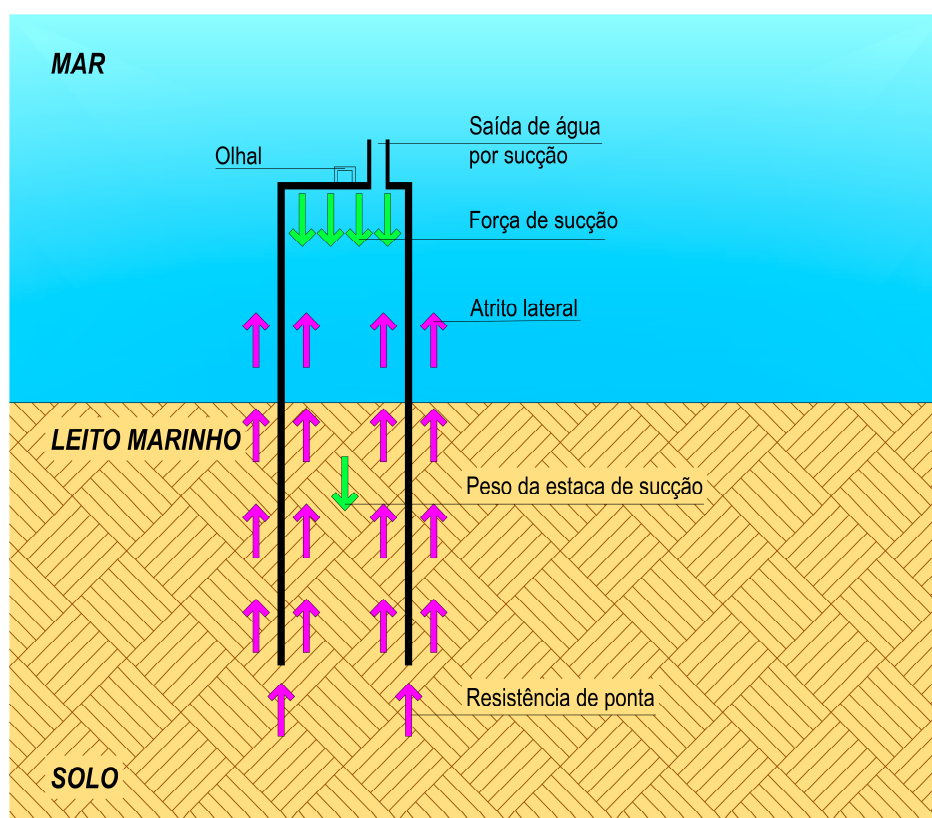


Figura 7: Esquema de forças durante a instalação de uma estaca de sucção

A definição das forças de instalação é importante para a sua correta execução e para definir a força de sucção máxima a ser aplicada, evitando cavitação e garantindo a formação correta do preenchimento interno (Melo, 2015).

A resistência à penetração da estaca é igual a soma da resistência de ponta, do atrito lateral interno e do atrito lateral externo, que são as forças que se opõem à penetração da estaca de sucção no leito marinho, conforme o esquema de forças. Sendo assim, a força que penetra a estaca no leito marinho consiste no peso submerso da estaca e na pressão gerada pela sucção aplicada (Santos, 1997).

As estacas de sucção podem ser instaladas através de navios guindastes ou lançadas por rebocadores quando possuem diâmetros menores (Tjelta, 2001). Durante a instalação, é feito um monitoramento para garantir posição, verticalidade, carga, subpressão e profundidade de penetração previstos em projeto (Melo, 2015).

No caso de desinstalação de uma estaca de sucção, o sistema de bombeamento permite a entrada de água para o seu interior, gerando uma pressão maior dentro da estaca, que possibilita a sua retirada do leito marinho.

2.2.4. Penetração de estacas de sucção

Conforme dito anteriormente, a estaca de sucção tem seu primeiro trecho de penetração no leito marinho devido ao seu peso próprio. Depois disso, é aplicada a sucção, em que faz-se necessária uma pressão mínima para a penetração adicional ocorrer. Essa pressão é calculada a partir da Equação (1) proposta por House e Randolph (2001), a seguir:

$$\Delta p = \frac{(N_c S_u + \gamma' l) A_{ponta} + \alpha_i \overline{S_u A_i} + \alpha_e \overline{S_u A_e} - W_{est}}{A_{plugue}} \quad (1)$$

Sendo,

Δp = pressão necessária para a instalação da estaca de sucção

N_c = fator de capacidade de carga

S_u = resistência ao cisalhamento não drenado

γ' = peso específico efetivo do solo

l = comprimento enterrado da estaca

A_{ponta} = área da ponta da estaca

α_i = fator de atrito interno

A_i = área interna da estaca em contato com o solo

α_e = fator de atrito externo

A_e = área externa da estaca em contato com o solo

W_{est} = peso da estaca submersa

A_{plugue} = área da seção transversal da bucha de solo

Porém, é necessário definir uma pressão máxima a ser aplicada, para evitar a ruptura do preenchimento interno da estaca. Ela pode ser calculada a partir da Equação (2) proposta por Andersen e Jostad (1999), apresentada abaixo:

$$A_{ua} = \alpha S_u \frac{A_i}{A_{plugue}} + N_c S_{u,base} \quad (2)$$

Sendo,

A_{ua} = pressão máxima admissível

α = fator de atrito

S_u = resistência ao cisalhamento não drenado

A_i = área interna da estaca em contato com o solo

A_{plugue} = área da seção transversal da bucha de solo

N_c = fator de capacidade de carga

$S_{u,base}$ = resistência ao cisalhamento não drenado da ponta da estaca

É importante ressaltar que a razão A_{parede} por A_{plugue} é diretamente proporcional à razão comprimento por diâmetro (L/D), que representa a relação de aspecto da estaca de sucção.

Sendo,

L/D = relação de aspecto

L = comprimento da estaca de sucção

D = diâmetro externo da estaca de sucção

2.2.5. Carregamento em estacas de sucção

Em decorrência do tipo de sistema de ancoragem a que uma estaca de sucção está ligada, as suas condições de carregamento podem variar.

Conforme relatado anteriormente, as estacas de sucção são geralmente utilizadas em sistemas de ancoragem *taut-leg*, em que as cargas aplicadas são verticais e horizontais, e em sistemas de ancoragem vertical, em que há somente carregamento vertical. Porém, também são empregadas em sistemas de ancoragem convencional, em que as cargas aplicadas são praticamente horizontais. Portanto, podem existir carregamentos horizontais e verticais sendo aplicados nesse tipo de fundação.

Outro fator que pode influenciar na direção das cargas, exercidas pela linha de ancoragem ligada à fundação, é o seu ponto de amarração. De acordo com Keaveny *et al.* (1994), a localização do olhal, ponto onde ocorre a amarração dos elementos de ligação com a fundação, influencia a solicitação desse tipo de estaca porque o ponto de ligação da linha de ancoragem na estaca e o ângulo que a linha de ancoragem faz com a lateral da estaca (ângulo de inclinação da carga) são aspectos determinantes no tipo de superfície de ruptura atuante e afetam as condições de carregamento e a capacidade de suporte da estaca de sucção.

Os primeiros relatos de variação da localização do ponto de amarração são de Keaveny *et al.* (1994), que realizaram testes de estacas de sucção em argila, com penetração até o leito marinho (toda a altura da estaca) e com penetração até a metade da altura total da estaca. Os testes foram realizados em escala real com pontos de amarração localizados na lateral da estaca. Os resultados mostraram que, nos ensaios em que o ponto de amarração estava abaixo do ponto médio da profundidade da estaca, a capacidade horizontal quase dobrou.

Ahn *et al.* (2013) desenvolveram estudos sobre a capacidade de carga de estacas de sucção utilizadas como fundação *offshore*. Eles investigaram, através de análises de modelos tridimensionais, a influência do ponto de carregamento ótimo de estacas de sucção totalmente cravadas em solos coesivos, com relação de aspecto igual a dois, aplicando perfis de resistência ao cisalhamento não drenado distintos. Os resultados foram obtidos pelo Método dos Elementos Finitos com o uso do programa computacional Abaqus. Com base nesses resultados, um conjunto de gráficos e fórmulas foi proposto para estimar as capacidades de carga vertical e horizontal de estacas de sucção.

Destaca-se, pois, que para sistemas de ancoragem vertical, essa variação do posicionamento do ponto de amarração não se aplica.

2.2.6. Capacidade de carga axial à tração de estacas de sucção

Em recente pesquisa, Melo (2015) revela que a resistência ao arrancamento vertical de uma estaca de sucção, com tampa fechada (a sucção é mantida no interior da estaca) ou com tampa aberta, pode ser representada pela Equação (3):

$$Q = (W_{estaca} + W_{plugue}) + F_w + Q_{lateral} + Q_{ponta} \quad (3)$$

Sendo,

Q = resistência ao arrancamento vertical

W_{estaca} = peso da estaca

W_{plugue} = peso da bucha de solo

F_w = pressão da água acima da estaca

$Q_{lateral}$ = resistência lateral da estaca

Q_{ponta} = resistência de ponta da estaca

No caso de tampa fechada, o atrito lateral a ser considerado será somente o externo e a resistência de ponta é assumida na seção transversal do fuste da estaca e do preenchimento interno. No caso de tampa aberta, o atrito lateral a ser considerado será tanto externo quanto interno, e a resistência de ponta é assumida somente na seção transversal do fuste da estaca.

Para o caso de estacas de sucção fechadas no topo, instaladas em argila e carregadas axialmente à tração, os cálculos de projeto têm sido feitos baseados em análises de equilíbrio limite. Esse método é recomendado pela API-RP2A, em que o atrito lateral é estimado usando α (fator de atrito) e a resistência de ponta é estimada utilizando a teoria da capacidade de carga.

A Figura 8 indica as forças que atuam no arrancamento vertical para esse tipo de estaca.

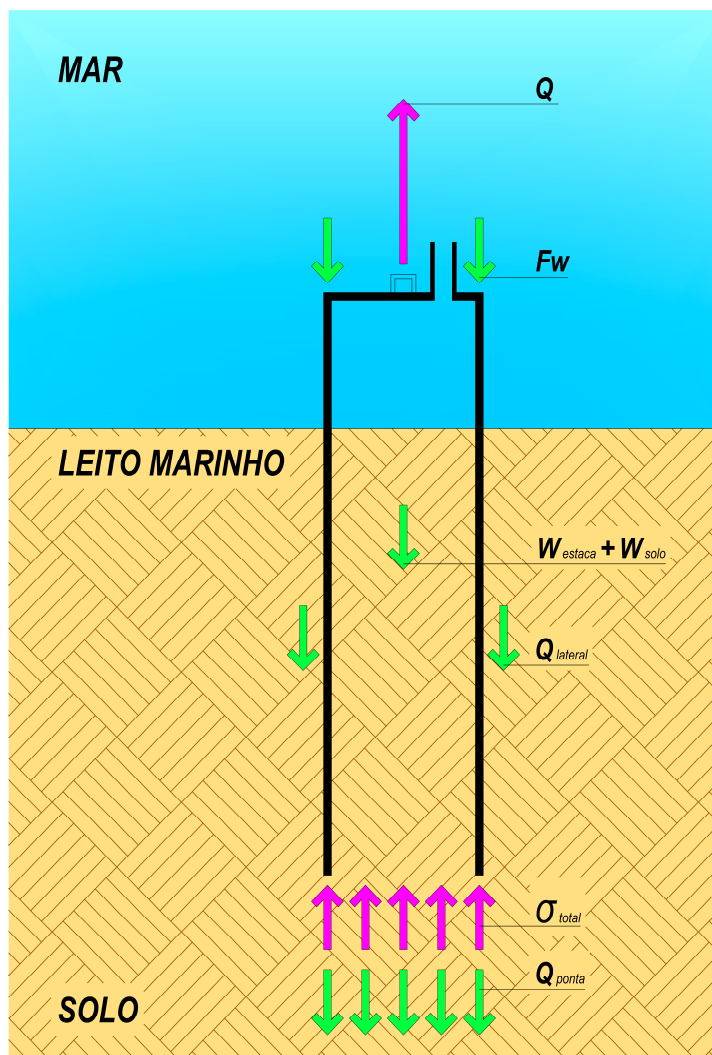


Figura 8: Componentes de forças durante o arrancamento de uma estaca de sucção com tampa fechada

A resistência total do solo é expressa em função de S_u (resistência ao cisalhamento não drenado) de acordo com a Equação (4):

$$R = Q_{lateral} + Q_{ponta} = f A_{lateral} + q A_{ponta} \quad (4)$$

Sendo,

R = resistência total do solo

$Q_{lateral}$ = resistência lateral da estaca

Q_{ponta} = resistência de ponta da estaca

$f = \alpha S_u$ = atrito unitário

$A_{lateral}$ = área lateral da estaca

q = resistência de ponta unitária

A_{ponta} = área da ponta da estaca

A formulação do equilíbrio limite despreza o peso da estaca (W_{estaca}), o peso do preenchimento interno (W_{plugue}) e a pressão que a água exerce acima da estaca (F_w), que são forças que empurram a estaca de sucção para baixo e se opõem à tensão total (σ_{total}). Além disso, essa formulação assume que a tensão de ruptura ocorre no preenchimento interno e que este irá junto com a estaca durante o seu arrancamento.

Melo (2015) realizou uma pesquisa com modelos físicos reduzidos de estacas de sucção, ensaiados em centrífuga geotécnica, com o objetivo de avaliar a influência da superfície da parede externa da estaca de sucção em relação à sua resistência ao arrancamento vertical, na tentativa de aumentar a capacidade de permanência da estaca no leito marinho.

Quatro modelos reduzidos de estacas de sucção foram confeccionados em alumínio, em escala 1/40, sendo um modelo liso e três modelos com geometria dentada, que equivalem a superfícies rugosas distintas aplicadas em suas paredes externas. Modelos de solo argiloso, similares ao encontrado nos campos de petróleo do Brasil em águas profundas e ultraprofundas, foram desenvolvidos. Ensaio de cisalhamento direto, mini penetrômetro T-bar, Torvane e de compressão triaxial UU auxiliaram na determinação de parâmetros do solo e da interface de contato entre as estacas e o solo.

Nos ensaios realizados, as estacas foram instaladas a 1g, usando um dispositivo especial projetado para esse fim específico, combinando carga e vácuo, imitando o processo real de instalação do protótipo. Em cada ensaio, foram utilizadas duas estacas de sucção simultaneamente, sendo sempre uma estaca lisa e a outra com geometria dentada. Os ensaios de arrancamento foram executados na centrífuga geotécnica com aceleração gravitacional de 40g. Esses ensaios determinaram a força de arrancamento em função do deslocamento das estacas e mostraram que, independentemente da quantidade de ranhuras nas estacas, as estacas rugosas possuem maior resistência ao arrancamento quando comparadas às estacas lisas. A estaca que obteve melhor desempenho foi a que teve mais ranhuras, com um percentual de 22,63% de acréscimo de força em relação à estaca lisa do mesmo ensaio.

Derakhshani (2017) propôs uma formulação para estimar a capacidade de suporte ao arrancamento de estacas de sucção utilizando uma ferramenta computacional de

inteligência artificial híbrida. Este estudo se baseou na combinação de árvore modelo (M5), uma ferramenta de computação capaz de classificar dados e apresentar relações simples, e programação genética (GP), um tipo de algoritmo que produz um programa computacional, denominada método M5-GP. Essa combinação empregou ao mesmo tempo as vantagens dessas duas metodologias.

A partir de dois modelos, as fórmulas foram desenvolvidas em termos de vários parâmetros que governam o problema, retirados de um banco de dados experimental confiável da literatura. Os resultados mostraram que as relações baseadas em M5-GP são capazes de prever com precisão a capacidade de ancoragem de estacas de sucção.

2.3. Método dos Elementos Finitos

2.3.1. Definição do Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é definido como um procedimento geral de discretização de problemas contínuos, apresentados por expressões matemáticas. Esse método consiste em modelagens numéricas, capazes de representar o comportamento de fenômenos reais em programas computacionais para obtenção de soluções (Zienkiewicz *et al.*, 2000). Existem vários programas comerciais computacionais, altamente sofisticados, que fazem os mais diversos tipos de análise pelo MEF, tais como SAP, Ansys, Abaqus, Nastran, entre outros.

Para obter a solução de um problema nesses programas, é necessário definir um arquivo de entrada de dados, contendo a geometria do problema. A possibilidade de modelar formas geométricas bem complexas e de aplicar carregamentos (estáticos e/ou dinâmicos) e condições de contorno, tornou esse método uma ferramenta numérica muito importante e muito utilizada.

Desai e Abel (1972) afirmam que, para problemas de tensão-deformação, o MEF pode ser aplicado seguindo uma sequência de passos.

O primeiro passo é o pré-processamento, em que é feita uma divisão do meio contínuo em um conjunto de partes chamadas de elementos, que são conectados por um número finito de pontos chamados de nós. Os elementos podem ser triângulos ou quadriláteros para problemas em duas dimensões e tetraedros ou

hexaedros para problemas em três dimensões. Os nós podem ser internos ou externos aos elementos, ou seja, podem pertencer ao interior ou às arestas dos mesmos.

De acordo com os elementos escolhidos para o problema, funções de interpolação são assumidas para determinar um modelo de deslocamentos.

Propriedades geométricas e do material de cada elemento devem ser determinadas. Nesse passo, é montada a matriz de rigidez dos elementos, que é constituída pelos coeficientes das equações de equilíbrio derivadas das propriedades em questão. Em seguida, a matriz de rigidez global é montada e as interconexões nodais garantem o comportamento de todos os elementos em conjunto.

O próximo passo é a solução do sistema de equações para determinar os deslocamentos desconhecidos. Com base nessa solução, é feito o cálculo das incógnitas do problema.

O último passo desse método é o pós-processamento. Ele depende das necessidades do modelo em questão, ou seja, dos dados que precisam ser fornecidos para esse problema.

2.3.2. Aplicações do Método dos Elementos Finitos

A comprovação de eficiência desse método foi obtida por meio dos inúmeros resultados satisfatórios em estudos publicados, induzindo-o à boa aceitação pela comunidade científica. Por ser um método computacional, é necessário avaliar se as configurações realizadas estão adequadas para representar o comportamento de um determinado problema. Isso geralmente é feito por um processo de validação, em que os resultados obtidos através do MEF são comparados com resultados obtidos em outros métodos de análise ou de verificação em campo.

Esse método é aplicado em diversos campos de atuação, como biomedicina, análise térmica, eletromagnetismo, dinâmica dos fluidos, engenharia e outras inúmeras áreas.

Modelos numéricos tridimensionais desenvolvidos para análises através do MEF têm se destacado em estudos geotécnicos devido à sua versatilidade para solucionar problemas de Engenharia (Costa, 2008).

Ahn *et al.* (2014) avaliaram o desempenho da resistência ao arrancamento de estacas de sucção utilizadas na fundação de turbinas eólicas *offshore*, utilizando o MEF em modelos tridimensionais, com soluções obtidas através do programa computacional Abaqus. Eles utilizaram várias dimensões de estacas de sucção instaladas. Ao todo foram 156 combinações de análises, com variações de relação de aspecto, perfis de resistência ao cisalhamento e ângulos de translação. Baseado em um conjunto de equações propostas por eles, resistências ao arrancamento vertical e ao arrancamento horizontal de estacas de sucção foram estimadas com êxito.

Latini *et al.* (2017) realizaram simulações numéricas para investigar a dinâmica horizontal de estacas de sucção cravadas em diferentes perfis de solo sobrepostos a uma superfície rígida de rocha. Eles utilizaram o MEF em diversos modelos tridimensionais, com soluções obtidas através do programa computacional Abaqus.

O procedimento de modelagem numérica foi validado com soluções analíticas existentes. Um estudo paramétrico foi desenvolvido para analisar as características de vibração e os efeitos dos principais parâmetros adimensionais (índice de esbeltez, espessura da camada de solo e rigidez relativa) nas impedâncias dinâmicas de estacas de sucção utilizadas como fundação de turbinas eólicas *offshore*. Esses estudos mostraram que as impedâncias dinâmicas das estacas de sucção são profundamente afetadas pela espessura da camada do solo. Os resultados numéricos forneceram uma base para a formulação de expressões matemáticas simples para determinar os componentes de rigidez estática de estacas de sucção. As expressões propostas possuem uma estimativa mais precisa dos componentes de rigidez em comparação com expressões analíticas de estudos anteriores.

2.4. Programa computacional Abaqus

O Abaqus é um programa utilizado na modelagem computacional de problemas complexos de diversas áreas, em que a solução é obtida através do MEF. Segundo o manual do usuário Abaqus (2009), ele é dividido em três módulos principais, o Abaqus/CAE, o Abaqus/Standard e o Abaqus/Explicit.

O Abaqus/CAE é a interface gráfica que desenvolve modelos geométricos e atribui, ao modelo, propriedades do material, condições de contorno, carregamentos e malha de elementos finitos, funcionando como pré-processador. Pode funcionar também como pós-processador, gerando visualização gráfica dos resultados.

O Abaqus/Standard é uma interface de simulação que resolve o sistema de equações em cada incremento do processo de solução. Possui mais recursos, porém demanda um maior tempo computacional para as convergências do problema. É recomendado para análises estáticas e dinâmicas não lineares ou com níveis discretos de não linearidades.

O Abaqus/Explicit é uma interface de simulação que resolve problemas dinâmicos sem iterações, com grandes deformações e deslocamentos, através de iteração explícita do próximo estado cinemático, baseado no estado obtido do incremento anterior. Requer menor esforço computacional, entretanto apresenta mais problemas de convergência que o Abaqus/Standard.

O Abaqus é usado em várias áreas da Engenharia e conta com diversas aplicações na geotecnia, como descrito por Helwany (2007). Isso porque é capaz de analisar comportamentos elastoplásticos e contém modelos constitutivos aplicados para solos.

3. Definição dos modelos

3.1. Aspectos gerais

Esta pesquisa buscou desenvolver alternativas para o uso de plataformas TLWP (*Tension Leg Wellhead Platform*) em lâminas d'água mais profundas do que as empregadas nos dias de hoje. Conforme dito anteriormente, para este tipo de plataforma é utilizado o sistema de ancoragem vertical, que possui linhas de ancoragem tracionadas na direção axial.

Com o intuito de verificar a influência da rugosidade na superfície externa das estacas de sucção com tampa fechada em relação à sua resistência ao arrancamento vertical e de investigar o comportamento tensão-deformação da interação solo-estaca no sistema, foram utilizados, neste estudo, quatro modelos de estacas de sucção com variações de rugosidades, instaladas em um mesmo modelo de solo argiloso.

A rugosidade aplicada nas superfícies externas dos modelos foi empregada por causa da influência do atrito lateral na capacidade de suporte das estacas de sucção. Sendo assim, é esperado que quanto maior a quantidade de ranhuras atribuídas ao fuste das estacas de sucção, maior será a parcela de resistência lateral que atuará na resistência ao arrancamento das mesmas.

Este capítulo apresenta os modelos utilizados nas simulações numéricas deste estudo, com seus respectivos parâmetros. Os modelos foram definidos seguindo algumas diretrizes dos trabalhos desenvolvidos por Ahn *et al.* (2014) e Melo (2015). Ao todo, serão quatro modelos de estacas de sucção em aço e um modelo de solo argiloso, característico dos campos de exploração de petróleo no Brasil em águas profundas e ultraprofundas.

A Tabela 1 mostra as variáveis relacionadas aos modelos numéricos em questão e a Figura 9 retrata a definição desses modelos.

Tabela 1: Definição das variáveis do modelo numérico

Variáveis	Definição
D	Diâmetro externo da estaca de sucção
L	Comprimento da estaca de sucção
t	Espessura da estaca de sucção
W_M	Largura do modelo
H_M	Profundidade do modelo

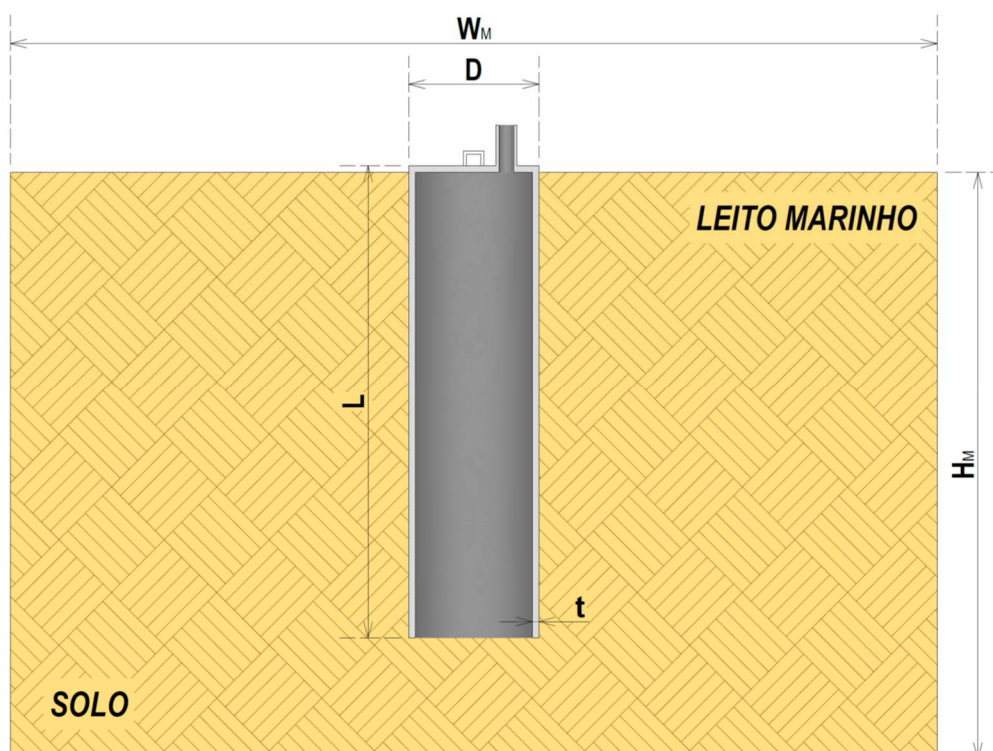


Figura 9: Definição do modelo numérico

3.2. Modelo das estacas de sucção

As estacas de sucção foram classificadas em L (lisa), R1 (menos rugosa), R2 (rugosa) e R3 (mais rugosa). A geometria e alguns parâmetros geotécnicos adotados para os modelos numéricos seguiram as diretrizes dos estudos de Melo (2015). A quantidade de ranhuras atribuídas às estacas exerce influência sobre a rugosidade das superfícies de suas paredes externas.

As Figuras 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 e 17 apresentam os modelos de estacas de sucção com suas dimensões e ranhuras (geometria dentada).



Figura 10: Modelo da estaca de sucção L

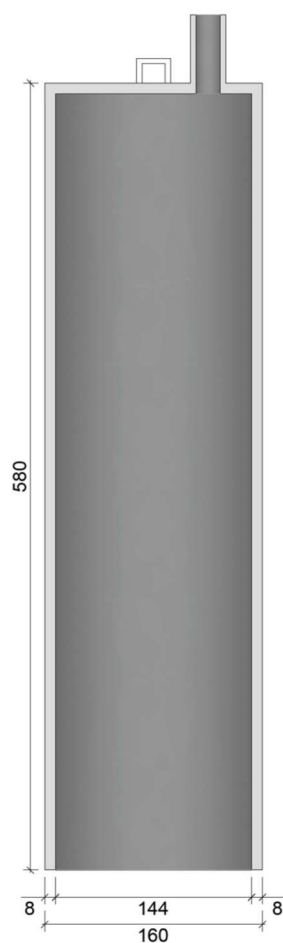


Figura 11: Dimensões em centímetros da estaca de sucção L

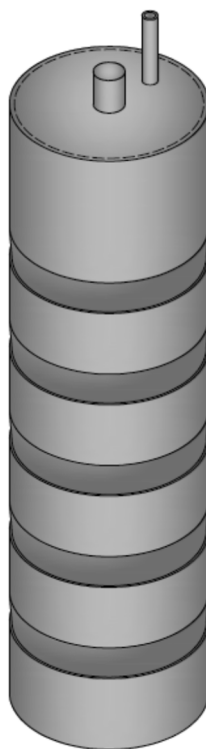


Figura 12: Modelo da estaca de sucção R1 (cinco ranhuras)

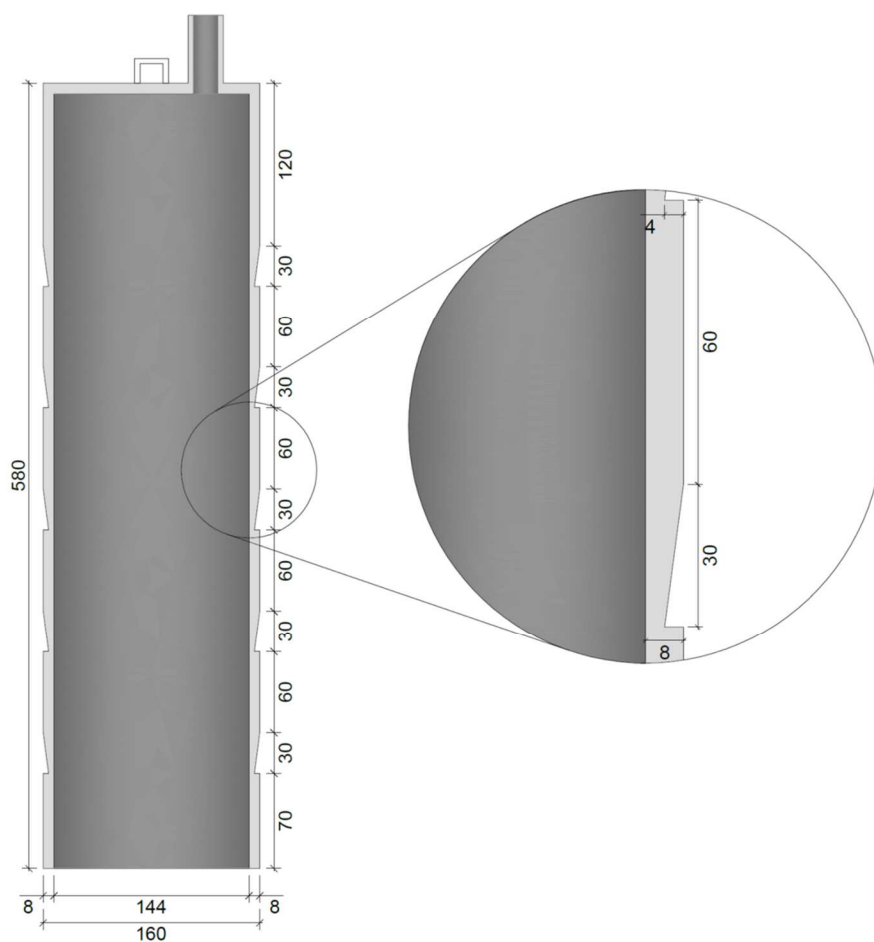


Figura 13: Dimensões em centímetros da estaca de sucção R1

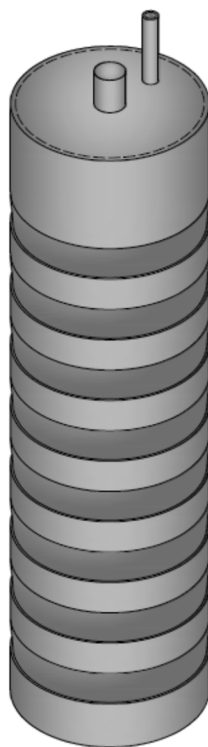


Figura 14: Modelo da estaca de sucção R2 (oito ranhuras)

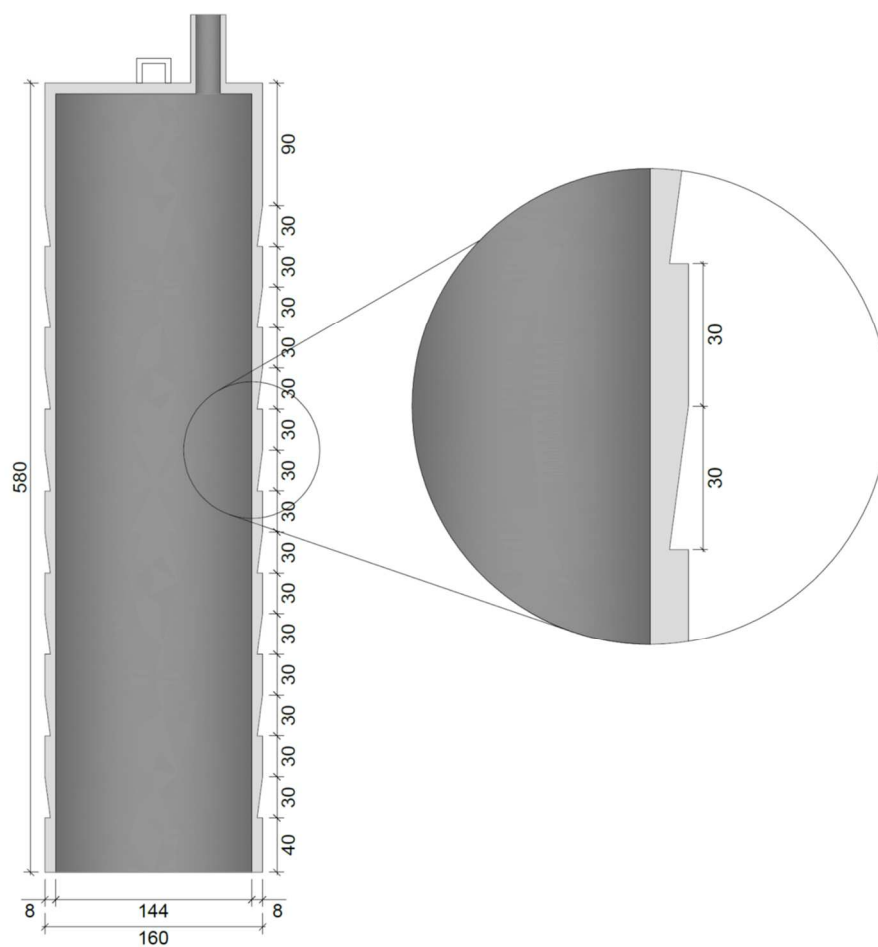


Figura 15: Dimensões em centímetros da estaca de sucção R2



Figura 16: Modelo da estaca de sucção R3 (dezessete ranhuras)

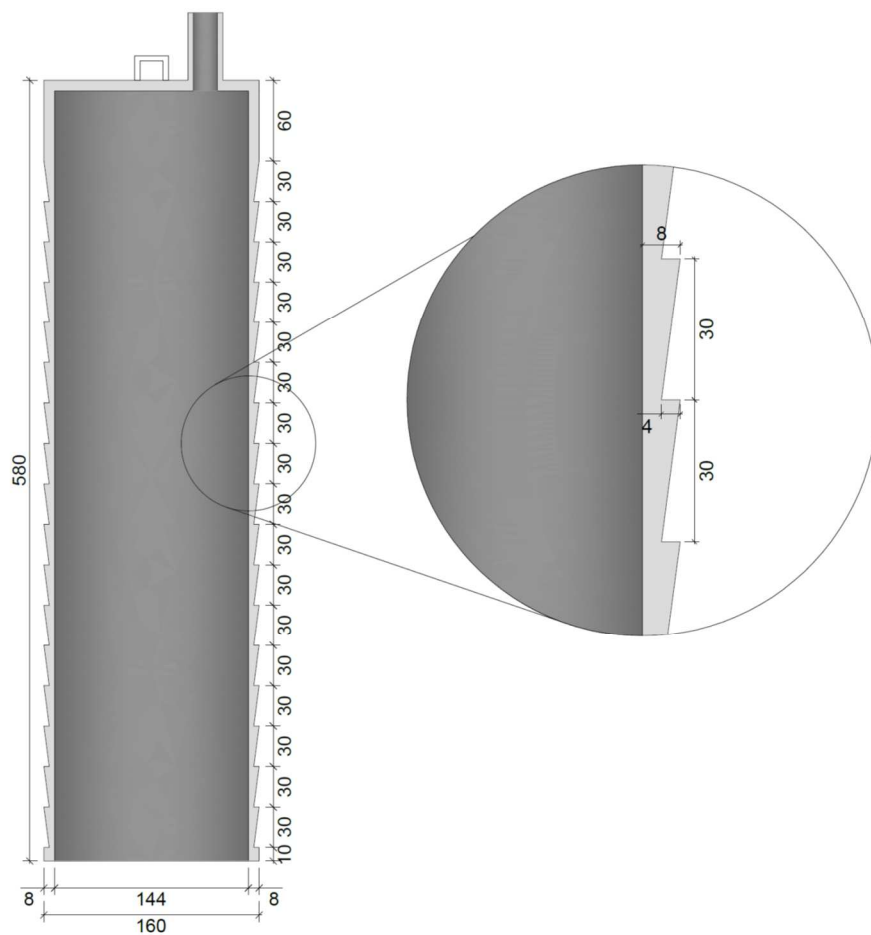


Figura 17: Dimensões em centímetros da estaca de sucção R3

A Tabela 2 apresenta os ângulos de atrito das interfaces do contato entre os materiais, obtidos por Melo (2015) através de ensaios de cisalhamento direto a 1g, em que os resultados foram influenciados pela rugosidade atribuída. Nesta tabela também são mostrados os coeficientes de atrito, calculados através da Equação (5), apresentada a seguir:

$$\mu = \tan \varphi \quad (5)$$

Sendo:

μ = coeficiente de atrito

φ = ângulo de atrito

Tabela 2: Ângulos de atrito e coeficientes de atrito para os modelos de estaca de sucção

Ensaio experimental	Ângulo de atrito (φ , °), (Melo, 2015)	Coeficiente de atrito (μ)
Solo-estaca L	24,5	0,456
Solo-estaca R1	26,2	0,492
Solo-estaca R2	28,5	0,542
Solo-estaca R3	32,1	0,627

Conforme esperado, quanto maior a quantidade de ranhuras nas estacas, maior o coeficiente de atrito.

As estacas de sucção e o solo são considerados totalmente aderidos nos estudos desenvolvidos, ou seja, as ranhuras são totalmente preenchidas com solo.

Na Tabela 3, encontram-se dados dos resultados do ensaio de cisalhamento direto realizados a 1g por Melo (2015).

Tabela 3: Ângulos de atrito e deslocamentos referentes ao ensaio de cisalhamento direto realizado a 1g por Melo (2015)

Ensaio	Ângulo de atrito (φ , °)	Deslocamento (δ , mm)
Solo-Solo	32,9	7,94
Solo-R3	32,1	2,76
Solo-R2	28,5	2,44
Solo-R1	26,2	2,10
Solo-L	24,5	1,73

É importante ressaltar que, na estaca de sucção R3, o contato solo-estaca terá um comportamento aproximadamente igual ao do contato solo-solo. Destaca-se, com a inclusão das placas, uma redução nos deslocamentos ocorridos.

A Tabela 4 mostra as dimensões dos modelos das estacas de sucção em escala real e a Tabela 5 mostra as propriedades do aço, material que constitui as estacas de sucção nesta pesquisa.

Tabela 4: Dimensões dos modelos de estaca de sucção utilizados

Variáveis	Modelos utilizados
D	1,60m
L	5,80m
t	0,08m
H _R	0,30m
t _R	0,04m

Tabela 5: Propriedades da estaca de sucção

Propriedades do aço para as estacas de sucção	
Peso específico (γ , KN/m ³), (Júnior, 2014)	78,50
Módulo de Young (E, GPa), (Júnior, 2014)	210
Coefficiente de Poisson (ν), (Júnior, 2014)	0,30

3.3. Modelo de solo argiloso

No presente estudo, o solo argiloso foi admitido como um material isotrópico e homogêneo.

Para simular um maciço de solo infinito, ou seja, com bulbo de tensões que não ultrapassem os limites estabelecidos para o modelo, foram feitos cálculos baseados nos estudos de Ahn *et al.* (2014). A largura do modelo na íntegra (W_M) foi definida para ser três vezes o comprimento da estaca de sucção (L) e o limite inferior (H_M) foi determinado para ser uma distância quatro vezes o diâmetro externo (D) da estaca de sucção abaixo da ponta da mesma.

Por meio da Equação (6), foi calculada a largura do modelo e, por meio da Equação (7), o limite inferior.

$$W_M = 3L = 3 \times 5,80m = 17,40 m \quad (6)$$

$$H_M = L + 4D = 5,80m + 4 \times 1,60m = 12,20m \quad (7)$$

O modelo tridimensional da Figura 18 foi adotado para a estaca de sucção lisa. Para as estacas rugosas, as condições de contorno serão iguais, ocorrendo mudanças somente na geometria de fuste das mesmas, em que serão inseridas as superfícies rugosas equivalentes a cada uma delas.

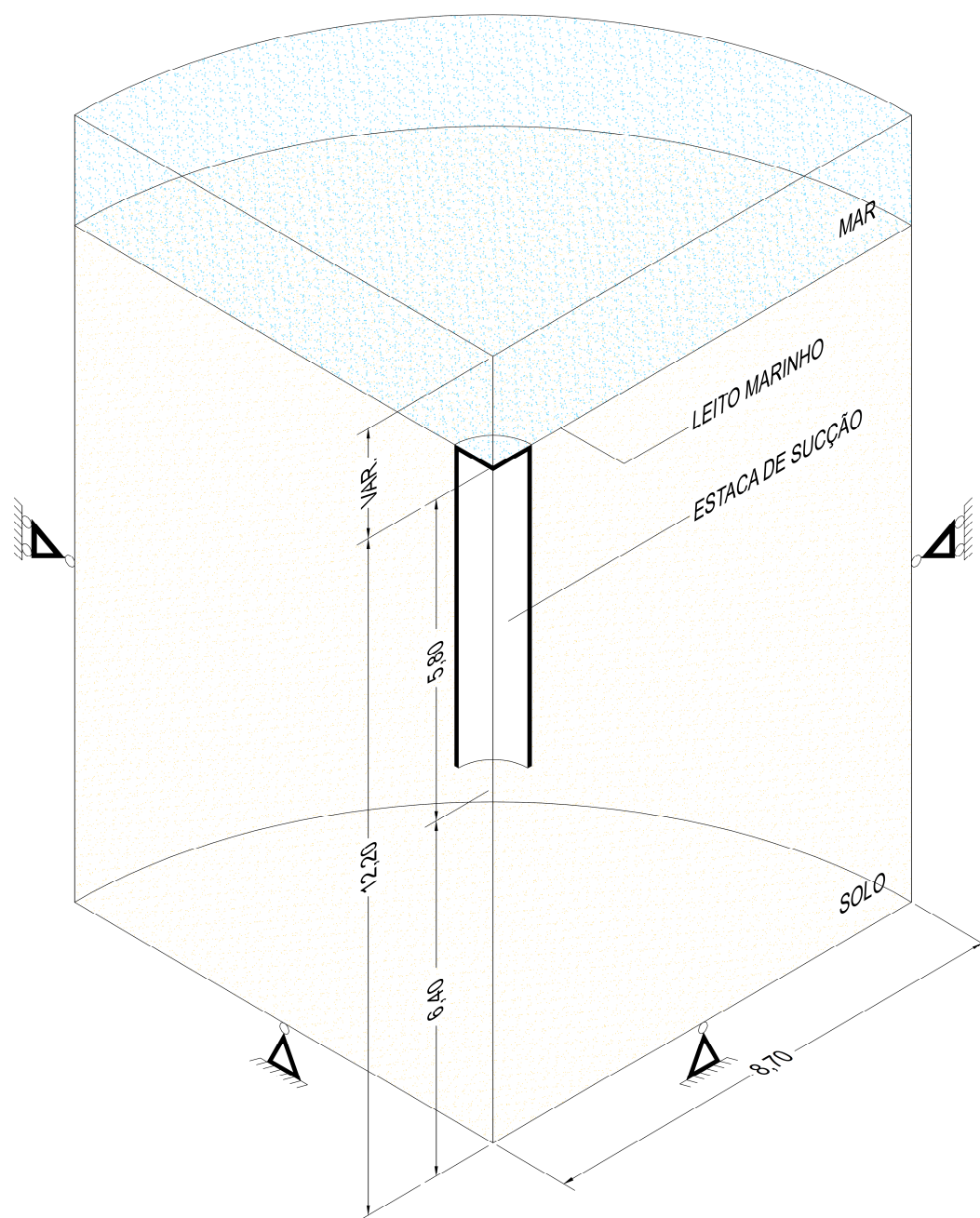


Figura 18: Condições de contorno para o modelo tridimensional da estaca de sucção lisa

Para os modelos axissimétricos, as condições de contorno serão consideradas de forma análoga, para metade da geometria do problema devido à sua simetria.

A resistência ao cisalhamento não drenado e o peso específico do solo foram definidos conforme os estudos de Melo (2015).

A resistência ao cisalhamento não drenado do solo varia em função da profundidade. Quanto maior a profundidade, maior será a sua magnitude. Portanto, foram considerados, nesta pesquisa, os resultados para a altura média e a base das estacas, através dos ensaios experimentais.

Uma média dos valores, obtidos nos ensaios experimentais, foi assumida como resistência ao cisalhamento não drenado para as simulações numéricas, nas quais foi considerada a variação dessa resistência em três porções de solo distintas. Isso foi feito para representar a variação da resistência ao cisalhamento não drenado de acordo com a profundidade do modelo de solo. Os cálculos das médias das resistências obtidas, respectivamente, na altura média da estaca e na base da estaca, são apresentados nas Equações (8) e (9):

$$S_{u, altura\ média} = \frac{6,70 + 5,70 + 5,60}{3} = 6,00\ KPa \quad (8)$$

$$S_{u, base} = \frac{13,90 + 14,30 + 13,00}{3} = 13,73\ KPa \quad (9)$$

O resultado da Equação (8) foi considerado para a porção de solo 3, que se encontra acima do ponto médio da estaca, e o resultado da Equação (9) foi considerado para a porção de solo 1, localizada abaixo da base da estaca. Para a porção de solo 2, a resistência ao cisalhamento não drenado do solo foi a média dos valores apontados para as outras porções de solo, conforme a Equação (10):

$$S_u = \frac{13,73 + 6,00}{2} = 9,87\ KPa \quad (10)$$

A Figura 19 mostra a divisão do maciço de solo em três porções.

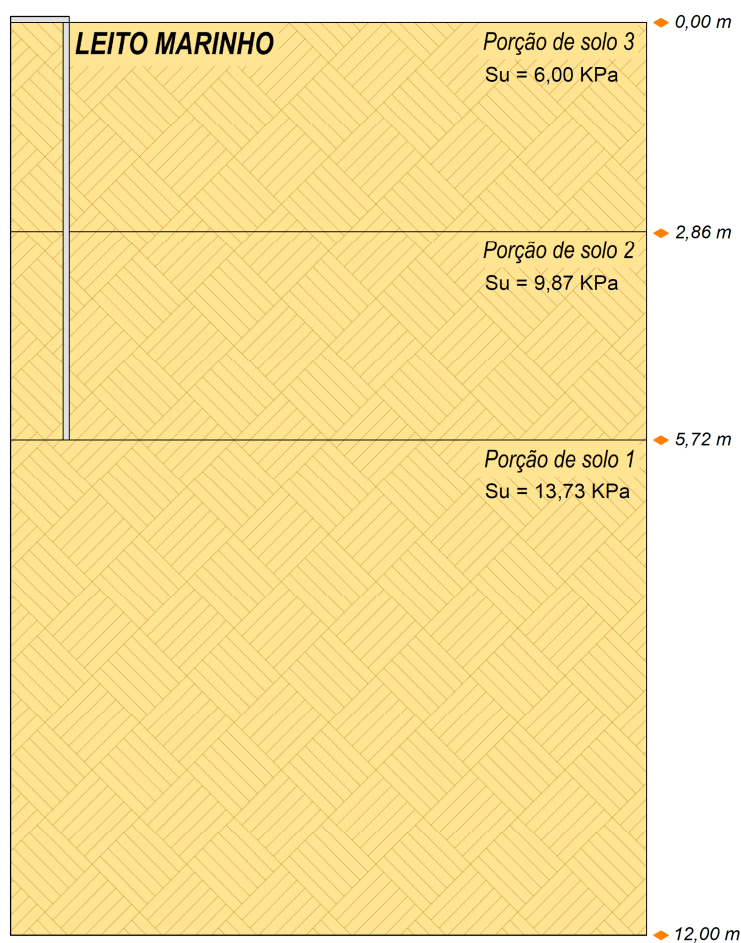


Figura 19: Divisão do maciço de solo em três porções distintas

O perfil de resistência ao cisalhamento não drenado considerado para os modelos de solo é apresentado no gráfico da Figura 20.

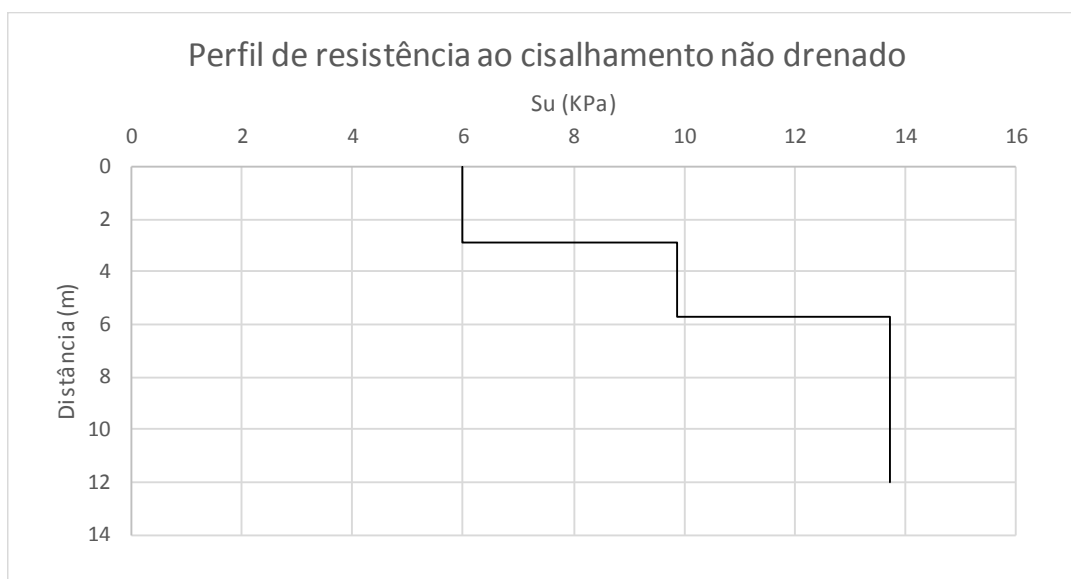


Figura 20: Perfil de resistência ao cisalhamento não drenado do solo

O peso específico do solo adotado para os modelos foi de 14,69KN/m³.

O módulo de deformabilidade foi definido de acordo com os estudos de Ahn *et al.* (2014), sendo considerado proporcional a resistência ao cisalhamento não drenado e calculado através da Equação (11), a seguir:

$$\frac{E}{S_u} = 500, \quad (11)$$

A Tabela 6 mostra as dimensões dos modelos de solo e a Tabela 7 apresenta suas propriedades geotécnicas.

Tabela 6: Dimensões dos modelos de solo

Variáveis	Modelos utilizados
W _M	17,40m
H _M	12,20m

Tabela 7: Propriedades geotécnicas dos modelos de solo

Propriedades do solo argiloso	
Resistência ao cisalhamento não drenado solo 1 (S _u , KPa)	13,73
Resistência ao cisalhamento não drenado solo 2 (S _u , KPa)	9,87
Resistência ao cisalhamento não drenado solo 3 (S _u , KPa)	6,00
Peso específico (γ, KN/m ³), (Melo, 2015)	14,69
Módulo de deformabilidade solo 1 (E, KPa)	6865
Módulo de deformabilidade solo 2 (E, KPa)	4935
Módulo de deformabilidade solo 3 (E, KPa)	3000
Coeficiente de Poisson (ν)	0,48

Em análises não drenadas com o solo saturado não ocorrem variação de volume, isto é, o solo é considerado como um material incompressível. Como o solo é modelado como um material isotrópico, conforme relatado anteriormente, esse comportamento seria representado igualando o Coeficiente de Poisson a 0,5. Essa medida, contudo, traria problemas numéricos, visto que todos os termos da matriz constitutiva dos elementos tenderiam ao infinito (Potts *et al.*, 1999 *apud* Costa, 2008). Para evitar esses problemas no *software* utilizado, o Coeficiente de Poisson (ν) adotado foi de 0,48.

4. Simulações numéricas

4.1. Aspectos gerais

Simulações numéricas tridimensionais e axissimétricas foram realizadas por meio do Método dos Elementos Finitos utilizando o programa computacional Abaqus.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) foi utilizado neste estudo por ser eficiente para simular numericamente o solo, que tem o comportamento de um contínuo. Ele permite modelar vários materiais em uma única simulação numérica, pois a cada elemento pode-se atribuir propriedades específicas.

O programa computacional Abaqus foi adotado por trabalhar com o Método dos Elementos Finitos, possuir critérios de ruptura compatíveis ao comportamento de solos e por ser eficiente com problemas de contato.

Os modelos estudados não simulam a cravação das estacas de sucção. Sendo assim, as análises têm início com a estaca cravada e com as tensões no solo devido somente ao peso próprio do maciço, ou seja, não há considerações de perturbações no campo de tensões do solo devido à cravação da estaca.

4.2. Construção dos modelos numéricos

Nesta pesquisa, foram utilizados os módulos Abaqus/CAE para desenvolver o modelo, e Abaqus/Standard para obter a solução do problema em questão, uma vez que os modelos foram investigados com carregamentos estáticos.

Uma sequência lógica deve ser seguida para a criação dos modelos, já que algumas etapas são associadas a outras.

A construção dos modelos numéricos foi obtida por meio de quatro etapas: inicial, contato, carregamento e arrancamento, descritas a seguir.

4.2.1. Etapa inicial

Devido à simetria do problema e a fim de reduzir a quantidade de elementos a serem analisados, um quarto da geometria dos modelos tridimensionais foi simulada no Abaqus e metade da geometria dos modelos axissimétricos.

O lançamento de cada um dos modelos no Abaqus, tanto os tridimensionais quanto os axissimétricos, se inicia automaticamente com a etapa inicial, em que foram criadas duas partições para determinar a geometria de cada um dos modelos em questão. Uma dessas partições representou, separadamente, cada um dos modelos de estaca de sucção detalhados no capítulo três e a outra, o modelo de maciço de solo referente à estaca em questão. A bucha de solo presente no interior da estaca é formada pelo mesmo tipo de solo do maciço e, por isso, eles constituem a mesma partição. Porém, a partição do maciço de solo foi dividida em três porções, conforme apresentado anteriormente, e possibilitou, além da atribuição de propriedades distintas a essas partes, a aplicação de carregamento gradativo às mesmas, que foi efetuado da porção de solo mais profunda para a mais superficial.

As propriedades dos materiais – aço e solo argiloso – foram atribuídas, respectivamente, às estacas e aos maciços de solo. Para o aço, foram inseridos os valores do peso específico e das propriedades elásticas (Tabela 5) e, para o solo argiloso, foram inseridos os valores do peso específico e das propriedades elásticas e plásticas (Tabela 7).

A fim de modelar o comportamento do solo coesivo não drenado em questão, foi adotado o critério de ruptura de Von Mises. Esse modelo constitutivo do solo conferiu à modelagem numérica o emprego de análise de tensão total e, com isso, variações de poropressão e de tensão efetiva não foram consideradas ao longo do tempo.

É feita, então, a montagem das partições, em que os sólidos funcionam como uma peça única a ser analisada. A Figura 21 retrata a montagem para a estaca de sucção lisa. De forma similar, o mesmo ocorre para os outros modelos aqui estudados. Nesse momento, são criadas as coordenadas e os nós do problema a ser discretizado.

Seções foram estabelecidas para serem correlacionadas aos tipos de materiais dos modelos, que foram considerados sólidos e homogêneos, tanto para as estacas, quanto para os maciços de solo.

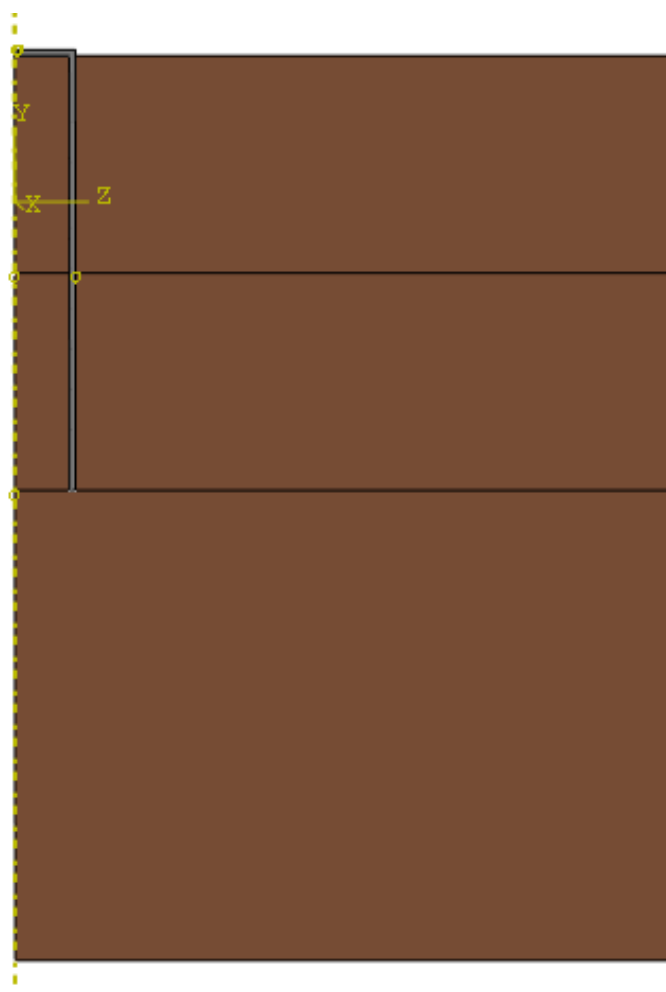


Figura 21: Montagem das partições do modelo da estaca de sucção lisa, com maciço de solo dividido em três porções

Após a definição desses passos, as malhas dos elementos finitos foram criadas. Elas são distintas para os modelos tridimensionais e axissimétricos.

4.2.1.1. Modelos tridimensionais

Para o solo argiloso, os elementos foram classificados como hexaédricos com interpolação linear (Figura 22) e integração reduzida (C3D8R) e, para as estacas de sucção, os elementos foram classificados como hexaédricos com interpolação quadrática (Figura 23) e integração reduzida (C3D20R), conforme disposição a seguir:

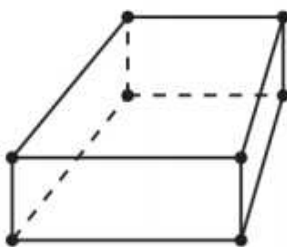


Figura 22: Elemento finito hexaédrico linear com oito nós (Ribeiro, 2010 *apud* Sosa, 2015)

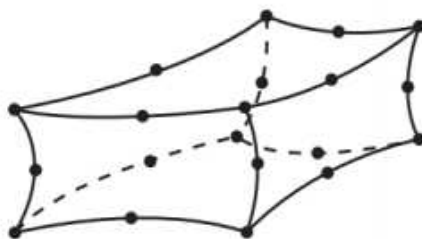


Figura 23: Elemento finito hexaédrico quadrático com vinte nós (Ribeiro, 2010 *apud* Sosa, 2015)

A Figura 24 mostra as malhas de elementos finitos dos modelos de estacas de sucção e a Figura 25, as malhas de elementos finitos dos modelos de solo.

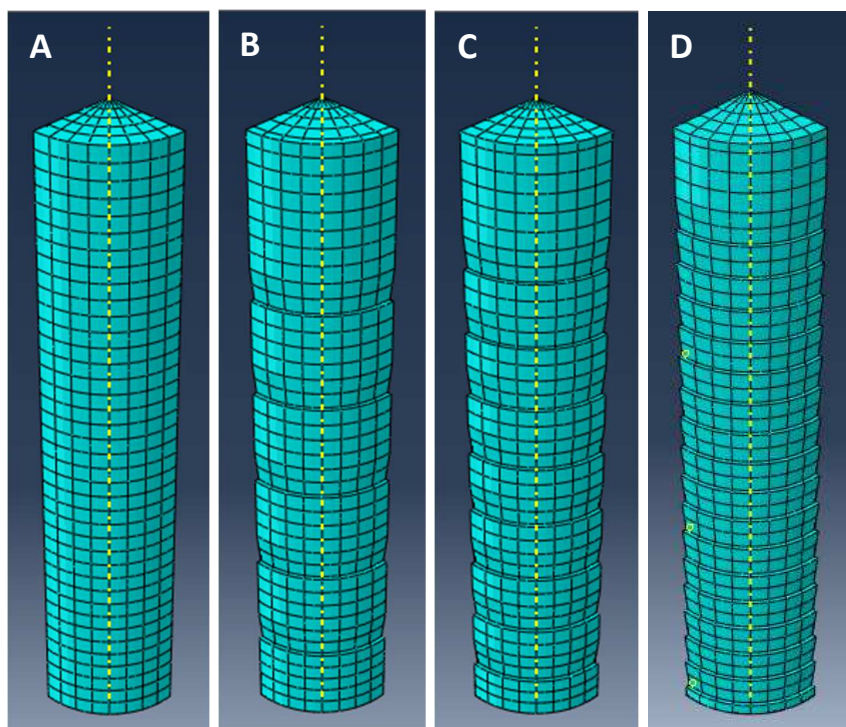


Figura 24: Malha de elementos finitos dos modelos tridimensionais das estacas de sucção lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

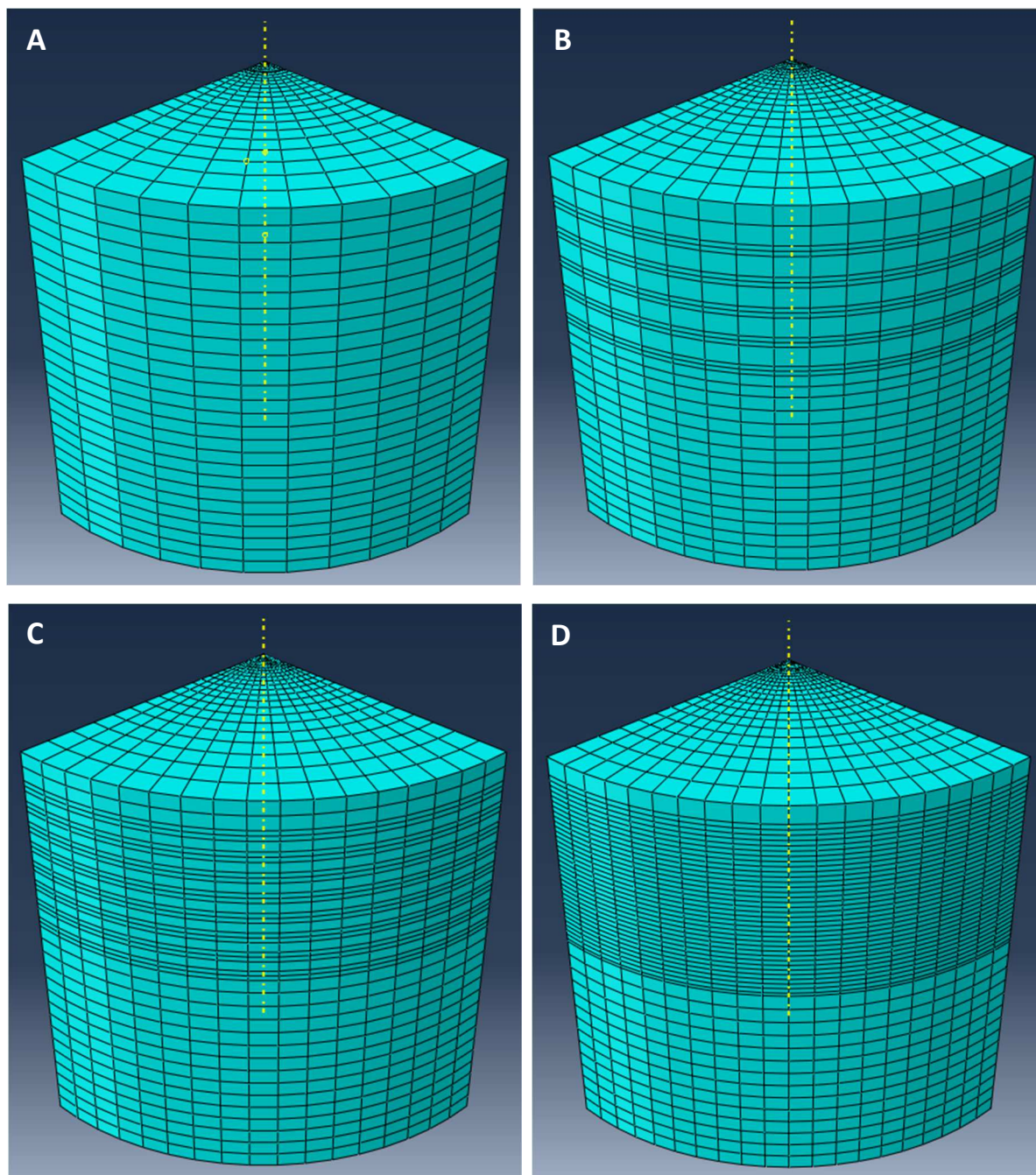


Figura 25: Malha de elementos finitos dos modelos tridimensionais dos maciços de solo referentes às estacas de sucção lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

As Figuras 26 e 27 apresentam detalhes das malhas geradas para os maciços de solo, em que é possível observar que o maciço de solo possui um vazio no lugar onde a estaca ficará posicionada no mesmo, ou seja, ele não ocupa o espaço referente à estaca no modelo. Isso ocorre porque a montagem das partições da estaca e do solo ficam em perfeito contato e a geometria do modelo foi definida estrategicamente para isso.

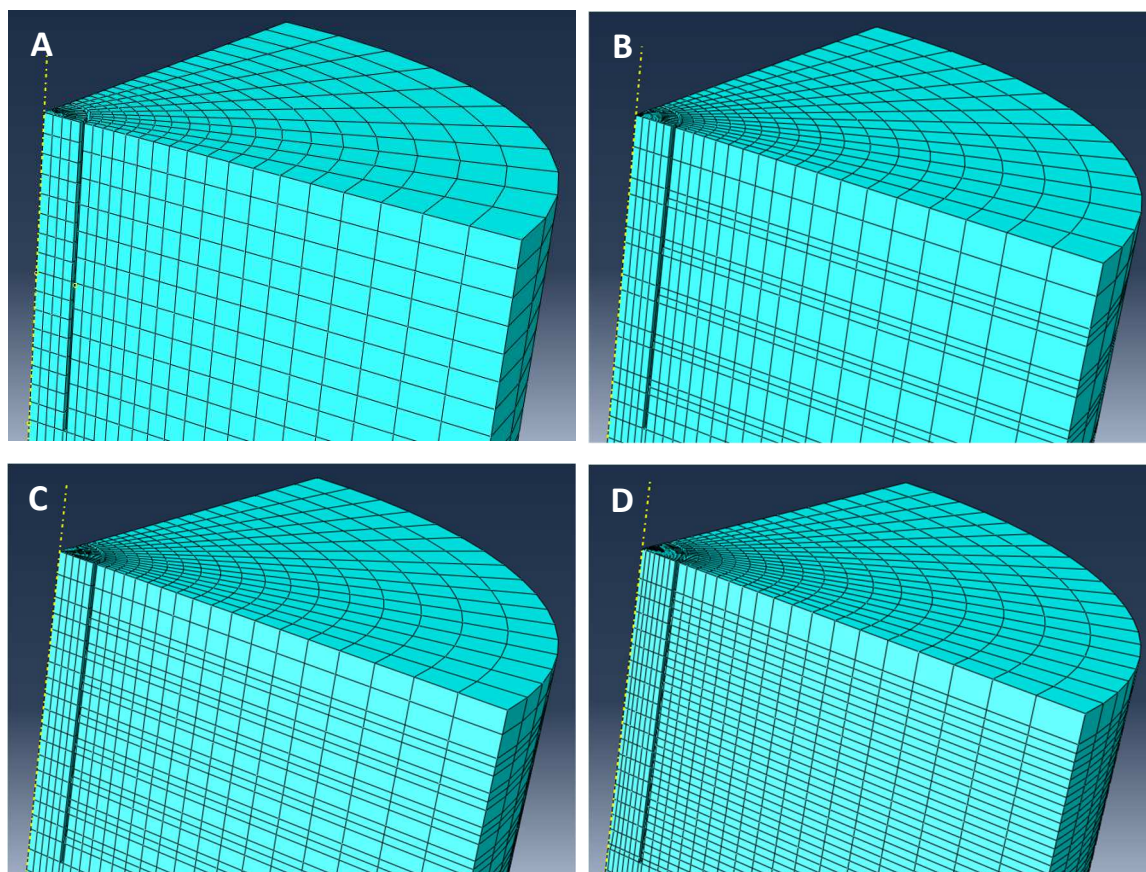


Figura 26: Detalhe da malha de elementos finitos dos modelos tridimensionais dos maciços de solo referentes às estacas de sucção lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

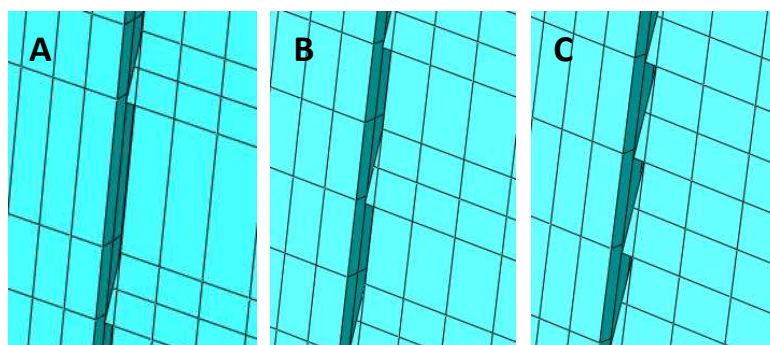


Figura 27: Detalhe da malha de elementos finitos dos maciços de solo, enfatizando as ranhuras aplicadas para os modelos tridimensionais com estacas menos rugosa (A), rugosa (B) e mais rugosa (C)

A Figura 28 mostra detalhes das malhas de elementos finitos geradas para as estacas de sucção com superfícies externas rugosas. Pode-se observar que, quanto maior a quantidade de ranhuras presentes na superfície externa da estaca de sucção, maior o refinamento da malha de elementos finitos referente a espessura dos modelos.

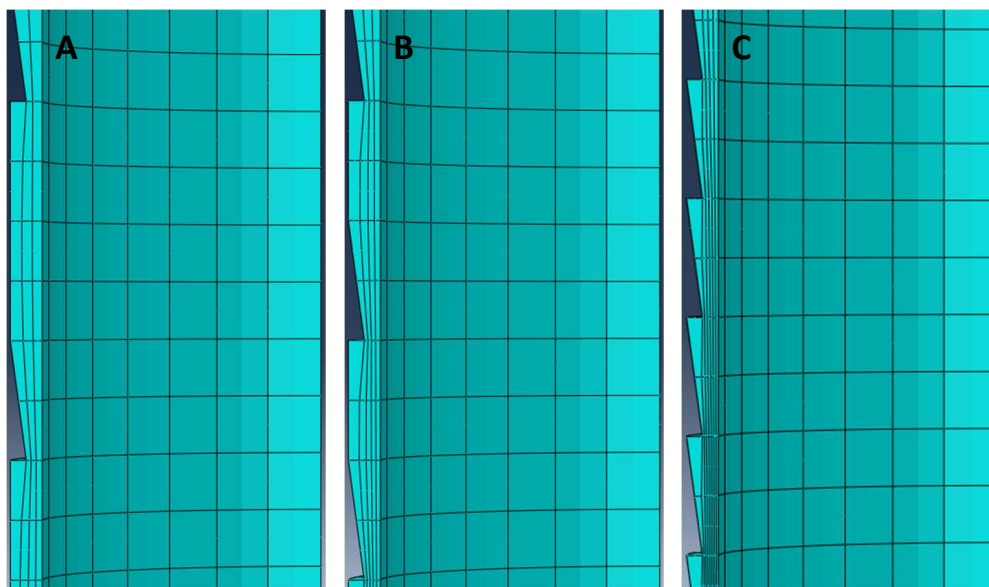


Figura 28: Detalhe da malha de elementos finitos das estacas, enfatizando as ranhuras aplicadas, para os modelos tridimensionais, às estacas menos rugosa (A), rugosa (B) e mais rugosa (C)

Apesar da estaca ser um elemento rígido, ela possui geometria de fuste dentada devido à aplicação das ranhuras e, por isso, adequou-se melhor a elementos finitos hexaédricos quadráticos, que possuem 20 nós. O solo, que sofre deformações durante o arrancamento da estaca, foi atribuído a elementos finitos hexaédricos lineares, tendo menor acurácia quando comparados aos elementos quadráticos por conter 8 nós. Entretanto, o refinamento da malha de elementos finitos do solo foi maior nas regiões com solicitações mais intensas, que ocorrem no entorno das estacas, onde se espera plastificação. A malha vai aumentando, gradativamente, o tamanho de seus elementos no maciço de solo conforme se afasta da estaca de sucção.

A Tabela 8 apresenta o número de elementos finitos para os modelos tridimensionais simulados no Abaqus.

Tabela 8: Quantidade de elementos finitos para os modelos numéricos tridimensionais

Tipo de estacas de sucção	Nº de elementos finitos	
	Maciço de solo	Estacas de sucção
L	7062	360
R1	11025	1032
R2	15470	1140
R3	23580	2264

4.2.1.2. Modelos axissimétricos

Para o solo argiloso, os elementos foram classificados como quadriláteros com interpolação linear e integração reduzida (CAX4R) e, para as estacas de sucção, os elementos foram classificados como triangulares com interpolação quadrática e formulação modificada (CAX6M).

A Figura 29 mostra as malhas de elementos finitos dos modelos de estacas de sucção e a Figura 30, as malhas de elementos finitos dos modelos de solo.

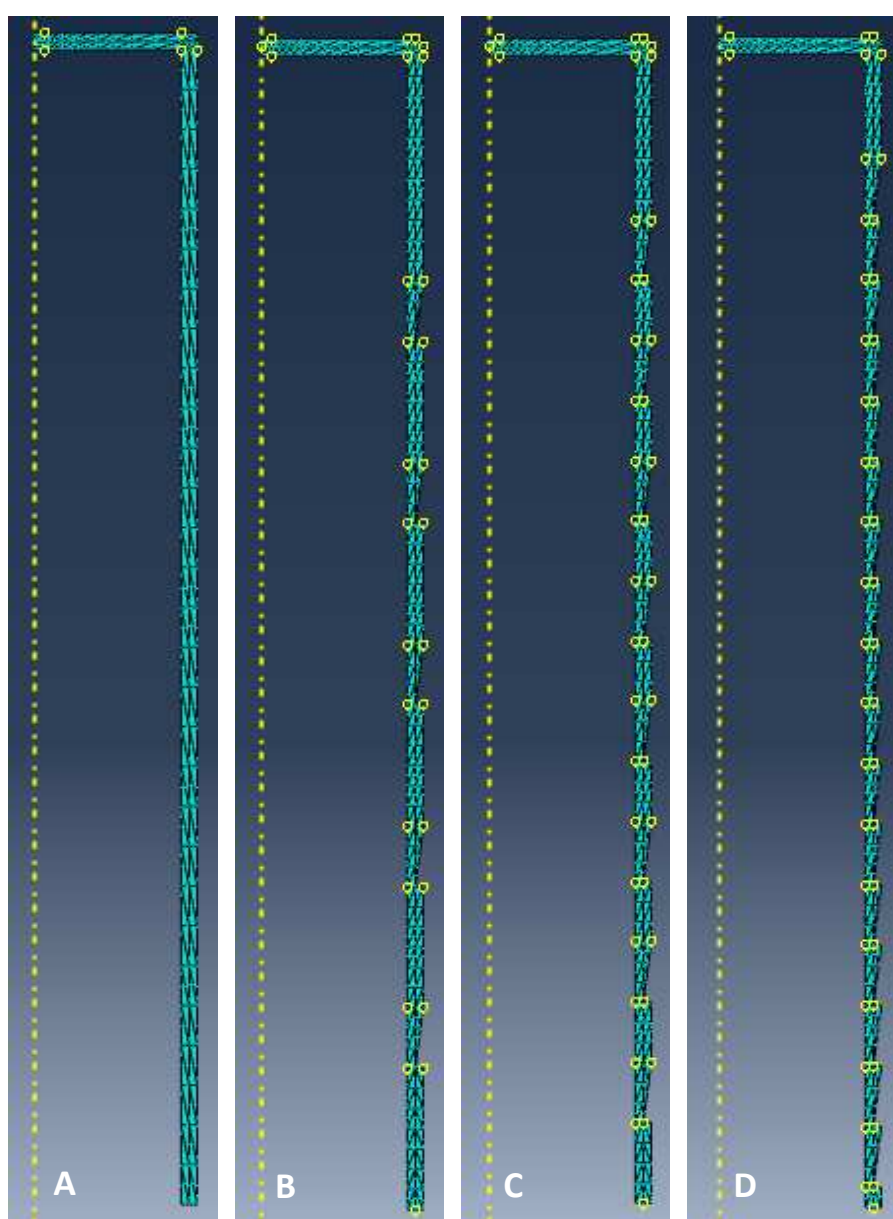


Figura 29: Malha de elementos finitos dos modelos axissimétricos das estacas de sucção lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

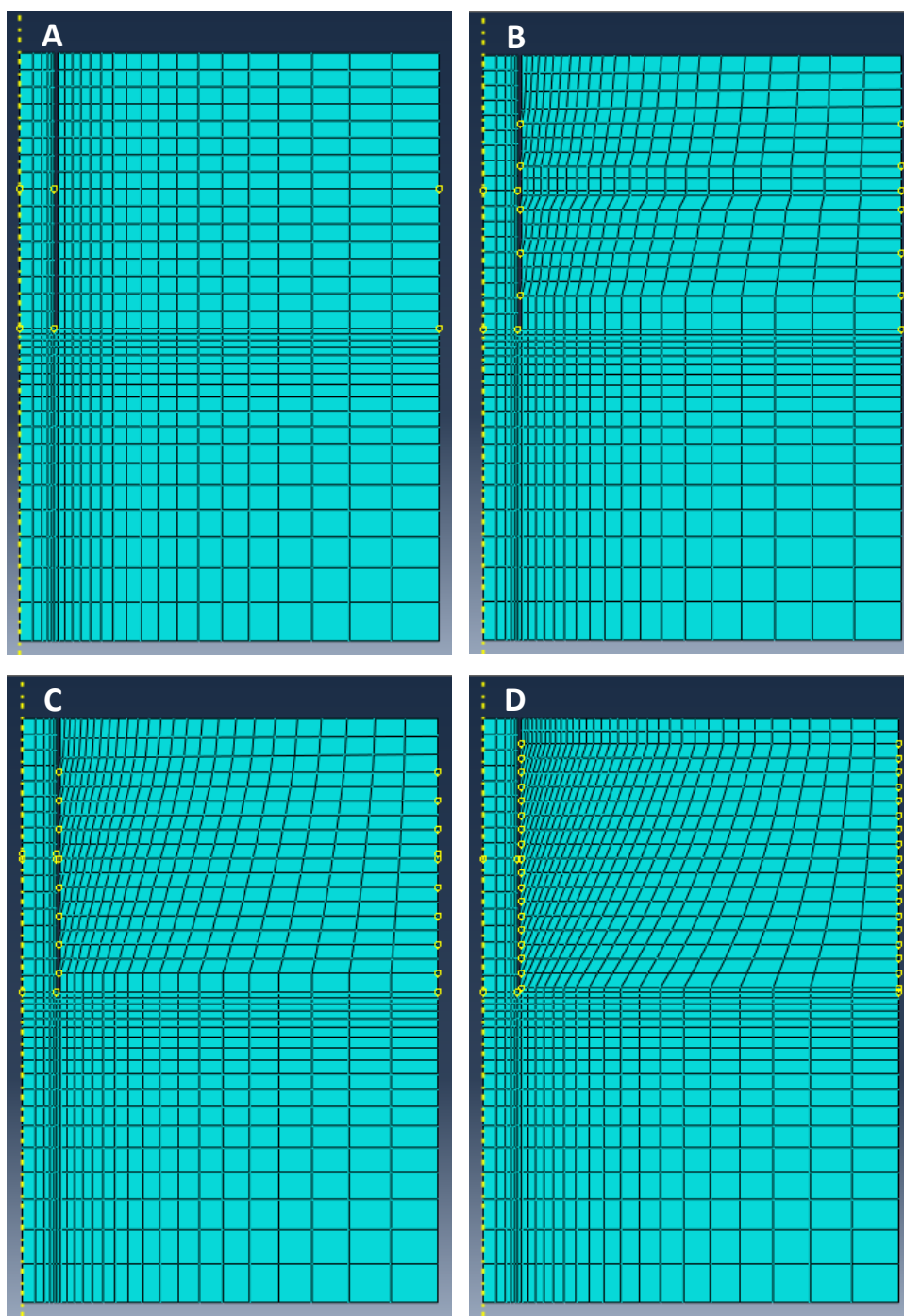


Figura 30: Malha de elementos finitos dos modelos axissimétricos dos maciços de solo referentes às estacas de sucção lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

A Figura 31 apresenta detalhes das malhas geradas para os maciços de solo, em que é possível observar que não foi possível manter o alinhamento vertical dos nós dos elementos finitos. Isso ocorreu porque os elementos quadriláteros se adequaram a geometria dentada definida para o solo presente na interface do fuste da estaca.

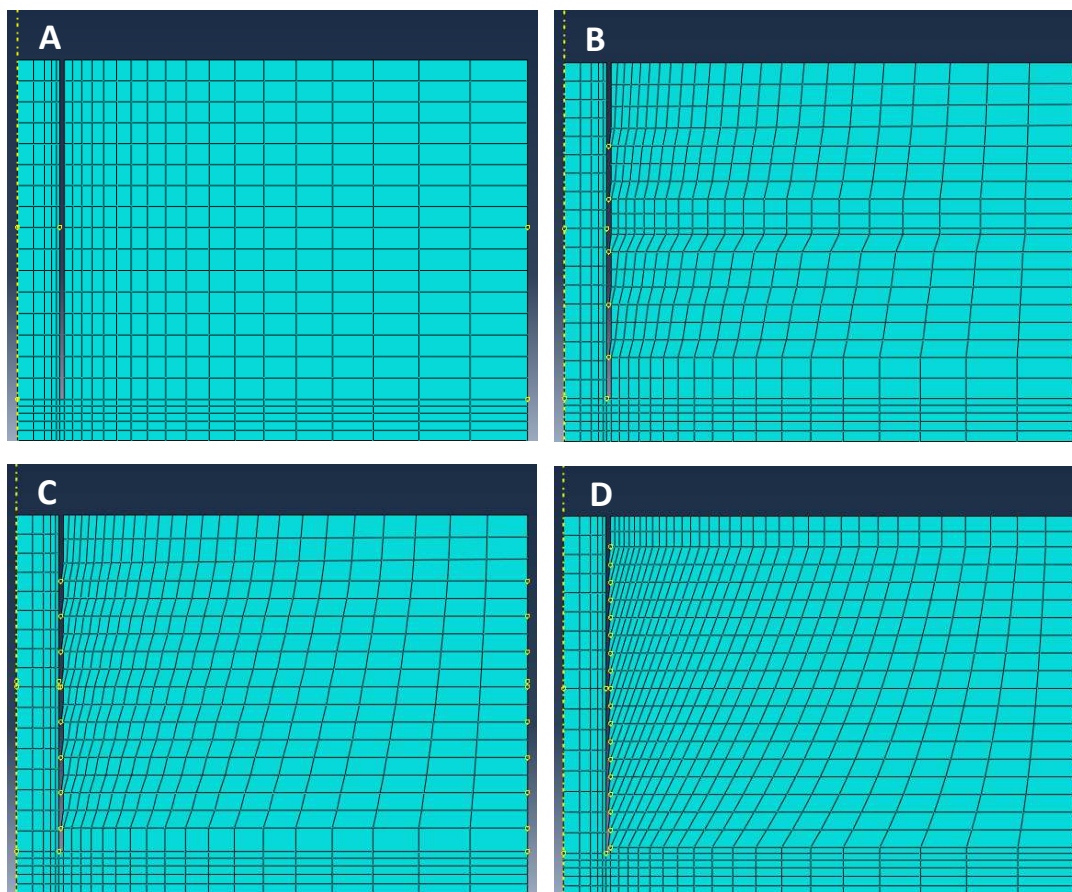


Figura 31: Detalhe da malha de elementos finitos dos maciços de solo referentes às estacas de sucção lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

A Figura 32 mostra detalhes das malhas de elementos finitos geradas para as estacas de sucção.

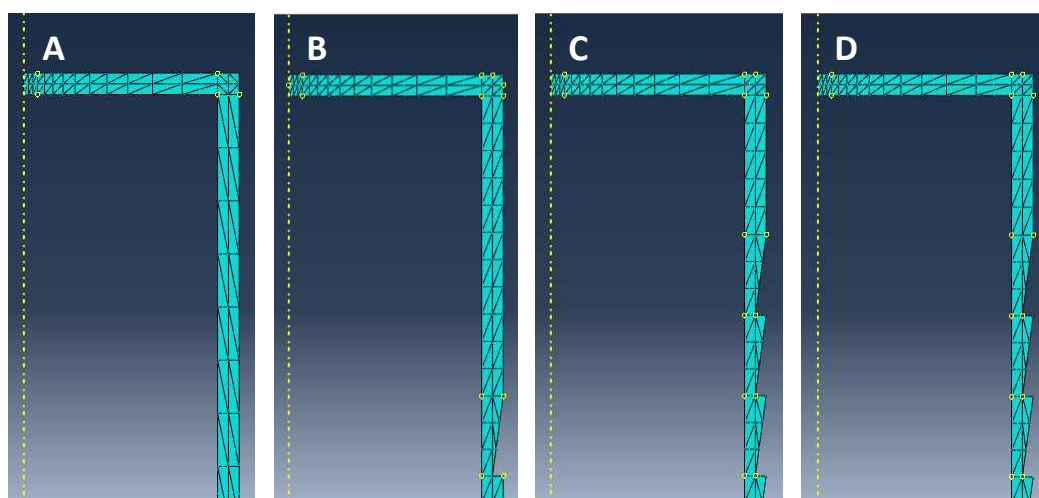


Figura 32: Detalhe da malha de elementos finitos das estacas, enfatizando as ranhuras aplicadas para os modelos axissimétricos com estacas lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

Pode-se observar que, os elementos mais próximos ao eixo da estaca estão mais refinados, a fim de determinar com maior precisão a resistência ao arrancamento vertical dos modelos numéricos.

Assim como nos modelos tridimensionais, para os modelos axissimétricos, os elementos do solo foram definidos com menor acurácia, porém o refinamento dos elementos finitos do solo foi maior nas regiões mais intensas, que ocorrem no entorno das estacas, onde se espera plastificação. Com isso, a malha vai aumentando, gradativamente, o tamanho de seus elementos no maciço de solo, conforme se afasta da estaca de sucção.

A Tabela 9 apresenta o número de elementos finitos para os modelos axissimétricos simulados no Abaqus.

Tabela 9: Quantidade de elementos finitos para os modelos numéricos axissimétricos

Tipo de estacas de sucção	Nº de elementos finitos	
	Maciço de solo	Estacas de sucção
L	800	176
R1	917	280
R2	921	283
R3	1024	291

4.2.2. Etapa contato

A interação entre o solo e a estaca é garantida nos modelos através da etapa contato. Nessa etapa, são definidas as superfícies de contato, que determinam o comportamento dos modelos estudados durante o arrancamento da estaca. De forma geral, quando as superfícies se tocam, elas ativam o contato e inativam quando, por algum motivo, não estão mais encostadas.

O Abaqus possui duas alternativas de discretização de superfícies de contato, sendo elas superfície-superfície e nó-superfície.

O contato do tipo superfície-superfície, escolhido para as simulações desta pesquisa, é definido por meio de um par de superfícies associadas, que são chamadas de mestre e de escrava. A superfície mestre é aquela que governa a aplicação do contato, pois ela dita o comportamento da superfície escrava durante a interação delas

(Abaqus, 2009). A superfície mestre escolhida foi a superfície referente ao maciço de solo, que está em contato com a estaca; e a superfície escrava foi, por conseguinte, a superfície da estaca que se desloca durante o arrancamento.

A discretização de superfícies de contato nó-superfície consiste na interação entre os nós dos elementos das superfícies mestre e escrava. Nessa alternativa, a interação do contato ocorre individualmente, de forma isolada em cada nó da superfície escrava. Problemas relacionados às superfícies de contato nó-superfície podem ocorrer, com maior probabilidade, na superfície escrava, com a penetração da superfície mestre em regiões de refinamento crítico da malha de elementos finitos, o que pode gerar erro nas considerações do comportamento do contato na simulação. Para evitar que isso ocorra, o refinamento da malha na região de contato nodal deve atribuir tamanhos satisfatórios aos elementos, ou seja, os elementos devem ser menores. Nesse caso, a superfície escrava precisará de elementos mais refinados do que a superfície mestre (Abaqus, 2009).

Apesar de a discretização do tipo superfície-superfície possuir menor probabilidade de penetração da superfície mestre na escrava, o maior refinamento ainda deve permanecer na malha escrava, evitando o aumento de tempo computacional (Abaqus, 2009). Logo, a malha de elementos finitos da estaca foi definida com maior refinamento.

Essa etapa foi criada e nela foram identificadas as superfícies das partições que estão em contato, o que estabeleceu perfeita aderência entre o solo e as estacas das simulações realizadas. Para garantir que esse pressuposto não seja violado, foi adotada a propriedade tangencial.

Nos modelos tridimensionais, foi atribuído o método das penalidades para a superfície interna, onde a bucha de solo está em contato com a estaca, e para a superfície externa, onde o maciço de solo está em contato com a estaca. Neste método, foram considerados os coeficientes de atrito da Tabela 2, referente às interfaces de contato dos modelos estudados.

A Figura 33 apresenta as superfícies mestres, enquanto a Figura 34 apresenta as superfícies escravas, ambas consideradas na simulação do modelo numérico tridimensional referente à estaca de sucção lisa.

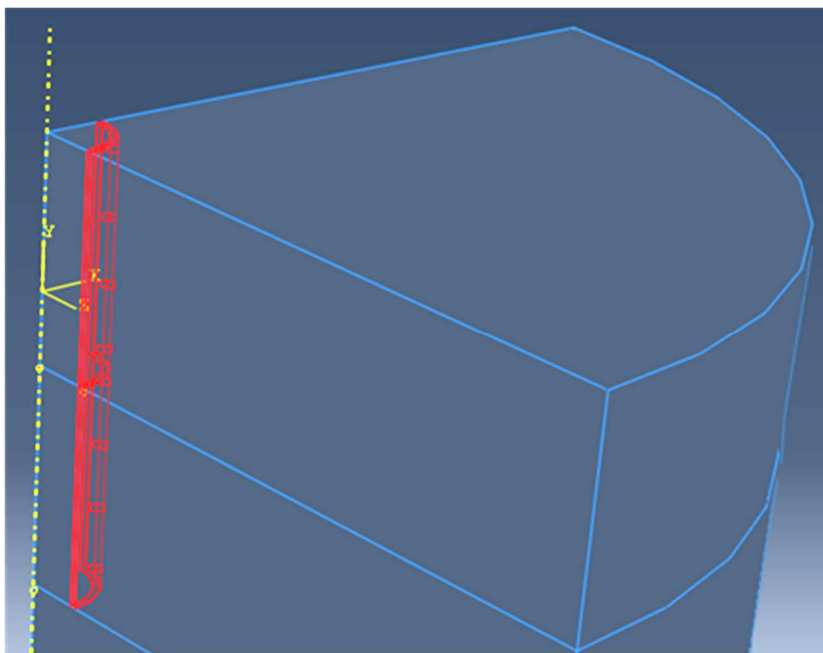


Figura 33: Contato tipo superfície-superfície referente ao maciço de solo, representando a superfície mestre na simulação do modelo tridimensional com estaca de sucção lisa

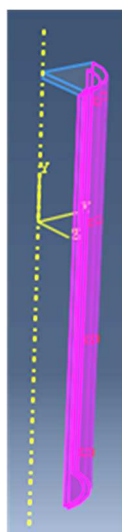


Figura 34: Contato tipo superfície-superfície referente à estaca, representando a superfície escrava na simulação do modelo tridimensional com estaca de sucção lisa

É possível observar, nas figuras, que o contato ocorre tanto na parte interna quanto na parte externa dos modelos. Isso ocorre porque, na parte interna, formou-se o preenchimento interno de solo, que também contribui para a permanência da estaca de sucção no leito marinho.

Tanto para os modelos tridimensionais, quanto para os axissimétricos, a representação das superfícies de contato ocorre de maneira similar, sendo que o contato acompanha as ranhuras atribuídas.

4.2.3. Etapa carregamento

Um aspecto importante para a determinação da capacidade de carga das estacas é o estado de tensões iniciais do solo, ou seja, as tensões atuantes no solo antes da aplicação de qualquer carregamento sobre a estaca. Outro aspecto a se destacar é a aplicação do carregamento que representa a pressão de sucção na parte interna da estaca.

Conforme dito anteriormente, o maciço de solo foi dividido em três partes. Sendo assim, para gerar o estado de tensões iniciais do solo devido à ação gravitacional, a etapa carregamento foi dividida em Carregamento 1, referente à porção de solo 1; Carregamento 2, referente à porção de solo 2 e Carregamento 3, referente à porção de solo 3, nesta ordem. Essa divisão foi realizada para que as tensões fossem atribuídas de forma gradual e uniforme da porção de solo mais profunda para a porção de solo mais superficial, evitando erros de convergência durante as simulações numéricas.

A ação gravitacional foi considerada sobre essas porções de solo através de seu peso específico submerso, que foi calculado a partir da Equação (12):

$$\gamma_{sub} = \gamma_{sat} - \gamma_{am} = 14,69 - 10,25 = 4,44 \text{ KN/m}^3 \quad (12)$$

Sendo,

γ_{sub} = peso específico submerso do solo

γ_{sat} = peso específico saturado do solo

γ_{am} = peso específico da água do mar

Os carregamentos referentes ao peso próprio foram associados às suas respectivas etapas de acordo com a direção (eixo y), com o sentido (para baixo) e com a magnitude. A bucha de solo também foi carregada nessa etapa.

Ao fim desse passo, é obtido o estado de tensões iniciais do solo devido ao seu peso próprio. A Figura 35, mostra uma trajetória traçada do leito marinho ao nó mais profundo dos modelos do maciço de solo, em que ao final das etapas de carregamento, foi obtida, para todos os modelos simulados, uma tensão de 53,13KPa, valor muito próximo ao teórico.

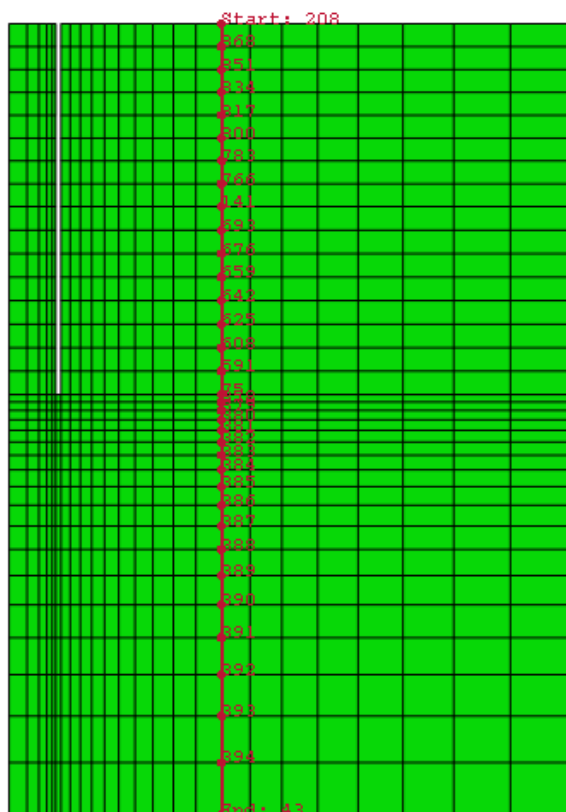


Figura 35: Trajetória do estado de tensões iniciais do solo em relação à profundidade do modelo tridimensional para a estaca de sucção lisa

A Figura 36 apresenta o gráfico das tensões efetivas atuantes no maciço de solo em relação à sua profundidade e a Figura 37, a representação gráfica dos resultados gerados pelo Abaqus.

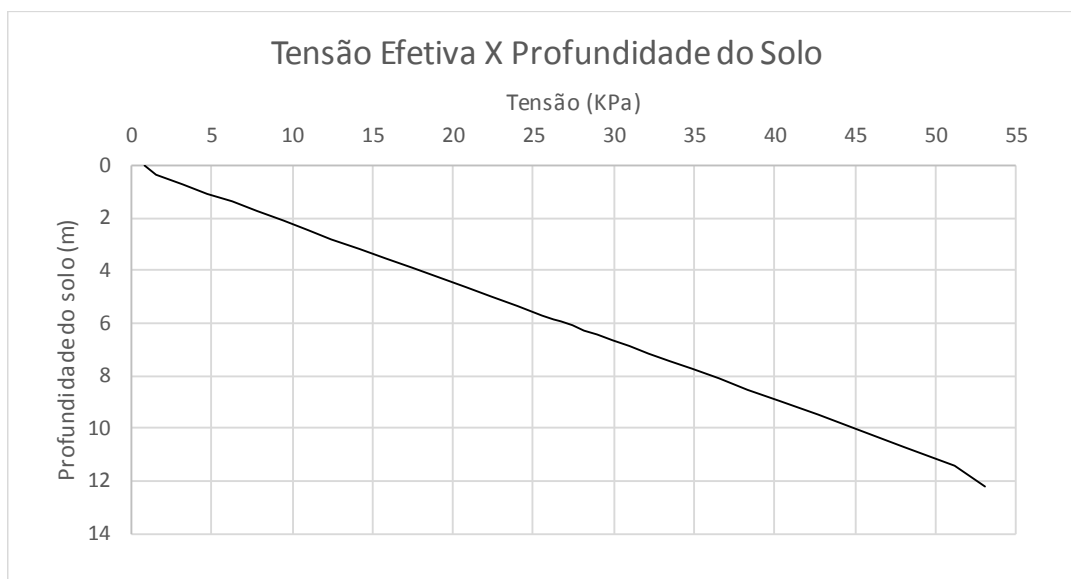


Figura 36: Gráfico Tensão (KPa) x Profundidade do solo (m)

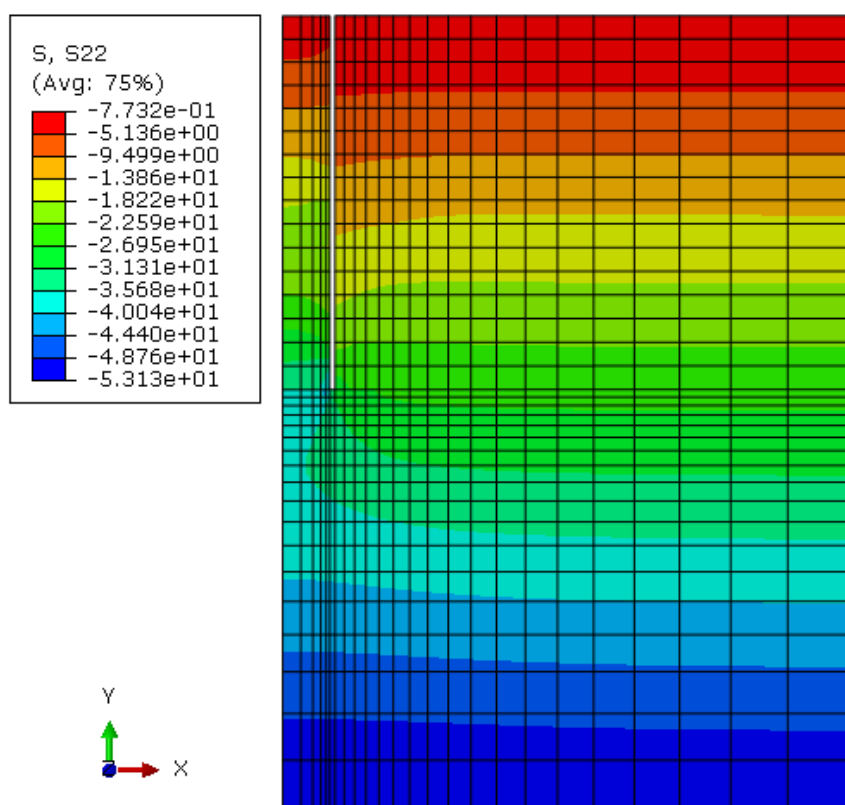


Figura 37: Representação gráfica das tensões efetivas atuantes no maciço de solo

O comportamento referente ao estado de tensões iniciais do maciço de solo é válido para todos os modelos simulados, pois as magnitudes das tensões iniciais são influenciadas pelo peso específico submerso e pela profundidade do solo, que são iguais em todos os tipos de estacas de sucção analisados nessa dissertação.

Nos modelos numéricos tridimensionais, a pressão de sucção foi aplicada nas estacas na etapa Carregamento 3. Somente para a estaca de sucção R3 (mais rugosa), que possui um maior número de elementos e apresentou alguns erros de convergência quando a pressão de sucção foi atribuída ao Carregamento 3, foi criada uma etapa Carregamento 4, exclusivamente para a aplicação da pressão de sucção.

Na pesquisa realizada por Melo (2015), foi exercida sobre a estaca uma pressão de sucção com magnitude de 100KPa, durante a cravação da mesma a 1g. Porém, não foi feito o monitoramento da variação dessa pressão no interior da estaca durante o ensaio de arrancamento. Devido a isso, não se pode afirmar como essa pressão de sucção aplicada irá proceder nos modelos numéricos em questão. Logo, no presente estudo, a magnitude da pressão de sucção a ser considerada foi estimada

para os modelos tridimensionais após a obtenção dos resultados das simulações numéricas sem a aplicação da mesma, o que será detalhado no próximo capítulo.

A Figura 38 apresenta a superfície de aplicação da pressão de sucção para o modelo 3D da estaca lisa. Essa superfície será a mesma para os outros tipos de modelos tridimensionais de estaca de sucção.

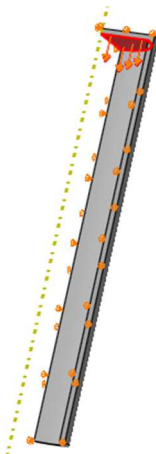


Figura 38: Superfície de aplicação de sucção para o modelo 3D da estaca lisa

Para os modelos numéricos axissimétricos, a pressão de sucção foi atribuída aos valores do peso específico submerso. Visto que, após a aplicação da pressão de sucção durante a cravação das estacas a bucha de solo ficará mais densa. Portanto, a representação do efeito da sucção foi considerada com um peso específico submerso maior no preenchimento interno da estaca. Sendo assim, não houve a necessidade de aplicar sucção na parte interna da tampa das estacas de sucção.

4.2.4. Etapa arrancamento

Condições de contorno foram atribuídas ao problema para a execução da simulação numérica. Elas limitaram os deslocamentos dos sólidos analisados em relação aos eixos cartesianos relevantes em cada limite exterior dos modelos, nas laterais e no fundo.

Nos modelos tridimensionais, as simulações de arrancamento das estacas de sucção do leito marinho foram realizadas por deslocamento controlado, com aplicação de deslocamento vertical pré-determinado, e por tensão controlada, com aplicação de tensão vertical pré-determinada.

O ponto de aplicação da força de arrancamento na estaca, tanto para o deslocamento controlado quanto para a tensão controlada, foi colocado em um nó rígido pertencente ao eixo da estaca em sua íntegra, ou seja, no centro da superfície superior fechada da estaca de sucção (Figura 39). A direção da força está no eixo y e o sentido está para cima.

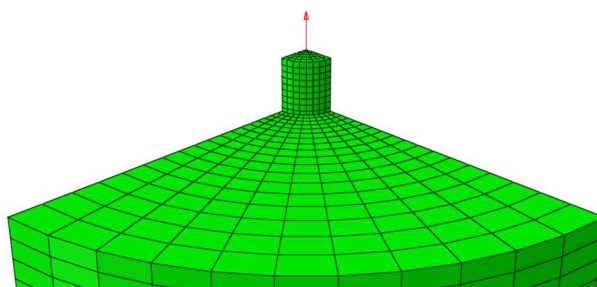


Figura 39: Força de arrancamento em seu ponto de aplicação, para os modelos tridimensionais, com estaca de sucção saindo do leito marinho

Nos modelos axissimétricos, as simulações numéricas de arrancamento das estacas foram realizadas por deslocamento controlado, com aplicação de deslocamento vertical pré-determinado. Porém, nestes modelos o deslocamento foi aplicado em uma pequena superfície próxima ao eixo da estaca, conforme mostrado na Figura 40.

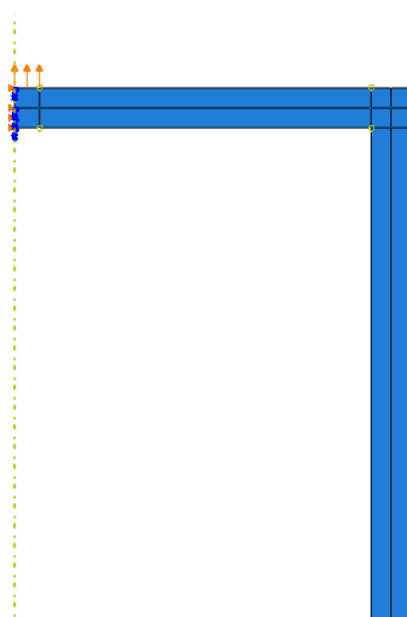


Figura 40: Superfície de arrancamento para o modelo axissimétrico

5. Análise de resultados

O presente capítulo apresenta as análises dos resultados dos modelos tridimensionais obtidos por meio das simulações numéricas descritas no capítulo anterior. A partir desses resultados, foi feita uma comparação das forças de arrancamento dos modelos numéricos com as obtidas por Melo (2015) em seus ensaios com modelos físicos reduzidos centrifugados. Além disso, apresenta também a análise do comportamento do solo para os modelos axissimétricos, em que foram avaliados campos de deslocamentos, de tensão cisalhante, de tensão normal e de deformação plástica em diversas trajetórias traçadas no maciço de solo. Ainda neste capítulo, foi avaliada a influência da geometria das estacas e do atrito na interface solo-estaca.

Os modelos experimentais possuem três análises para estacas de sucção lisas e uma análise para cada tipo de estaca de sucção com ranhura atribuída. As calibrações dos modelos numéricos para determinar uma metodologia a ser seguida nas simulações desta pesquisa foram realizadas com as estacas de sucção lisas, que possuem mais curvas experimentais para gerar uma melhor aproximação do comportamento dos modelos, reduzindo incertezas.

A partir dos gráficos gerados no presente trabalho, foi possível examinar os dados das simulações numéricas para a obtenção de conclusões sobre os casos estudados.

5.1. Modelos tridimensionais

5.1.1. Simulações numéricas com deslocamento controlado

Conforme já exposto, as simulações de arrancamento das estacas de sucção por deslocamento controlado foram realizadas com aplicação de um deslocamento vertical pré-determinado. Os valores desses deslocamentos foram aplicados na direção do eixo y, com sentido para cima e magnitudes variáveis, a fim de avaliar a influência da altura do arrancamento da estaca no comportamento das mesmas.

Para gerar os gráficos de força de arrancamento por deslocamento, foram coletados os dados das iterações da etapa arrancamento no Abaqus, em que os valores foram avaliados na direção do eixo y, com o intuito de estudar a resistência ao

arrancamento vertical. Nesses modelos, as magnitudes das forças obtidas foram multiplicadas por quatro, para obtenção dos valores referentes à estaca na íntegra.

5.1.1.1. Estaca de sucção lisa

As primeiras simulações dos modelos numéricos definidos para esta pesquisa foram realizadas com o intuito de determinar a altura de cravação das estacas de sucção no leito marinho. É esperado que ocorra redução na força de arrancamento das estacas com percentual de cravação menor no maciço de solo, pois esta força está diretamente relacionada com o atrito lateral atuante nas estacas de sucção.

Os percentuais de cravação considerados foram 100%, em que somente a espessura da tampa da estaca não penetrou o leito marinho; 96,55%, em que a estaca não penetrou o leito marinho em 0,20m além da espessura de sua tampa; 93,10%, em 0,40m além da espessura de sua tampa e 89,65%, em 0,60m além da espessura de sua tampa. Para cada percentual de cravação, foi realizada uma simulação numérica com deslocamento controlado de 0,50m.

A Figura 45 mostra o gráfico força de arrancamento por deslocamento para os percentuais de cravação estabelecidos.

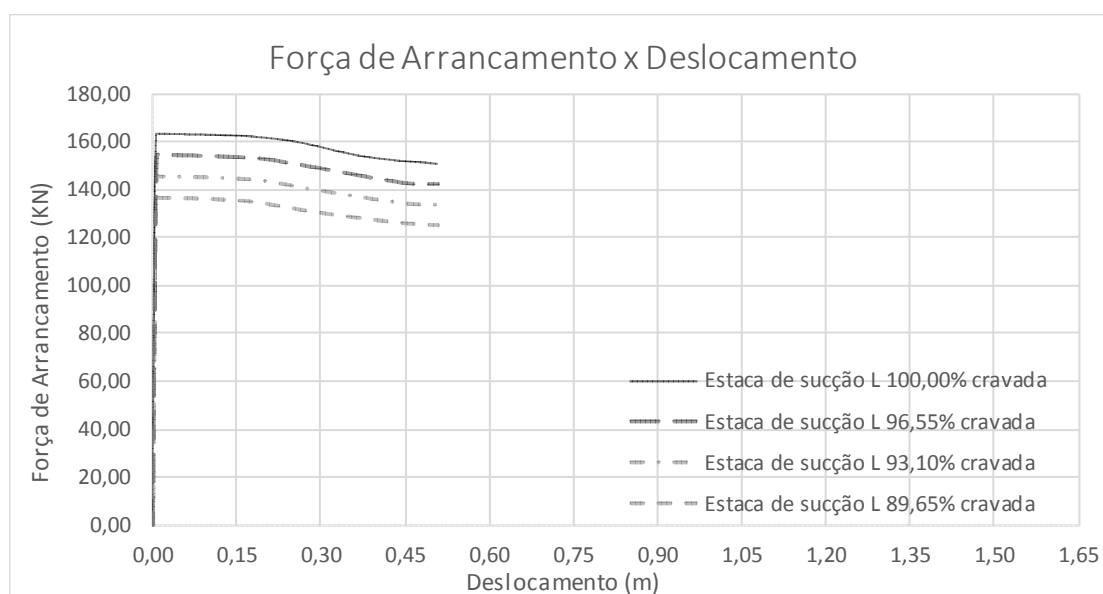


Figura 41: Gráfico força de arrancamento por deslocamento de estacas de sucção lisas, sem aplicação de sucção, com variação de alturas de cravação no maciço de solo

A Tabela 10 mostra uma comparação dos resultados obtidos para as estacas de sucção de acordo com seu percentual de cravação.

Tabela 10: Comportamento da força de arrancamento das estacas de sucção lisas de acordo com seu percentual de cravação

Percentual de cravação (%)	FA máxima (KN)	FA máxima (%)	δ inicial (mm)
100,00%	163,76	100,00%	0,50
96,55%	154,40	94,28%	0,50
93,10%	145,24	88,69%	0,50
89,65%	136,36	83,27%	0,50

Pode-se notar, com as informações obtidas, que a diferença entre as forças de arrancamento verticais para as diferentes profundidades de cravação foi pouco representativa, porém, como esperado, a estaca 100% cravada obteve o maior valor, já que possui uma área maior de parede externa em contato com o solo, influenciando, assim, na parcela de atrito lateral. Além disso, também pode-se notar que não ocorreram variações nos deslocamentos iniciais durante o arrancamento das estacas e que as forças de arrancamento máximas sofreram pequena redução com a diminuição do percentual de cravação das estacas de sucção avaliadas.

O trabalho desenvolvido por Melo (2015) não considerou variação de profundidade de cravação e, por isso, entende-se que as estacas foram cravadas por sucção com um percentual próximo a 100%. Sendo assim, foi considerado um percentual de cravação de 100% para as estacas de sucção avaliadas neste estudo.

Em seguida, foi avaliada a influência das alturas de arrancamento das estacas. Na Figura 42, é apresentado o gráfico força de arrancamento por deslocamento com os resultados obtidos para o modelo de estaca de sucção lisa, sem aplicação da pressão de sucção e com alturas de arrancamento de 0,50m, 1,00m e 1,60m. É possível observar neste gráfico que, independente do deslocamento pré-estabelecido para o arrancamento dessas estacas, a força de arrancamento máxima foi de 163,73KN e, portanto, para as seguintes análises foram consideradas apenas o deslocamento de 1,60m, que é próximo aos deslocamentos máximos obtidos nos ensaios experimentais, equivalentes a 45mm para os modelos reduzidos ou a 1,80m para os protótipos.

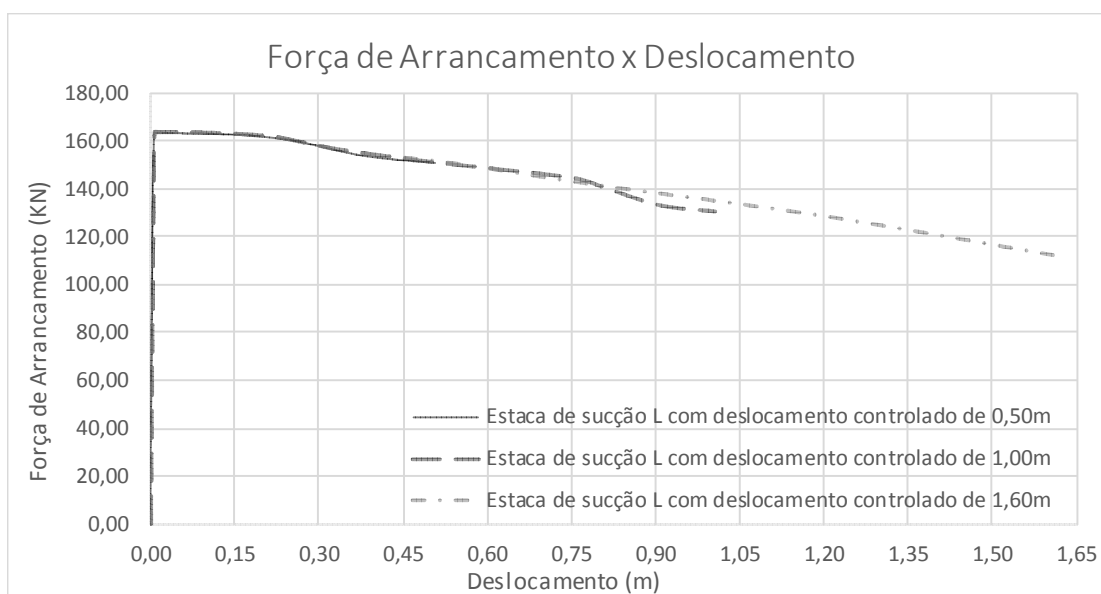


Figura 42: Gráfico força de arrancamento por deslocamento de estacas de sucção lisas sem aplicação de sucção e deslocamento controlado

O valor de força de arrancamento máxima obtida a partir dos modelos numéricos juntamente com os valores encontrados nos ensaios experimentais de Melo (2015) possibilitaram a determinação da pressão de sucção a ser aplicada. A Tabela 11 mostra as magnitudes das forças de arrancamento máximas encontradas nos ensaios experimentais para os protótipos.

Tabela 11: Forças de arrancamento máximas encontradas para os protótipos de Melo (2015)

Estacas dos ensaios experimentais				
L Fa (KN)	R1 Fa (KN)	R2 Fa (KN)	R3 Fa (KN)	Acréscimo de força de arrancamento (%)
292,00	311,04	-	-	6,52
265,44	-	296,96	-	11,87
283,26	-	-	347,36	22,63

A partir da tabela apresentada, é possível observar que os valores obtidos para as forças de arrancamento máximas do ensaio realizado, utilizando uma estaca de sucção lisa e uma rugosa, foram divergentes do esperado. A estaca R2 deveria ter uma força com magnitude maior do que a obtida para a estaca R1 e menor do que a obtida para a estaca R3. Ademais, observa-se, ainda, que a força de arrancamento máxima da estaca L aponta um valor reduzido em relação aos outros ensaios com a mesma

classificação de estaca. Devido a isso, para determinar a pressão de sucção dos modelos, só foram considerados os valores das estacas de sucção L ensaiadas com as estacas R1 e R3. Uma média da diferença entre os valores de força de arrancamento dos modelos experimentais e dos modelos numéricos (ΔF_s) foi feita através da Equação 13. Esse parâmetro foi determinado com os dados apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Diferença de forças de arrancamento máximas encontradas para os modelos experimentais de Melo (2015) e para os modelos numéricos

Estacas de sucção lisas		
Ensaio experimental Fa (KN)	Ensaio numérico Fa (KN)	Diferença (ΔF)
292,00	163,73	128,27
283,26		119,53

$$\Delta F_s = \frac{\Delta F_1 + \Delta F_2}{2} = \frac{128,27 + 119,53}{2} = 123,90 \text{ KN} \quad (13)$$

A Equação (14) mostra como foi determinada a pressão de sucção aplicada em todas as simulações numéricas dos modelos tridimensionais desta pesquisa.

$$\sigma_s = \frac{\Delta F_s}{A_{si}} = \frac{123,90}{1,63} = 76,00 \text{ KPa} \quad (14)$$

Sendo,

σ_s = pressão de sucção

A_{si} = área interna da tampa da estaca

O gráfico da força de arrancamento por deslocamento com aplicação da pressão de sucção para a estaca L é apresentado na Figura 43. Por meio de sua análise, observou-se que o valor da força de arrancamento máxima obtido para o modelo numérico analisado, 287,52KN, encontra-se entre os valores máximos das forças de arrancamento obtidos para os protótipos de Melo (2015), 292,00KN e 283,26KN.

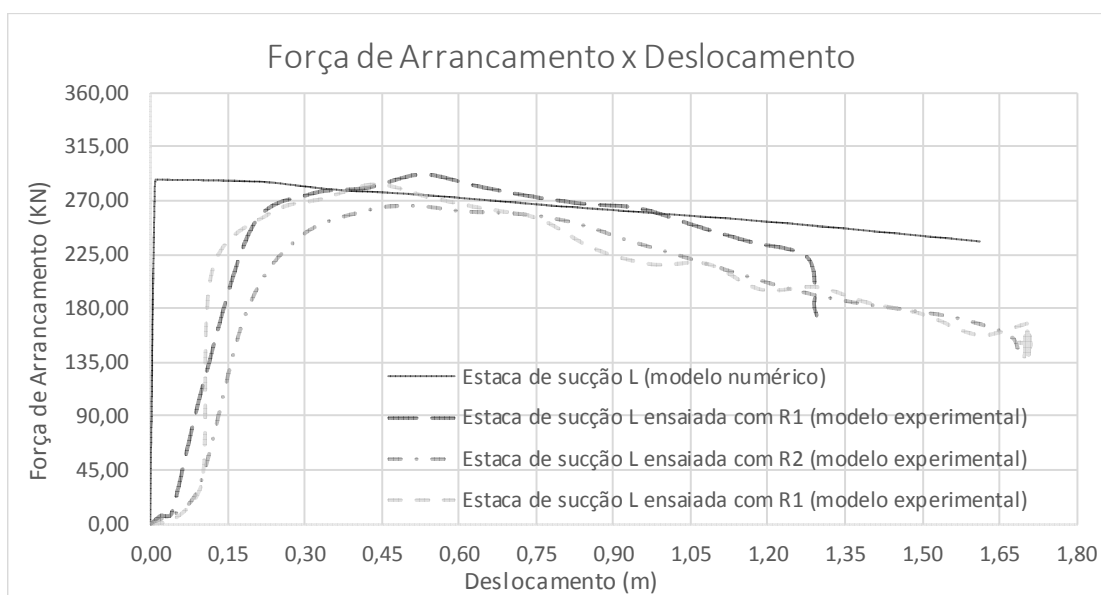


Figura 43: Gráfico força de arrancamento por deslocamento de estacas lisas com aplicação de sucção e deslocamento controlado

Esperava-se que o valor da pressão de sucção calculado para o arrancamento das estacas de sucção nas simulações numéricas fosse próximo do valor da pressão aplicada na cravação da estaca do ensaio experimental. Porém, a pressão de sucção aplicada provavelmente sofreu dissipação devido ao tempo de sua aplicação e de execução do ensaio. Com isso, pode-se afirmar que o valor da pressão de sucção equivalente encontrado condiz com os dados utilizados para a calibração do modelo numérico.

Outro fator importante, que pode ser observado no gráfico acima, é a diferença do comportamento do deslocamento ao longo do arrancamento da estaca do modelo numérico para os modelos experimentais. Segundo Palmer *et al.* (2003), em modelos centrifugados, é possível observar uma discrepância nos valores dos deslocamentos obtidos em relação a modelos de escala real, que podem ser até dez vezes menores do que os valores obtidos em protótipos.

5.1.1.2. Estaca de sucção menos rugosa

A Figura 44 mostra o gráfico da força de arrancamento por deslocamento com aplicação da pressão de sucção para a estaca R1. O valor da força de arrancamento máxima encontrado para o modelo numérico foi de 292,40kN.

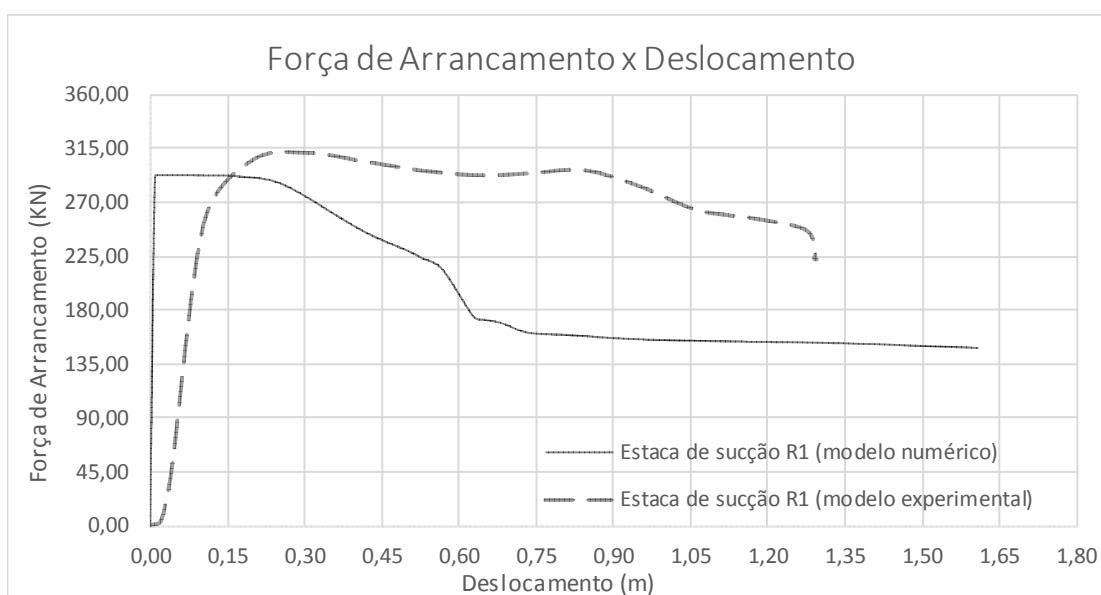


Figura 44: Gráfico força de arrancamento por deslocamento de estacas menos rugosas com aplicação de sucção e deslocamento controlado

5.1.1.3. Estaca de sucção rugosa

A Figura 45 mostra o gráfico da força de arrancamento por deslocamento com aplicação da pressão de sucção para a estaca R2, em que o valor obtido para a força de arrancamento máxima do modelo numérico foi 302,08kN.

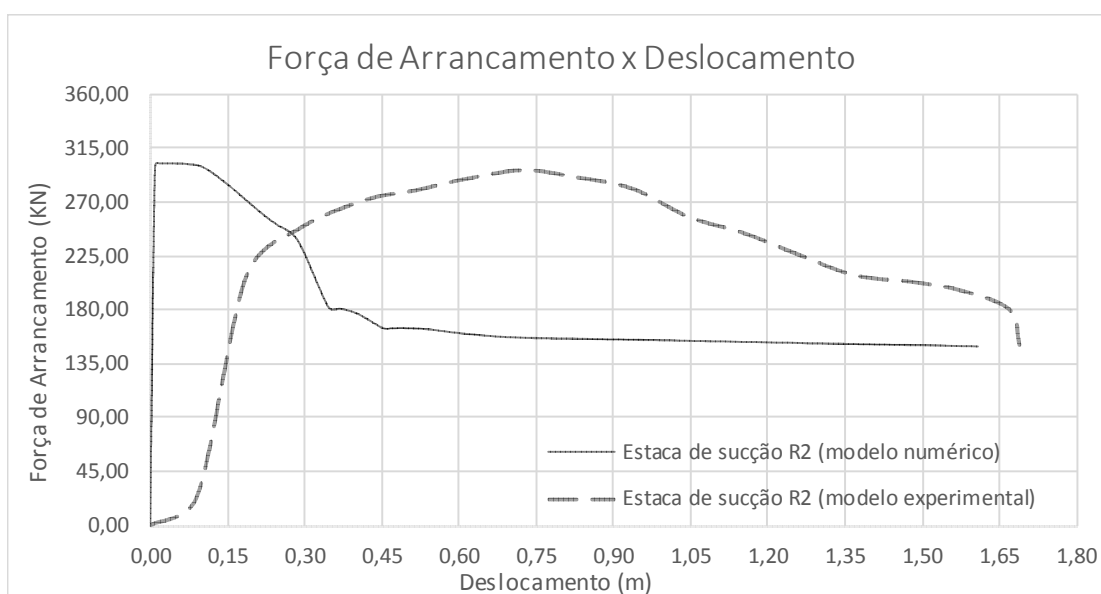


Figura 45: Gráfico força de arrancamento por deslocamento de estacas rugosas com aplicação de sucção e deslocamento controlado

5.1.1.4. Estaca de sucção mais rugosa

Conforme previsto, a estaca de sucção mais rugosa obteve os maiores valores de força de arrancamento entre os modelos numéricos simulados, confirmando o pressuposto de obtenção de maior capacidade de carga ao arrancamento vertical nas análises. O gráfico da força de arrancamento por deslocamento com aplicação da pressão de sucção para a estaca R3 é apresentado na Figura 46. Nele, observa-se que o valor da força de arrancamento máxima foi 334,52KN.

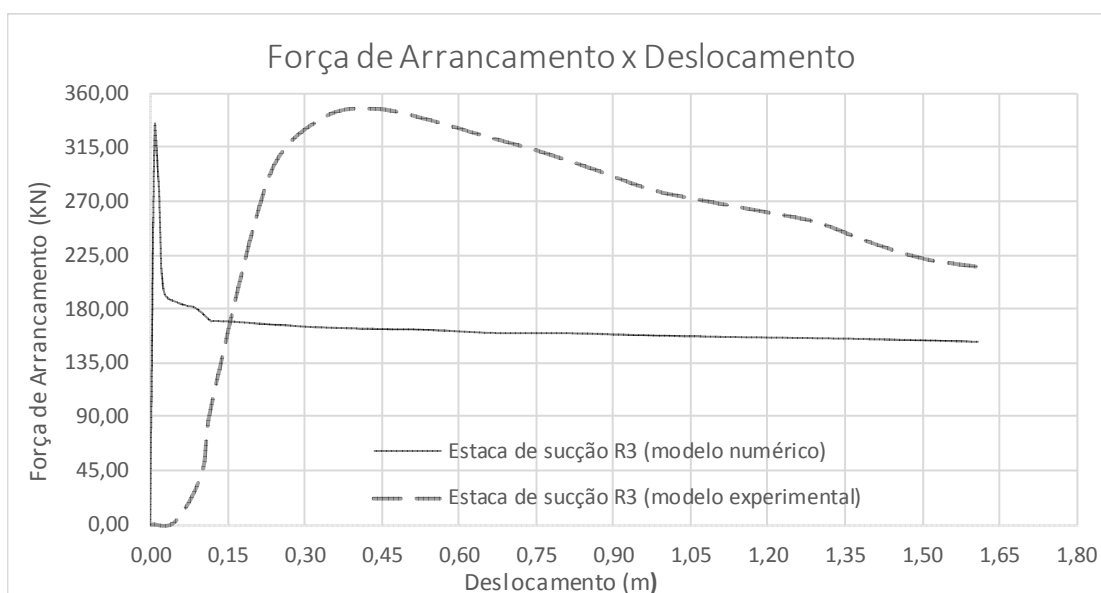


Figura 46: Gráfico força de arrancamento por deslocamento de estacas mais rugosas com aplicação de sucção e deslocamento controlado

5.1.1.5. Análise de resultados da resistência ao arrancamento vertical

A Tabela 13 apresenta a diferença entre as forças de arrancamento máximas encontradas nos ensaios experimentais e nas análises numéricas. É importante ressaltar que as diferenças entre os valores encontrados nos ensaios experimentais e nas simulações numéricas foram pouco representativas.

Tabela 13: Comparativo de forças de arrancamento máximas para estacas de sucção entre os ensaios experimentais (Melo, 2015) e as simulações numéricas tridimensionais

Tipo de estaca de sucção	Ensaio experimental (FA, KN)	Simulações numéricas (FA, KN)	Diferença (FA, %)
L*	287,64	287,52	0,04
R1	311,04	292,40	6,37
R2	296,96	302,08	-1,69
R3	347,36	334,52	3,84

* Para o ensaio experimental, o valor para a estaca de sucção lisa considerado nesta tabela foi a média do ensaio realizado com a estaca menos rugosa (292,00KN) e mais rugosa (283,28KN), visto que os valores do ensaio com a estaca rugosa foram divergentes do esperado.

Com a atribuição de geometria de fuste às paredes externas dos modelos numéricos de estaca de sucção, nota-se que ocorre o aumento da força de arrancamento máxima, conforme o aumento da quantidade de ranhuras atribuídas a elas. Por isso, a estaca de sucção R3 obteve os maiores valores de força de arrancamento.

São apresentados, nas Figuras 47 e 48, gráficos da força de arrancamento por deslocamento com aplicação da pressão de sucção para todos os modelos numéricos estudados.

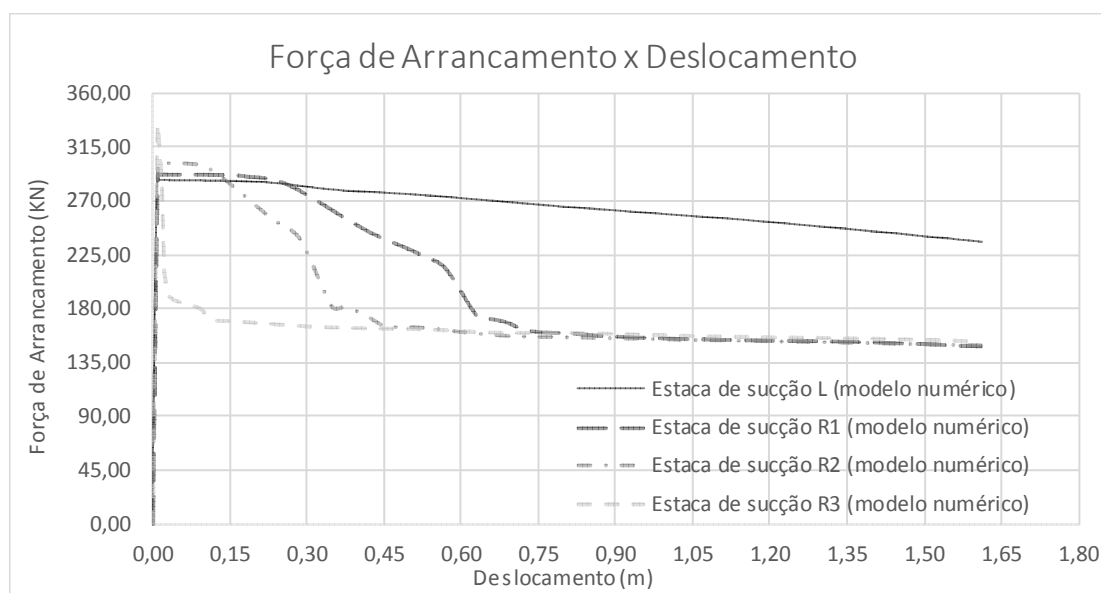


Figura 47: Gráfico força de arrancamento por deslocamento dos modelos numéricos tridimensionais com aplicação de sucção e deslocamento controlado

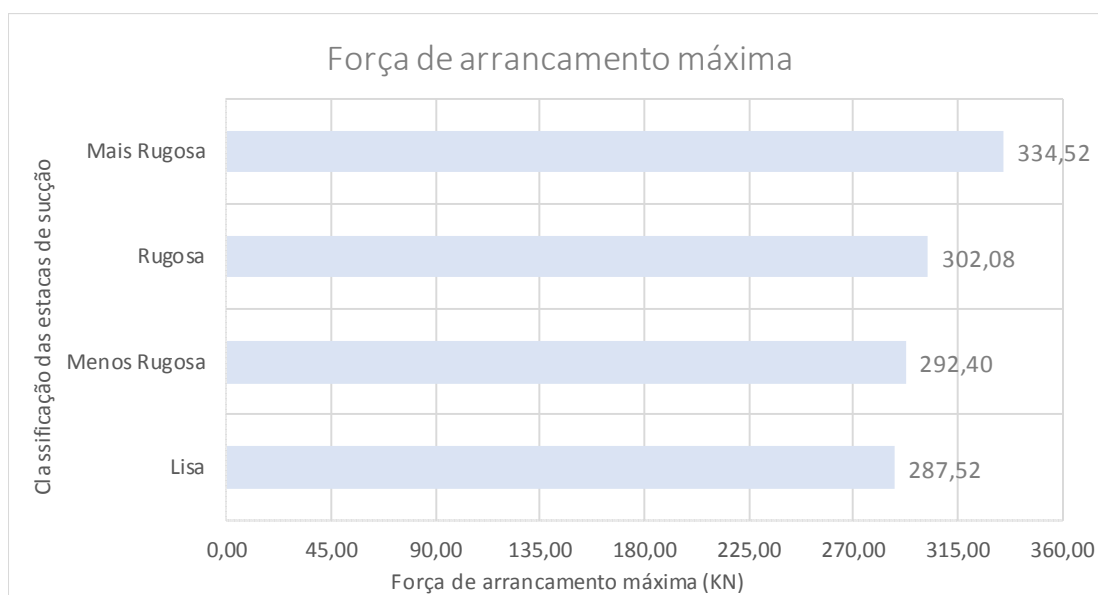


Figura 48: Gráfico força de arrancamento máxima por deslocamento dos modelos numéricos tridimensionais com aplicação de sucção e deslocamento controlado

A partir das análises dos resultados obtidas através das simulações numéricas, expressos nos gráficos, podemos concluir que a aplicação de ranhuras nas paredes externas das estacas, além de aumentar a capacidade de carga ao arrancamento vertical das estacas de sucção, diminui os deslocamentos iniciais desse tipo de fundação.

Os resultados das simulações numéricas analisados também podem ser apresentados por meio de parâmetro adimensional. Esse parâmetro foi calculado a partir da Equação (15):

$$\rho = \frac{F_{A \text{ rugosidade}}}{F_{A, \text{máx lisa}}} \quad (15)$$

Sendo,

ρ = parâmetro adimensional

$F_{A \text{ rugosidade}}$ = força de arrancamento da estaca com rugosidade aplicada

$F_{A, \text{máx lisa}}$ = força de arrancamento máxima da estaca lisa

Essa equação pode ser aplicada para os resultados dos modelos numéricos e experimentais. Nos ensaios experimentais, cada tipo de estaca com geometria de fuste rugosa foi atribuída ao parâmetro adimensional com os dados da estaca lisa ensaiada

no mesmo modelo. Para a obtenção desse parâmetro por meio dos modelos numéricos, os dados referentes à estaca lisa decorreram de uma única simulação.

A partir dos cálculos, foram gerados os gráficos apresentados nas Figuras 49, 50 e 51, que mostram os resultados obtidos para o parâmetro adimensional, de acordo com a classificação das estacas.

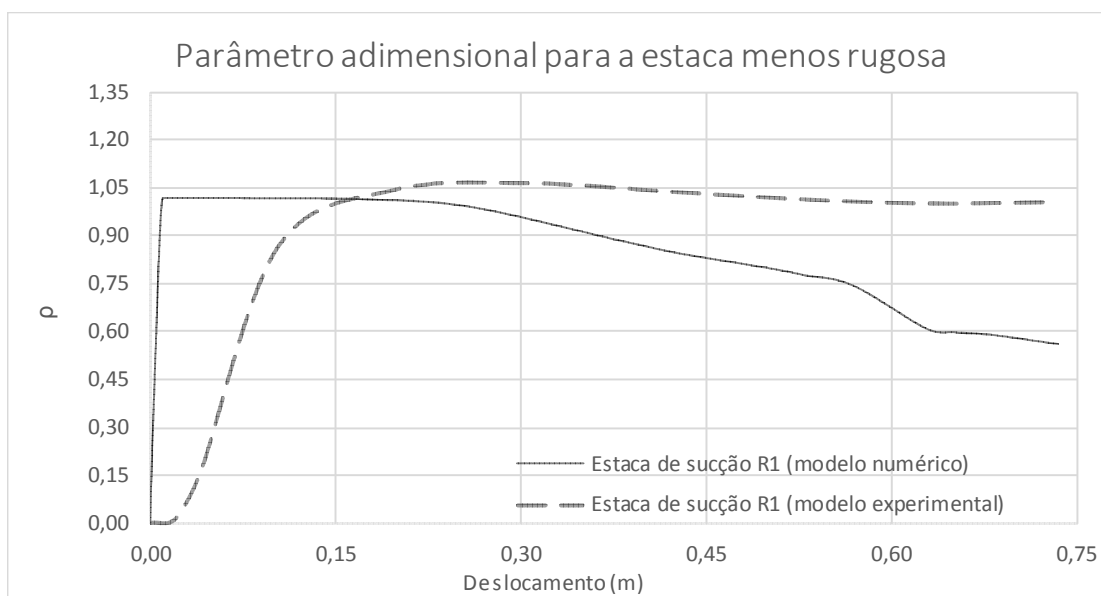


Figura 49: Gráfico do comportamento do parâmetro adimensional para as estacas menos rugosas dos modelos numérico e experimental

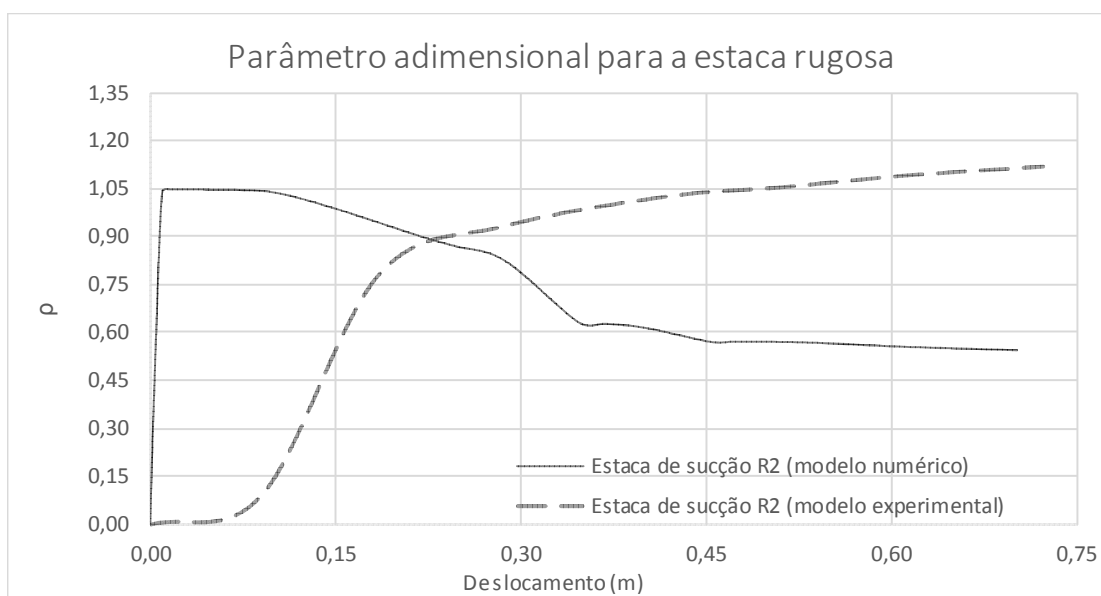


Figura 50: Gráfico do comportamento do parâmetro adimensional para as estacas rugosas dos modelos numérico e experimental

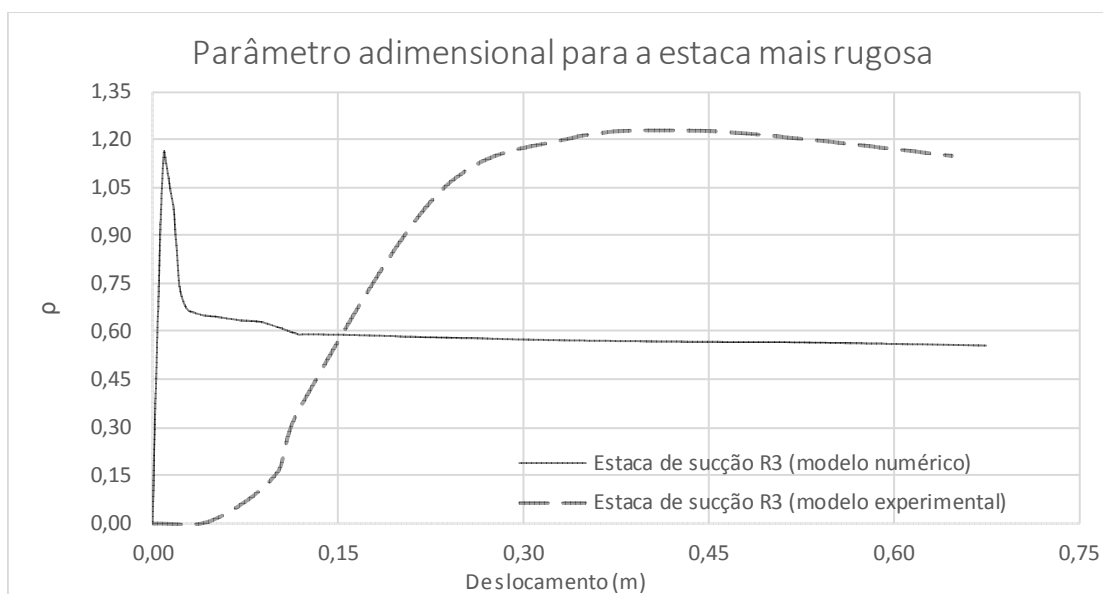


Figura 51: Gráfico do comportamento do parâmetro adimensional para as estacas mais rugosas dos modelos numérico e experimental

Pode-se notar que, para as simulações numéricas, o módulo de deformabilidade utilizado mostrou-se mais rígido, pois o parâmetro adimensional obteve, em seu ponto máximo, deslocamentos menores do que nos ensaios experimentais. Ademais, os valores máximos dos modelos numéricos foram menores.

A Tabela 14 apresenta os percentuais de aumento de resistência ao arrancamento vertical das estacas com ranhuras atribuídas em relação à estaca lisa.

Tabela 14: Percentual de aumento de resistência ao arrancamento vertical para os modelos numéricos tridimensionais estudados

Tipo de estaca de sucção	Aumento de resistência (FA, %)
R1	101,70
R2	105,06
R3	116,35

Salienta-se um aumento de 16,35% de aumento de resistência para a estaca de sucção mais rugosa em relação à lisa.

5.1.2. Simulações numéricas com tensão controlada

Similar ao deslocamento controlado, na tensão controlada, as simulações foram realizadas com aplicação de um incremento de tensão. Os valores dessas tensões foram aplicados na direção do eixo y, com sentido para cima e magnitudes variadas. Os valores escolhidos para as forças de arrancamento para essas análises foram maiores do que os encontrados nos estudos com deslocamento controlado em aproximadamente 15% e também foram maiores do que os valores dos ensaios experimentais. Isso se deve ao fato de o *software* utilizado gerar os resultados até a força máxima que o problema resiste, abortando os cálculos automaticamente quando isso ocorre.

Espera-se que os resultados dessas análises sejam aproximadamente iguais aos encontrados para modelos equivalentes simulados com deslocamento controlado.

5.1.2.1. Estaca de sucção lisa

Para a estaca L, a simulação numérica com tensão controlada foi realizada para confirmar que a pressão de sucção considerada é válida para o problema em questão, já que ela foi utilizada para a calibração dos modelos (Figura 52).

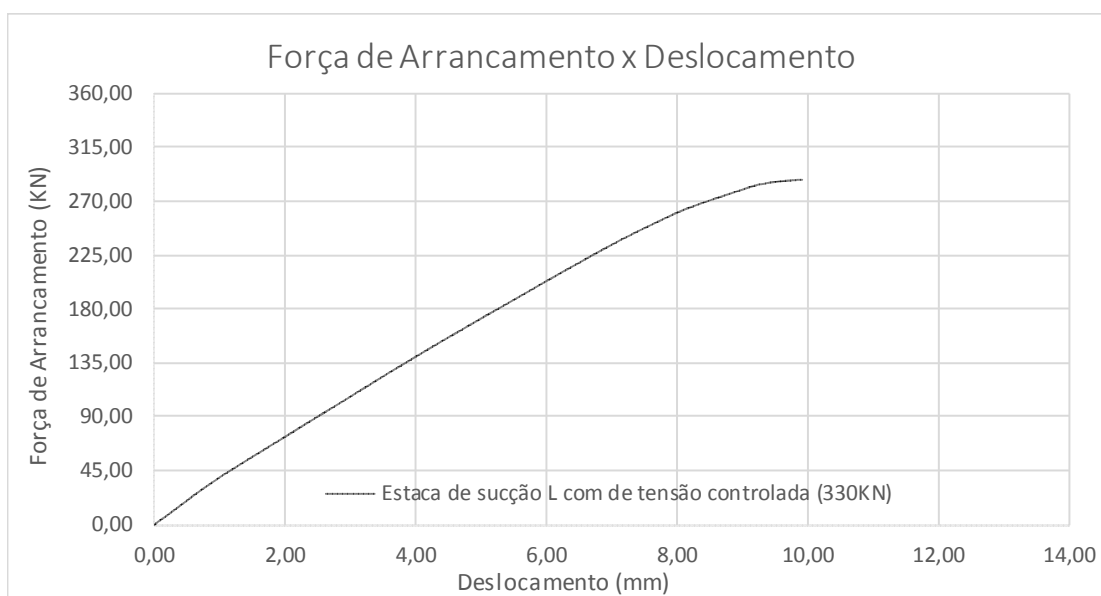


Figura 52: Gráfico força de arrancamento por deslocamento da estaca de sucção lisa com aplicação de sucção e tensão controlada

Apresenta-se, por meio dessa figura, o gráfico da força de arrancamento por deslocamento com aplicação da pressão de sucção encontrada para a estaca lisa com força de arrancamento de 330KN. A força de arrancamento máxima obtida para a tensão controlada foi de 287,50KN.

5.1.2.2. Estaca de sucção menos rugosa

Para as estacas com geometria de fuste dentada, os resultados das análises com tensão controlada determinam a força de arrancamento máxima que as estacas podem suportar. A Figura 53 apresenta o gráfico da força de arrancamento por deslocamento com aplicação da pressão de sucção encontrada para a estaca menos rugosa com força de arrancamento de 335KN. A força de arrancamento máxima obtida para a tensão controlada foi de 292,39KN.

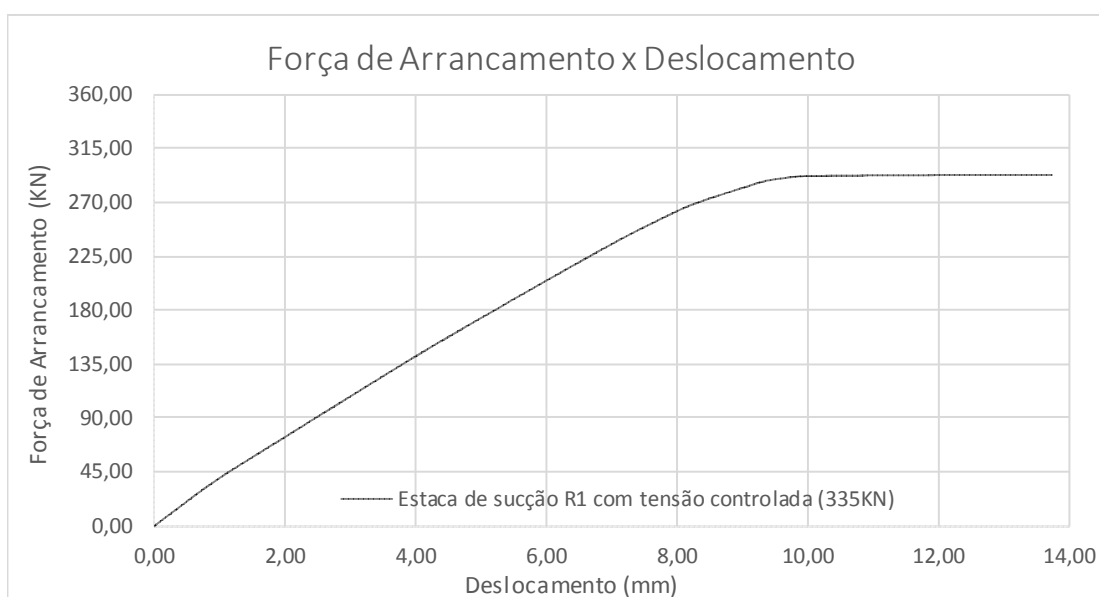


Figura 53: Gráfico força de arrancamento por deslocamento de estacas de sucção menos rugosa com aplicação de sucção e tensão controlada

5.1.2.3. Estaca de sucção rugosa

Para a estaca de sucção R2, o gráfico da força de arrancamento por deslocamento com aplicação da pressão de sucção é mostrado na Figura 54. A força de arrancamento para esse tipo de estaca foi de 350KN. A força de arrancamento máxima obtida para a tensão controlada foi de 302,12KN.

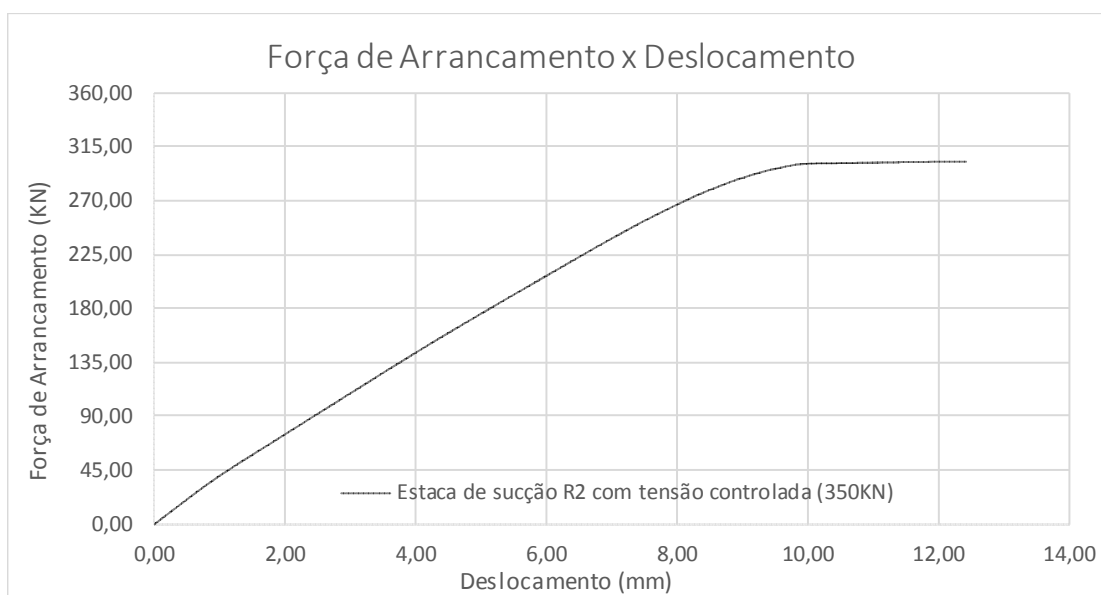


Figura 54: Gráfico força de arrancamento por deslocamento da estaca de sucção rugosa com aplicação de sucção e tensão controlada

5.1.2.4. Estaca de sucção mais rugosa

O gráfico da força de arrancamento por deslocamento com aplicação da pressão de sucção, apresentado na Figura 55, retrata o comportamento da estaca R3 durante a simulação com força de arrancamento de 385kN. Para essa simulação, a força de arrancamento máxima obtida foi de 334,74kN.

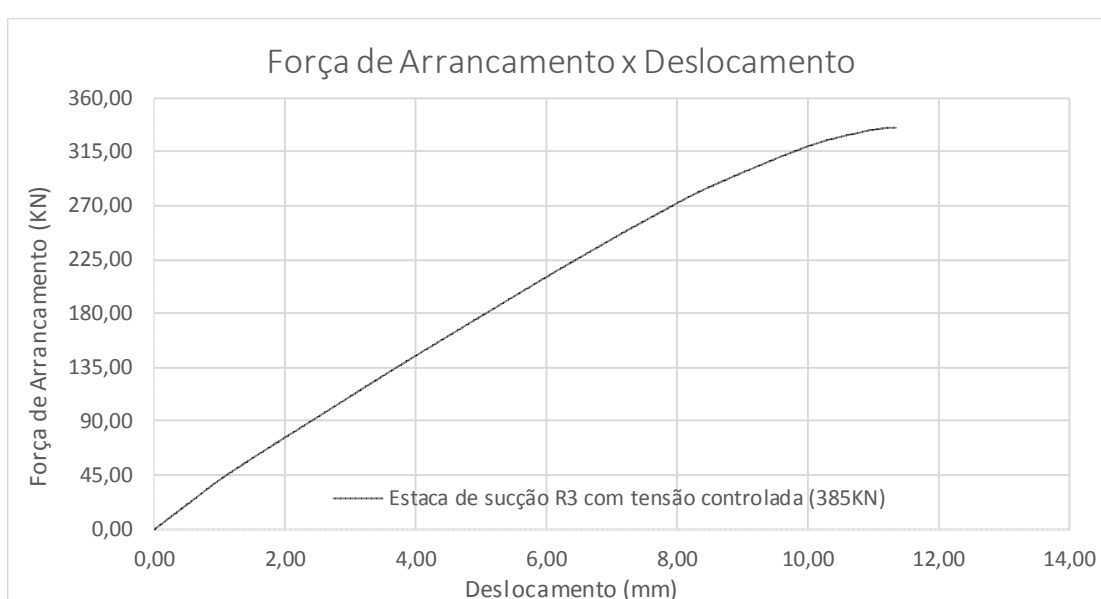


Figura 55: Gráfico força de arrancamento por deslocamento de estacas de sucção mais rugosas com aplicação de sucção e tensão controlada

A Tabela 15 apresenta os resultados de força de arrancamento obtidos a partir das simulações numéricas com deformação controlada e com tensão controlada.

Tabela 15: Resumo dos resultados para as simulações numéricas realizadas

Tipo de simulação numérica	Resultados dos modelos numéricos			
	L FA (KN)	R1 FA (KN)	R2 FA (KN)	R3 FA (KN)
Deslocamento controlado	287,52	292,40	302,08	334,52
Tensão controlada	287,50	292,39	302,12	334,74

Com base nos resultados da tabela acima, nota-se que boas aproximações foram encontradas entre os valores de força de arrancamento máximas nas simulações numéricas realizadas com deslocamento controlado e com tensão controlada, atribuindo confiabilidade aos modelos. Porém, observou-se que apesar desses modelos representarem a força de arrancamento com eficiência, a bucha de solo continuou no leito marinho após o arrancamento da estaca, impossibilitando a análise do comportamento do solo para estes casos e, por isso, outras considerações foram feitas para avaliar o modelo, a fim de garantir um comportamento idêntico aos modelos experimentais.

Um modelo tridimensional foi desenvolvido com a nova metodologia, porém para evitar altos esforços computacionais e poupar tempo, modelos axissimétricos foram gerados para dar continuidade a pesquisa.

5.2. Modelos axissimétricos

Os modelos axissimétricos, inicialmente, também foram calibrados pelos resultados obtidos através da estaca de sucção lisa. Contudo, um modelo numérico tridimensional foi utilizado para avaliar se a força de arrancamento máxima se aproxima da força correspondente aos modelos analisados anteriormente.

Devido à aplicação da pressão de sucção durante a instalação das estacas de sucção, o solo pertencente à formação do preenchimento interno da estaca torna-se mais denso. Nessas simulações, foi considerado um peso específico submerso maior para a bucha de solo. Como a cravação das estacas não foi simulada para nenhum dos modelos

estudados, essa consideração atua como a presença da sucção neste sistema. Logo, o peso específico submerso da bucha de solo obtido na calibração do modelo numérico tridimensional foi de 12KN/m^2 e também foi utilizado para os modelos axissimétricos.

As simulações numéricas dos modelos axissimétricos foram realizadas por deslocamento controlado com aplicação de deslocamento com magnitude de $0,10\text{m}$ exercido sobre a estaca, aplicado na direção do eixo y e com sentido para cima.

Com o intuito de avaliar o comportamento do solo na interação do problema, foram estipuladas onze trajetórias passando pelo maciço de solo, sendo seis verticais e cinco horizontais (Figura 56), que possibilitaram o estudo dos campos de deslocamentos, de tensões cisalhantes, de tensões normais e de deformações plásticas atuantes no solo.

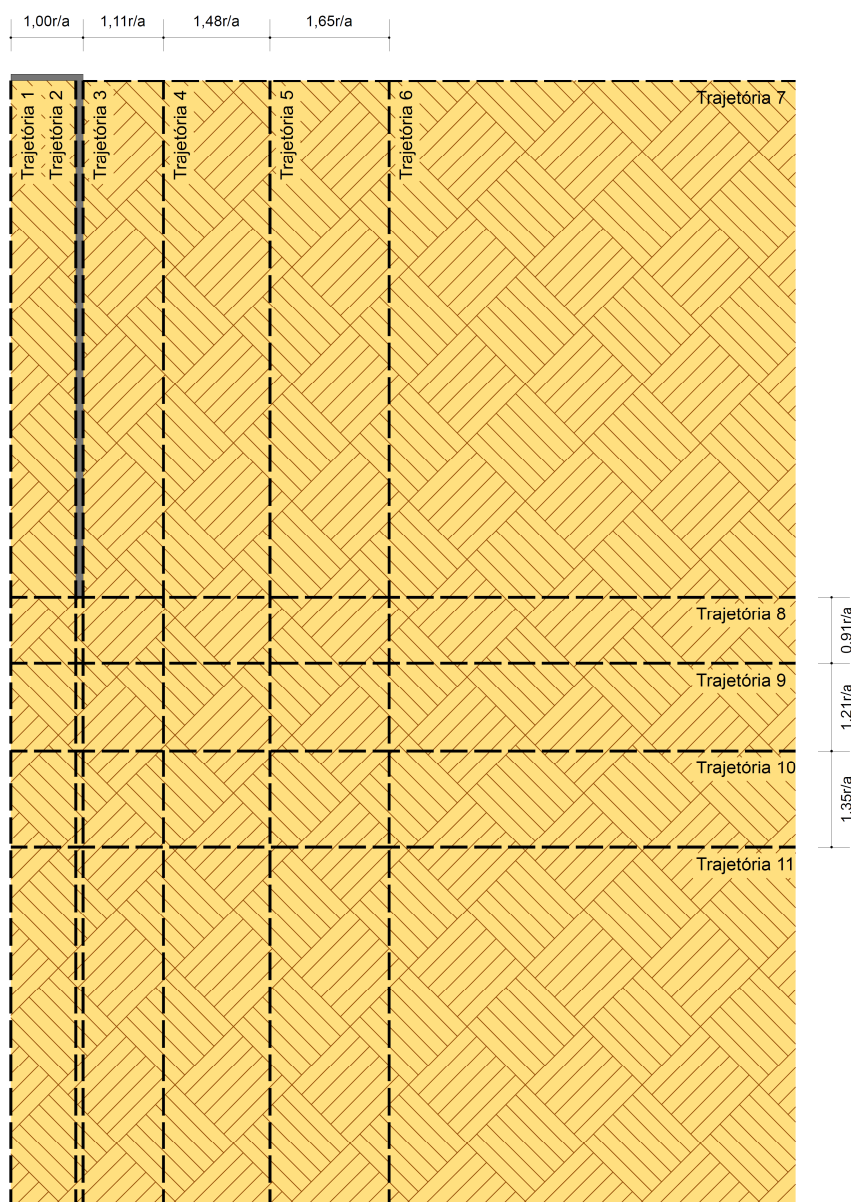


Figura 56: Trajetórias definidas para análise de comportamento do maciço de solo

As trajetórias passam necessariamente pelos nós dos elementos gerados pela malha de elementos finitos. Devido a isso, as trajetórias 4, 5 e 6 não são verticais nas estacas com geometrias dentadas atribuídas ao fuste. Conforme já exposto, isso ocorreu devido aos maciços de solo serem constituídos por elementos quadriláteros, que se adequaram à ranhura definida para o solo presente na interface do fuste da estaca. Mesmo assim, o comportamento do solo, para todas as grandezas estudadas, permaneceu o mesmo nas trajetórias correspondentes.

5.2.1. Deslocamentos

Os deslocamentos verticais no maciço de solo foram estudados conforme as trajetórias definidas anteriormente para todas as geometrias de fuste desta pesquisa. Os gráficos das Figuras 57 e 58 mostram os deslocamentos ao longo dessas trajetórias.

Através deles, verifica-se que os deslocamentos são mais intensos próximos nas interfaces solo-estaca e na bucha de solo, que é arrancada do leito marinho juntamente com a estaca.

Os deslocamentos que ocorrem na Trajetória 3, possuem, para as estacas R1 e R2, um pico para cada ranhura atribuída à sua geometria de fuste. Para a estaca R3, é possível observar que os picos não ocorreram e que um efeito de grupo com o comportamento da interface bucha-estaca ocorreu.

Para os deslocamentos das trajetórias horizontais, existe uma convergência de valores a partir de 6 vezes a razão de afastamento para todas as geometrias de fuste.

5.2.2. Tensões cisalhantes

Os gráficos das tensões de cisalhamento atuantes no solo em função da distância nas trajetórias verticais e horizontais estabelecidas podem ser analisados através das Figuras 59 e 60.

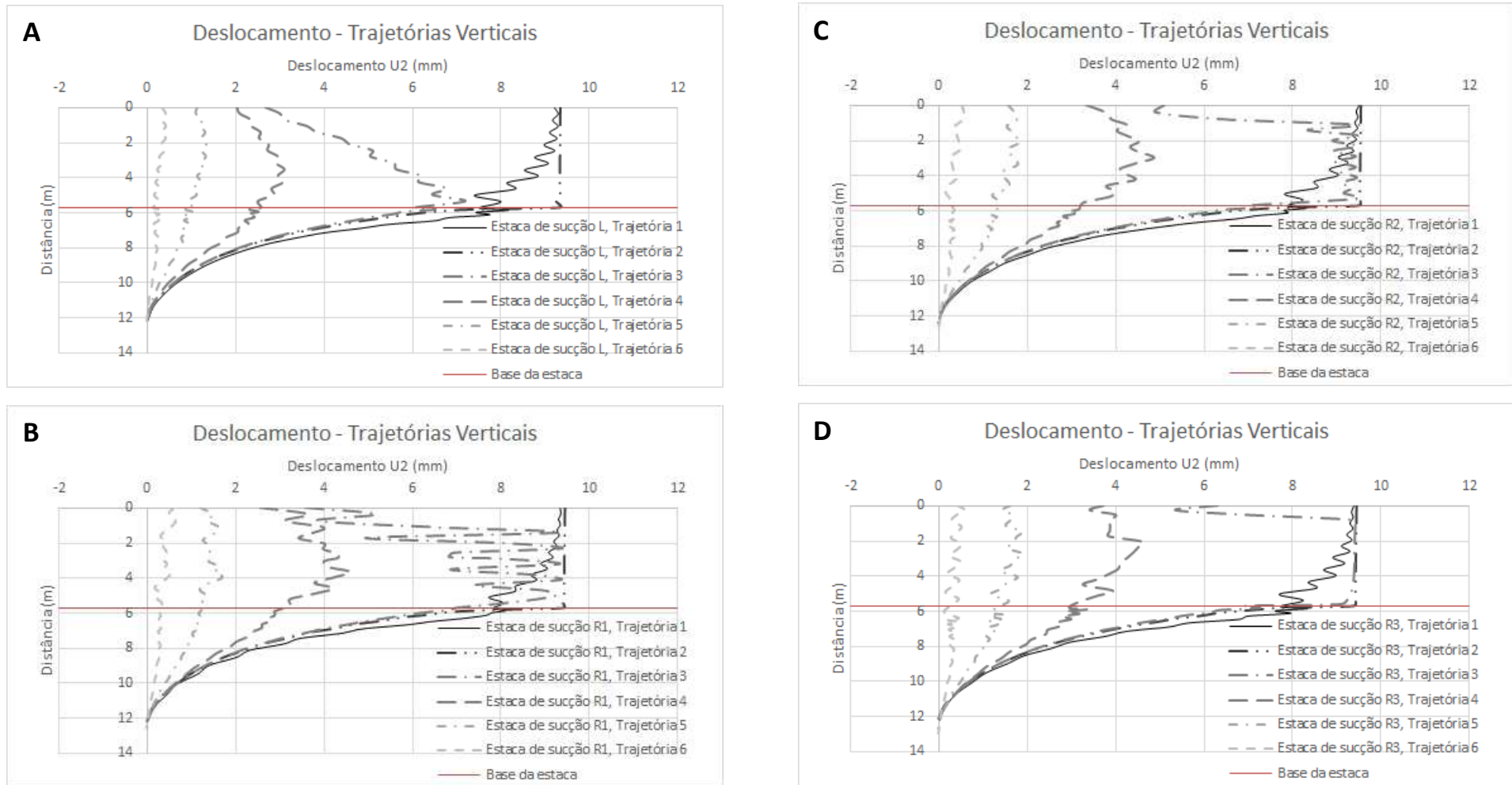


Figura 57: Gráfico de deslocamento por distância das trajetórias verticais para as estacas com geometria de fuste lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

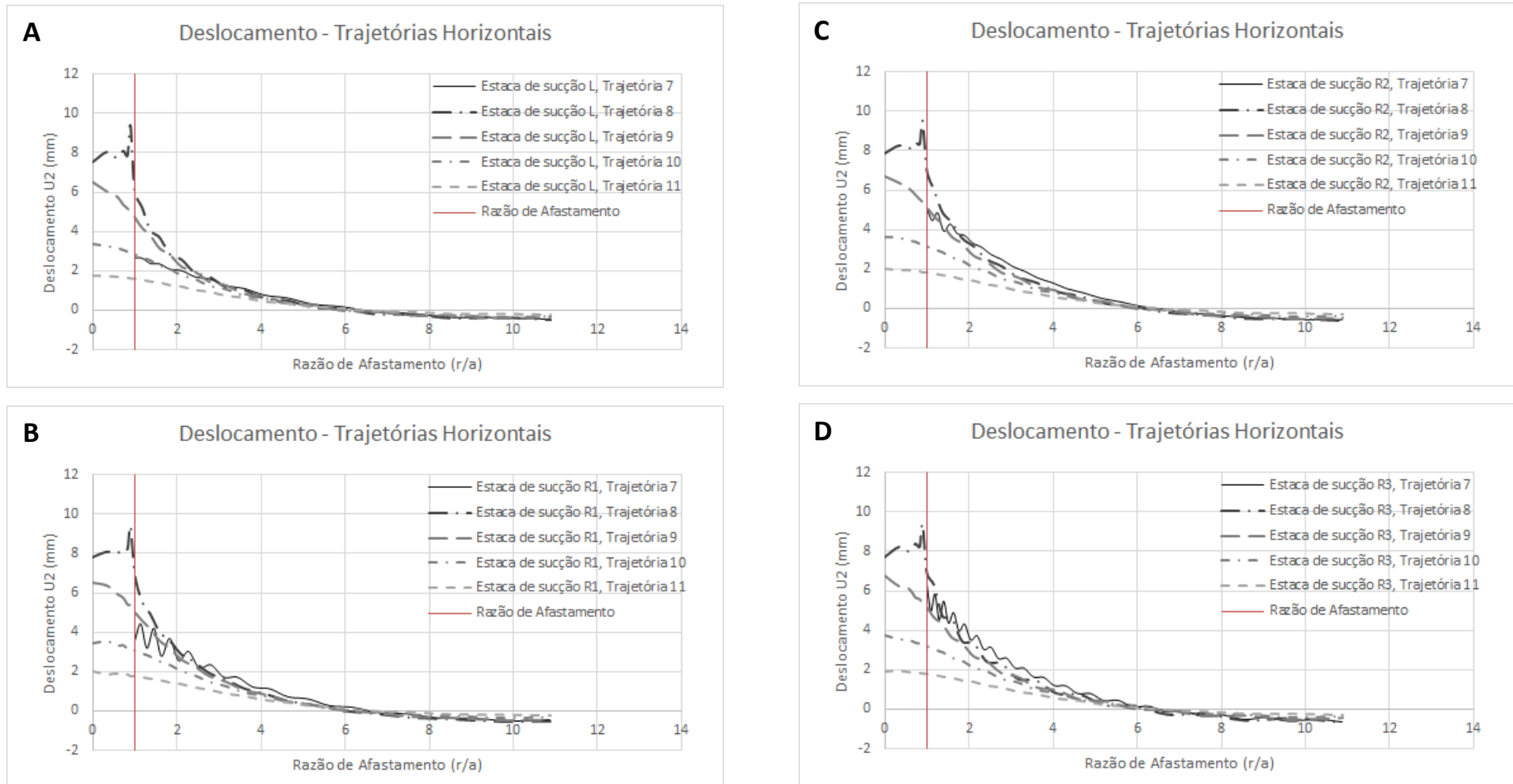


Figura 58: Gráfico de razão de afastamento por deslocamento das trajetórias horizontais para as estacas com geometria de fuste lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

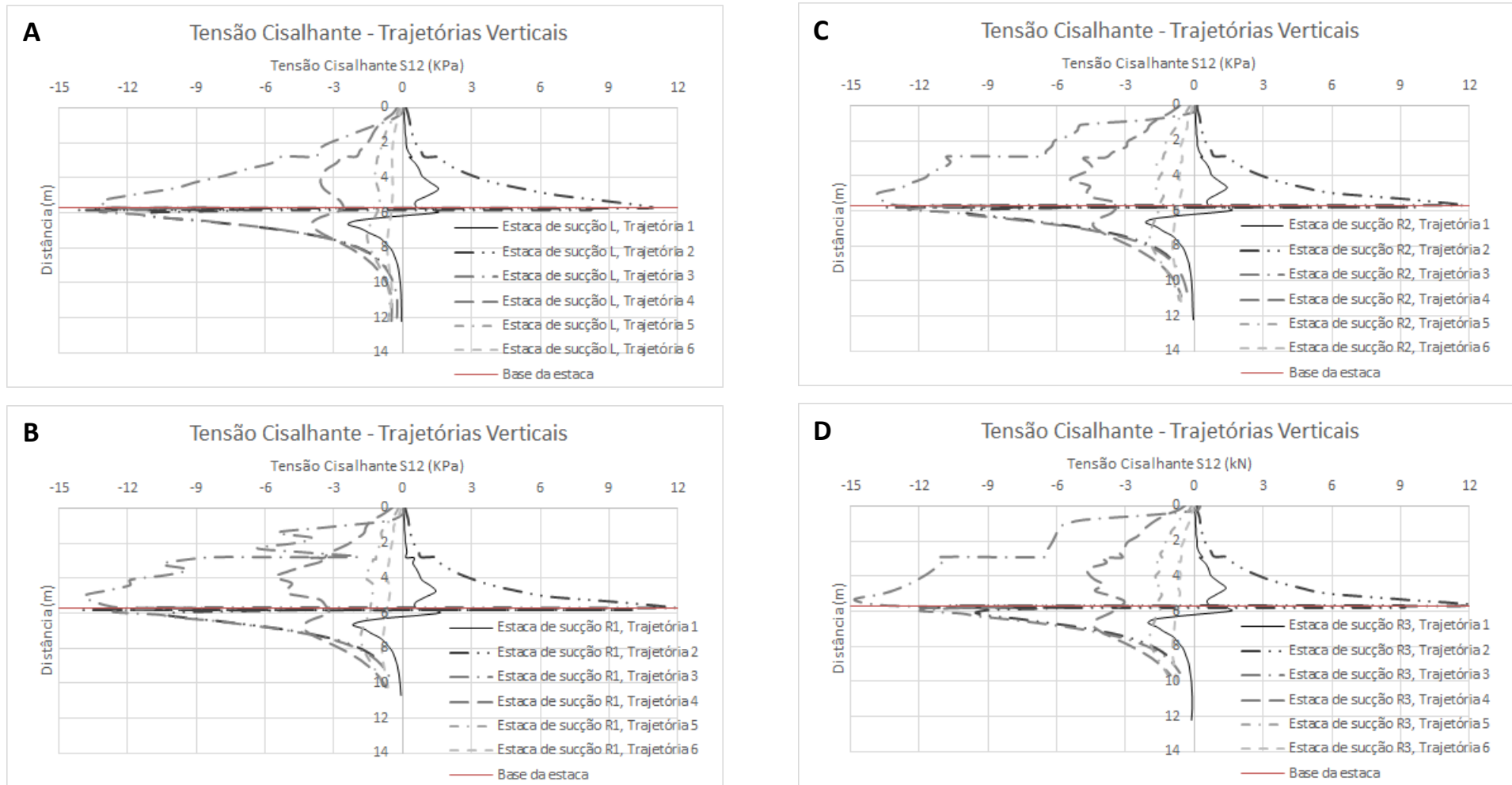


Figura 59: Gráfico de tensão cisalhante por distância das trajetórias verticais para as estacas com geometria de fuste lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

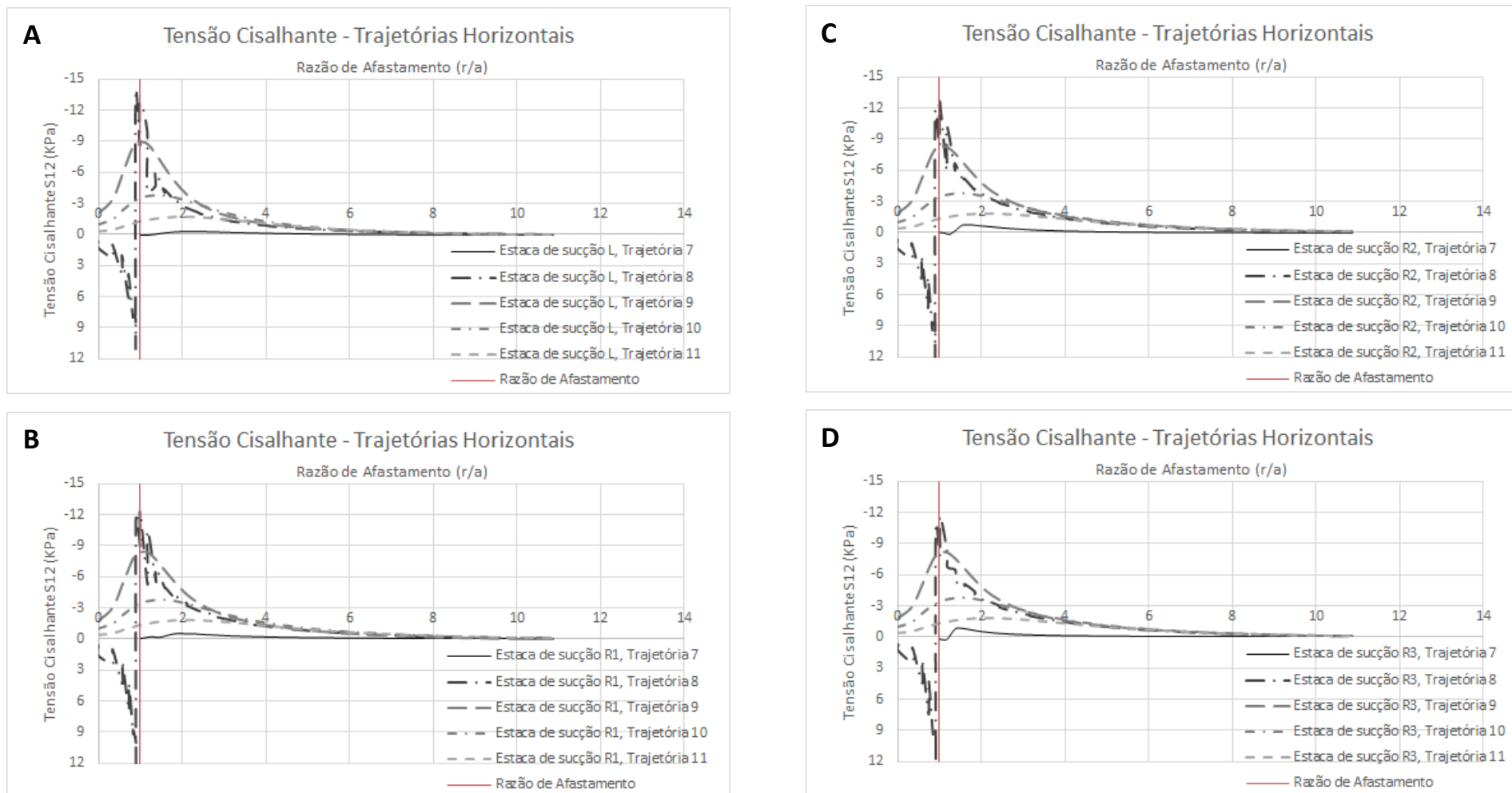


Figura 60: Gráfico de razão de afastamento por tensão cisalhante das trajetórias horizontais para as estacas com geometria de fuste lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

Para as trajetórias verticais, observa-se uma concentração de cisalhamento na base da estaca e um aumento dessas tensões com o aumento das ranhuras atribuídas à geometria. As trajetórias horizontais apresentaram concentração de tensões cisalhantes na interface bucha-estaca e convergência de magnitudes a partir de 8 vezes a razão de afastamento para todas as geometrias de fuste.

Para a porção de solo referente ao preenchimento interno das estacas, ocorrem tensões cisalhantes positivas devido ao confinamento da pressão de sucção, enquanto para o restante do maciço de solo, ocorrem negativas.

5.2.3. Tensões normais

De forma similar, para as tensões normais foram gerados gráficos de tensão em função da distância para as trajetórias em questão, que são apresentados nas Figuras 61 e 62. É possível verificar que existe uma tendência à ocorrência de inflexões nas curvas na base das estacas e que essas inflexões são mais altas onde a pressão de sucção confinada atua, ou seja, na bucha de solo. Além disso, a geometria dentada atribuída ao fuste gera um comportamento de tração e compressão na interface solo-estaca, que adquire um efeito de grupo na estaca mais rugosa com comportamento contínuo (sem picos) de tração.

5.2.4. Deformações plásticas

As deformações plásticas foram analisadas, através das Figuras 63 e 64, somente para a trajetória vertical, que passa no fuste da estaca (Trajetória 3), e para a trajetória horizontal, que passa na base da estaca (Trajetória 8).

Na trajetória 3, a plastificação é maior nas proximidades da superfície do leito marinho, onde não há confinamento e ocorre incremento de deslocamento. Percebe-se que, para a primeira geometria dentada, ocorrem deformações plásticas de compressão, em que as magnitudes diminuem com o aumento da quantidade de dentes atribuídos ao fuste. Ademais, deformações plásticas de tração ocorrem na base da estaca, onde o maciço de solo se rompe para a saída da bucha de solo em conjunto com a estaca.

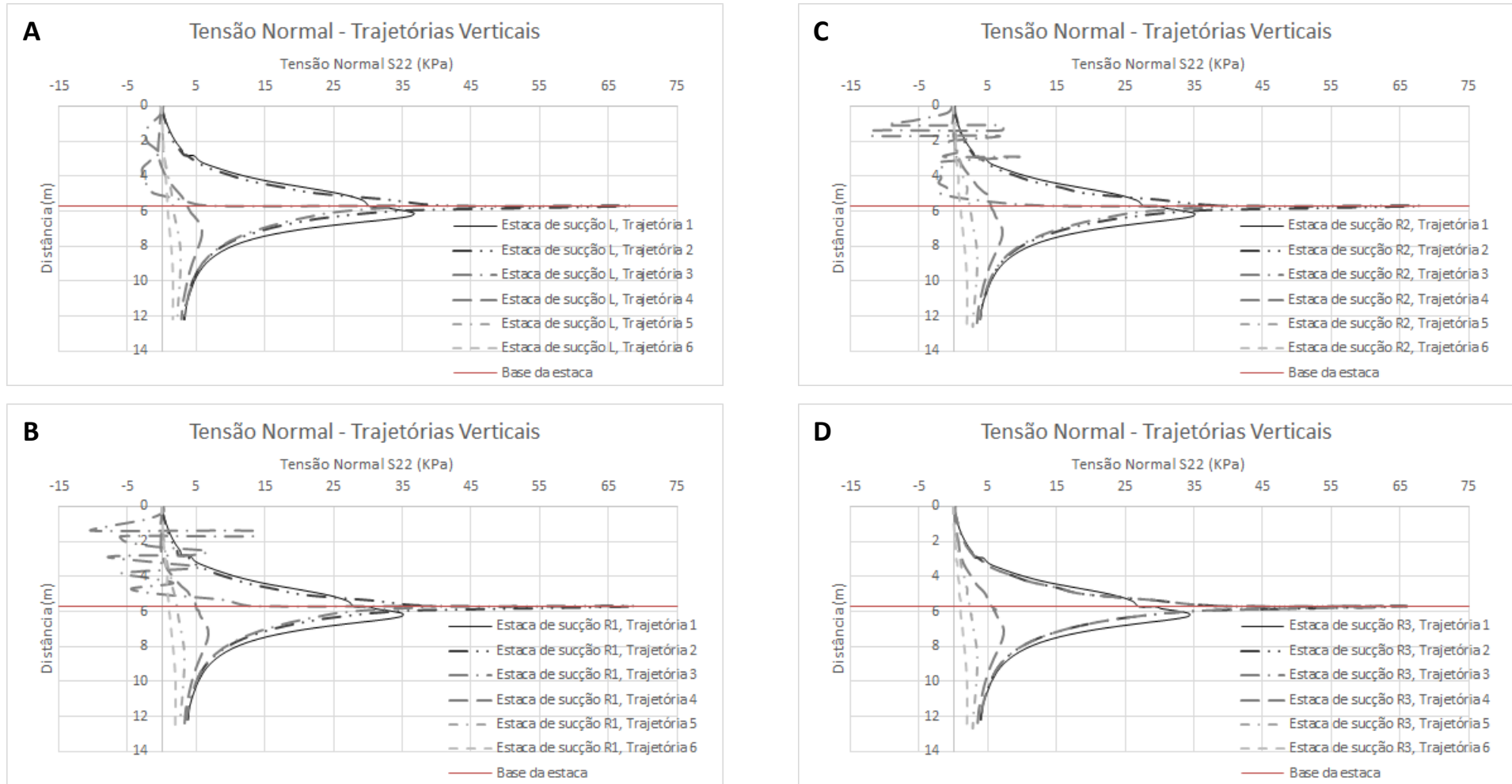


Figura 61: Gráfico de tensão normal por distância das trajetórias verticais para as estacas com geometria de fuste lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

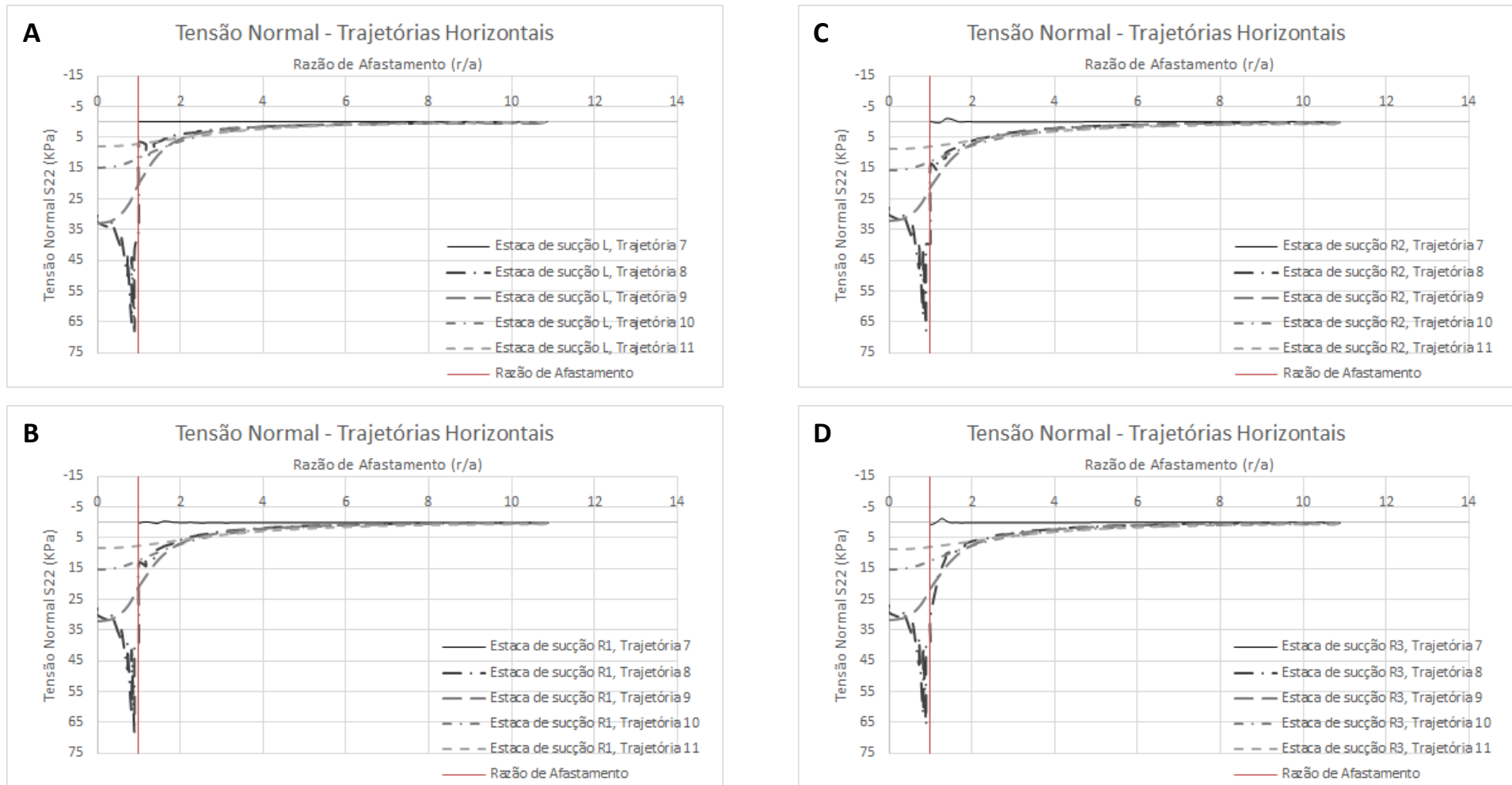


Figura 62: Gráfico de razão de afastamento por tensão normal das trajetórias horizontais para as estacas com geometria de fuste lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

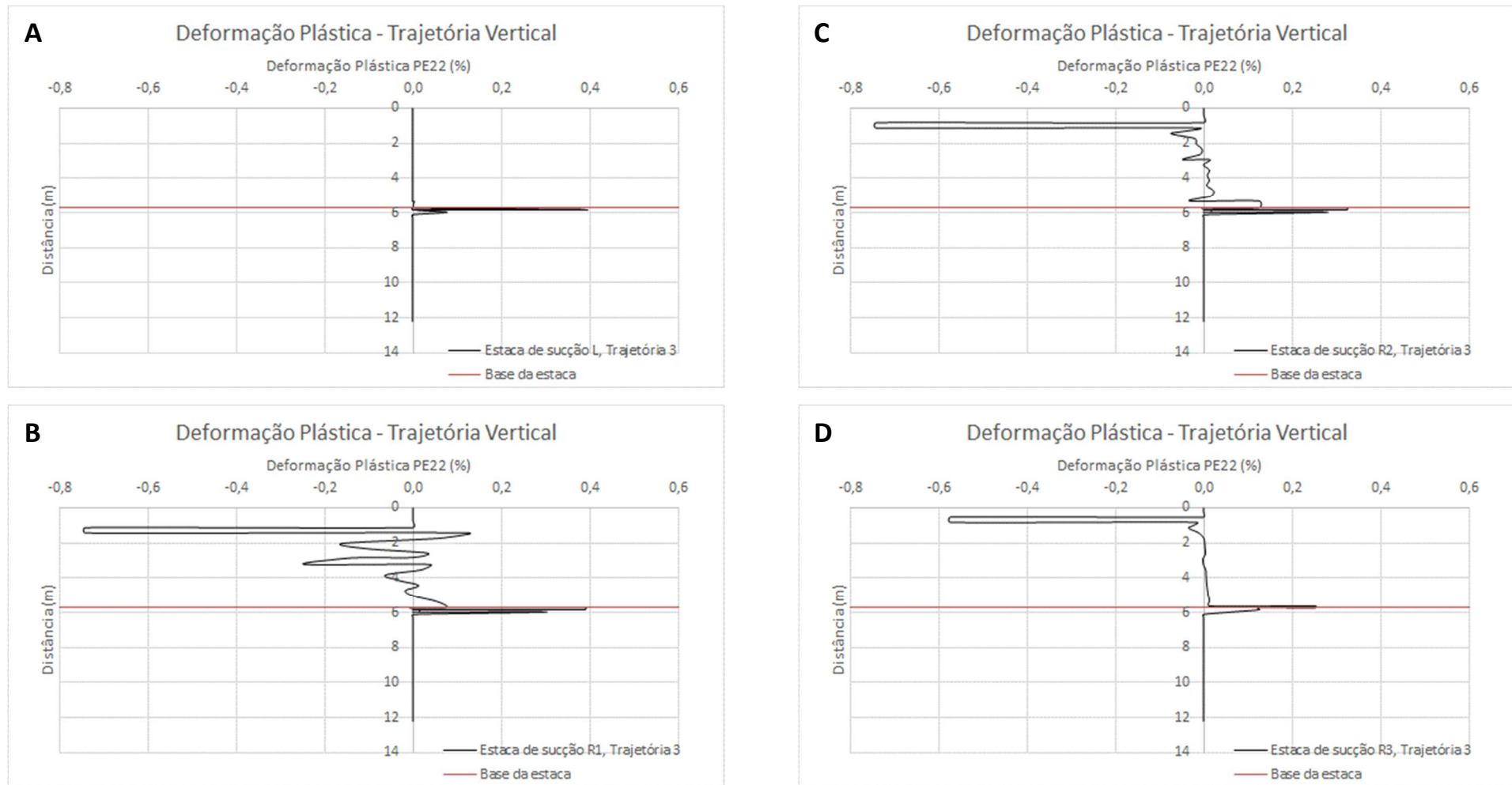


Figura 63: Gráfico de deformação plástica por distância da trajetória vertical para as estacas com geometria de fuste lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

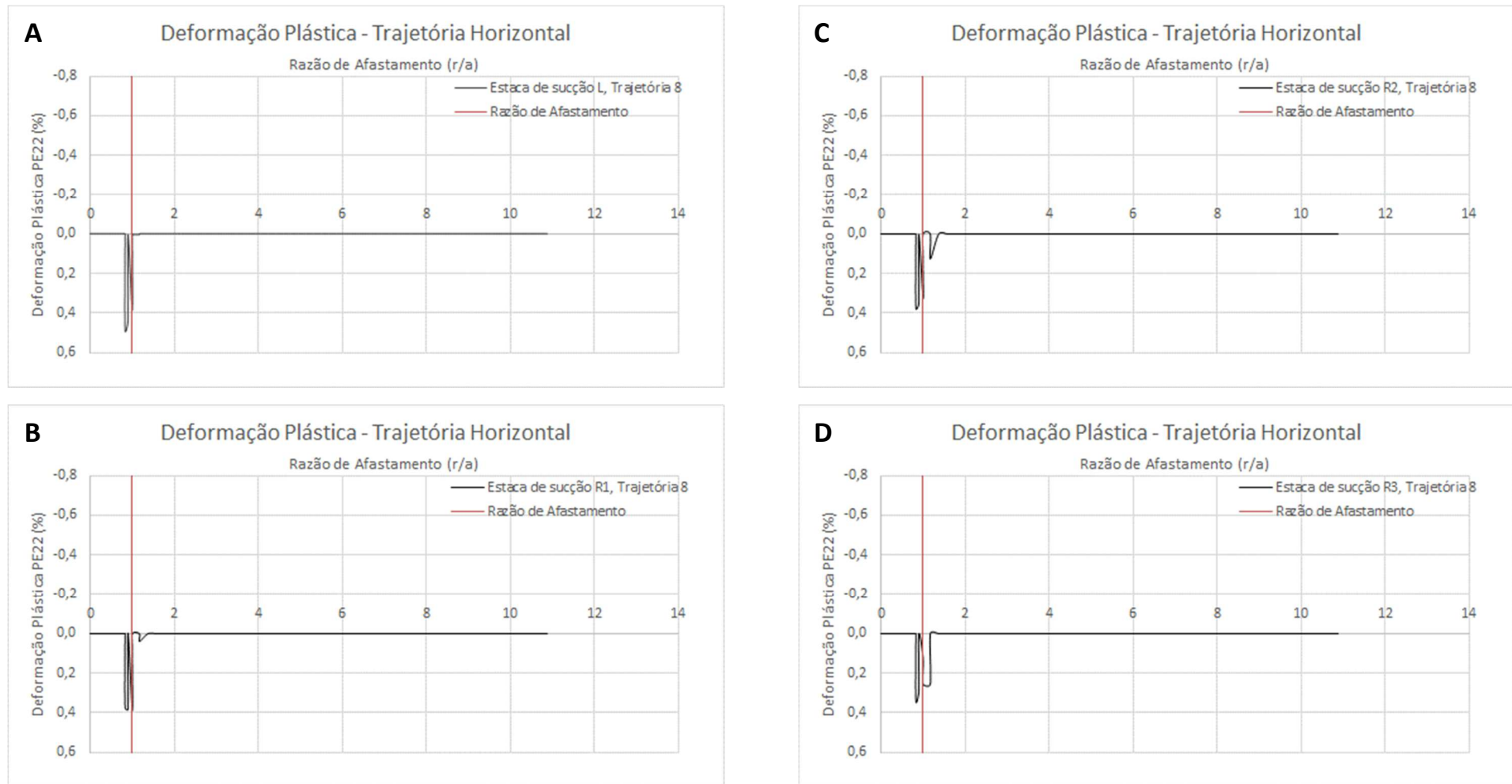


Figura 64: Gráfico de razão de afastamento por deformação plástica da trajetória horizontal para as estacas com geometria de fuste lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

A Trajetória 8 apresenta deformações plásticas de tração na base da estaca, indicando o rompimento do solo, em que o preenchimento interno sai do leito marinho junto com a estaca.

5.2.5. Análise do comportamento do solo

Em todos os modelos axissimétricos, observou-se que o comportamento das grandezas avaliadas no maciço de solo para o preenchimento interno da estaca foi praticamente o mesmo. As intensidades máximas das grandezas analisadas no maciço de solo ocorreram na interface solo-fuste, conforme esperado.

Com o intuito de avaliar a influência da geometria das estacas e do coeficiente de atrito na interface solo-estaca, foram realizadas, para cada uma das quatro geometrias de fuste atribuídas às estacas, simulações numéricas com os coeficientes de atrito referentes aos modelos L, R1, R2 e R3, cujos resultados estão apresentados nos gráficos dos ANEXOS A (Distribuição dos deslocamentos verticais atuantes no solo), B (Distribuição das tensões cisalhantes atuantes no solo), C (Distribuição das tensões normais atuantes no solo) e D (Distribuição das deformações plásticas atuantes no solo).

A Tabela 16 mostra um resumo com as forças de arrancamento vertical das estacas de sucção obtidas para essas simulações. As magnitudes das forças mostram que a atribuição de ranhuras ao fuste da estaca reduz gradativamente a influência do coeficiente de atrito sobre elas.

Tabela 16: Resumo dos resultados da força de arrancamento para os modelos calibrados a partir da estaca de sucção L para $\gamma_{sub,bucha} = 12\text{KN/m}^2$

Geometria das estacas de sucção	Coeficiente de atrito da interface solo-fuste			
	μL F _A (KN)	μR1 F _A (KN)	μR2 F _A (KN)	μR3 F _A (KN)
L	286,01	295,83	307,67	322,56
R1	334,43	338,20	342,22	348,09
R2	355,52	356,77	358,54	361,01
R3	365,32	365,60	366,06	366,86

Os percentuais de variação das forças de arrancamento são apresentados na Tabela 17. A partir dela, podemos concluir que os resultados dos modelos simulados com as estacas de geometria R1, R2 e R3 independem do ângulo de atrito. No entanto, são influenciados pelo peso específico submerso.

Tabela 17: Percentuais de variação de força de arrancamento ($\gamma_{sub,bucha} = 12\text{KN/m}^2$)

Geometria das estacas de sucção	Variação da força de arrancamento (%)
L	12,78
R1	4,09
R2	1,54
R3	0,42

Os resultados das forças de arrancamento máximas dos ensaios experimentais não foram encontrados, para as geometrias R1, R2 e R3, entre as variações da Tabela 16. Esse fato deve ter ocorrido porque o ensaio de cisalhamento direto, que determinou os ângulos de atrito utilizados nos modelos experimentais, foi realizado a 1g e o arrancamento das estacas, em voo a 40g, o que provavelmente gerou uma diferença entre esses valores.

A estaca de sucção R3 foi escolhida para uma nova calibração dos modelos numéricos axissimétricos por apresentar um percentual de variação de força de arrancamento em função do coeficiente de atrito pouco sensível. Essa calibração foi feita com o intuito de investigar a existência de uma correlação entre os resultados dos ensaios numéricos e experimentais. Com um peso específico submerso de 10KN/m^2 para a bucha de solo, os modelos foram simulados numericamente e as forças de arrancamento vertical apresentadas na Tabela 18 foram obtidas.

Tabela 18: Resumo dos resultados da força de arrancamento para os modelos calibrados a partir da estaca de sucção R3 para $\gamma_{sub,bucha} = 10\text{KN/m}^2$

Geometria das estacas de sucção	Coeficiente de atrito da interface solo-fuste			
	L	R1	R2	R3
	FA (KN)	FA (KN)	FA (KN)	FA (KN)
L	263,52	273,46	285,65	302,75
R1	313,52	317,52	321,94	326,19
R2	335,43	336,76	338,43	340,81
R3	344,26	344,50	346,64	347,44

Os percentuais de variação das forças de arrancamento obtidos para a Tabela 18 são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19: Percentuais de variação de força de arrancamento ($\gamma_{sub,bucha} = 10\text{KN/m}^2$)

Geometria das estacas de sucção	Variação da força de arrancamento (%)
L	14,88
R1	4,04
R2	1,60
R3	0,92

Uma interpretação gráfica para a Tabela 18, para uma melhor visualização dos resultados, é apresentada através da Figura 65, em que é possível verificar a sensibilidade da força de arrancamento em relação ao coeficiente de atrito.

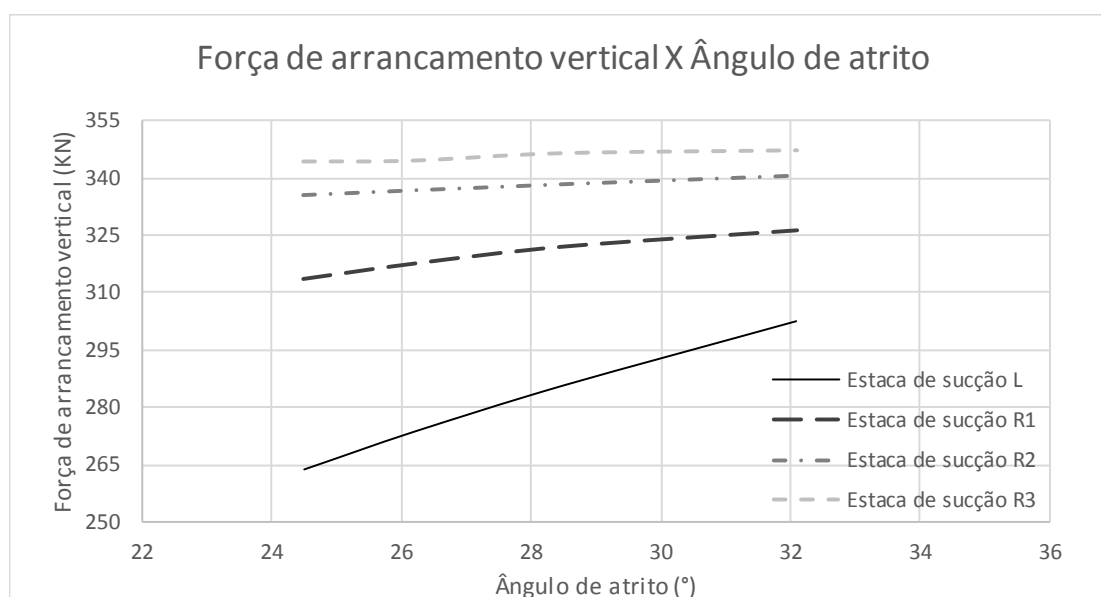


Figura 65: Gráfico da força de arrancamento vertical em função do ângulo de atrito

O modelo de estaca de sucção lisa, foi o único que apresentou sensibilidade ao ângulo de atrito. Conforme pode ser observado no gráfico, é possível afirmar que o coeficiente de atrito solo-estaca para os demais modelos é pouco sensível, ou seja, a força de arrancamento se torna constante, independente do coeficiente de atrito, com o aumento do número de ranhuras. Sendo assim, o modelo apresentou variações em sua capacidade de suporte devido à geometria dentada aplicada ao fuste das estacas de

sucção e, com isso, conclui-se que é o número de ranhuras que influencia o aumento da força de arrancamento aqui investigada.

Os gráficos gerados para avaliar o comportamento do solo em relação aos campos de deslocamentos, tensões e deformações, apresentados nos anexos, foram gerados apenas para os modelos axissimétricos calibrados com o modelo de estaca de sucção lisa ($\gamma_{sub,bucha} = 12\text{KN/m}^2$). Contudo, o comportamento esperado para os modelos calibrados com a estaca de sucção mais rugosa ($\gamma_{sub,bucha} = 10\text{KN/m}^2$) é o mesmo, ou seja, quantitativamente os resultados serão diferentes, mas qualitativamente eles serão similares.

A Tabela 20 apresenta um resumo do percentual de acréscimo de carga para as estacas de sucção R1, R2 e R3, tanto para os modelos experimentais, quanto para os modelos numéricos axissimétricos calibrados com a estaca de sucção R3. Um gráfico da curva de desempenho da interface solo-fuste para esses modelos foi desenvolvido, conforme a Figura 66.

Tabela 20: Resumo do percentual de acréscimo de carga para as estacas de sucção R1, R2 e R3

Geometria das estacas de sucção	Percentual de acréscimo de força de arrancamento			
	Modelo experimental	Modelo numérico R1	Modelo numérico R2	Modelo numérico R3
R1 (5 ranhuras)	6,52	16,11	12,71	7,74
R2 (8 ranhuras)	11,87	23,15	18,48	12,57
R3 (17 ranhuras)	22,63	25,98	21,35	14,76

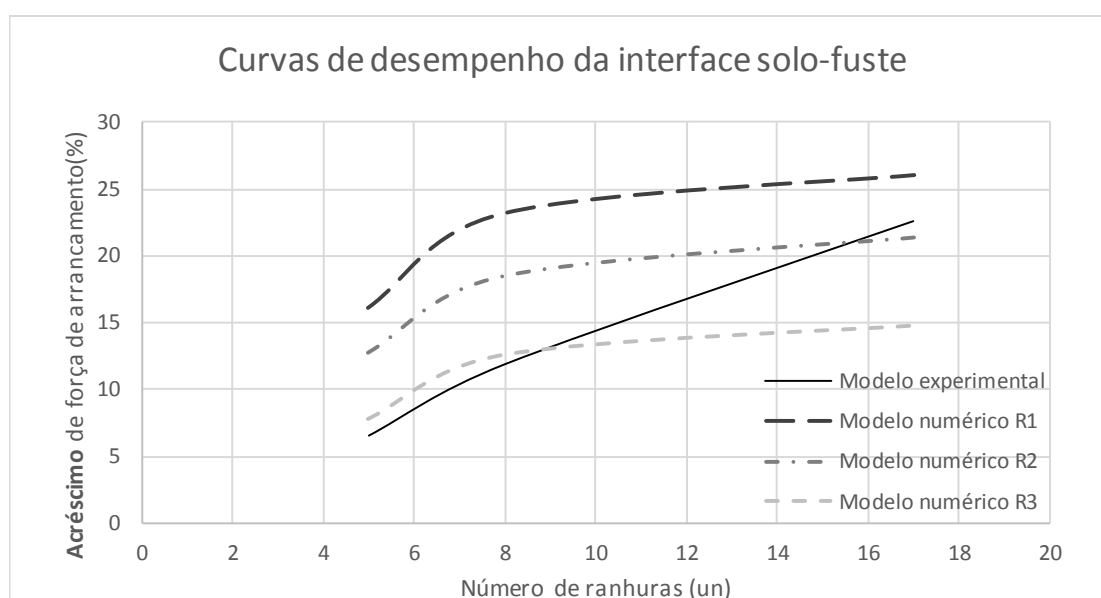


Figura 66: Curva de desempenho da interface solo-fuste

Através da Tabela 20, deduz-se que o ângulo de atrito seja próximo a 30° e salienta-se um aumento de 14,76% de aumento de resistência para a estaca de sucção mais rugosa em relação à lisa.

É possível observar que as curvas do gráfico percentual de acréscimo de carga por número de ranhuras possuem comportamento não linear para a força de arrancamento das estacas de sucção, embora a curva experimental insinue um comportamento linear.

Esta pesquisa auxilia a distinguir que a ranhura não contribui com a rugosidade, já que a rugosidade depende do ângulo de atrito.

6. Conclusões e indicações para trabalhos futuros

6.1. Conclusões

Esta dissertação apresentou os procedimentos a serem seguidos para a realização de um estudo com simulações numéricas desenvolvidas no programa computacional Abaqus, através do Método dos Elementos Finitos, analisados a partir de modelos numéricos axissimétricos e tridimensionais. Além disso, expôs os resultados obtidos para avaliar o desempenho de estacas de sucção e o comportamento da interação solo-estaca, com variações na geometria do fuste, submetidas a arrancamento vertical.

Inicialmente, modelos numéricos tridimensionais foram desenvolvidos. O percentual de cravação das estacas de sucção em leito marinho foi estudado para avaliar sua influência no comportamento da capacidade de carga ao arrancamento vertical durante a etapa de arrancamento das estacas. Quanto a isso, constatou-se que quanto maior o percentual de cravação, maior será a força de arrancamento máxima que a estaca poderá suportar, pois sua magnitude está diretamente relacionada com a área externa de contato lateral da estaca com o maciço de solo.

Três alturas distintas para a execução de simulações com deslocamento controlado foram pré-estabelecidas para a realização do arrancamento de estacas de sucção. Essas alturas foram definidas avaliando os resultados dos ensaios experimentais de Melo (2015). Com os resultados obtidos, é possível relatar que a força de arrancamento procedeu da mesma maneira em todas as alturas simuladas e que as forças máximas ocorreram no instante em que a estaca começou a se deslocar.

Também foram feitas simulações com tensão controlada, para determinar, aproximadamente, a carga vertical última que as estacas de sucção podem suportar, a fim de corroborar os resultados desses modelos. As cargas pré-estabelecidas para a realização do arrancamento de estacas de sucção, nessas condições, foram maiores do que as encontradas tanto nos modelos numéricos simulados, quanto nos ensaios experimentais. Elas foram acrescidas em aproximadamente 15% da força de

arrancamento máxima obtida a partir das simulações numéricas. Boas aproximações foram alcançadas, atribuindo confiabilidade à metodologia utilizada.

Contudo, constatou-se que o comportamento da bucha de solo não ocorreu conforme esperado e, por isso, outras considerações foram feitas para avaliar o comportamento do modelo, a fim de garantir um comportamento idêntico aos modelos experimentais. Um modelo tridimensional foi desenvolvido com a nova metodologia, porém para evitar altos esforços computacionais e poupar tempo, modelos axissimétricos foram gerados para dar continuidade à pesquisa. A partir desses modelos, foi possível observar que o comportamento das grandezas analisadas no maciço de solo foi praticamente o mesmo no preenchimento interno das estacas e que as intensidades máximas dessas grandezas ocorreram na interface solo-fuste, conforme esperado.

Além disso, foi constatado que os modelos numéricos com ranhuras aplicadas nas paredes externas das estacas de sucção influenciam o aumento da força de arrancamento aqui investigada e que o ângulo de atrito é pouco sensível e próximo a 30° , para esses modelos. Por isso, a utilização de ranhuras em estacas de sucção representa uma alternativa para o aumento do desempenho desse tipo de fundação para sistemas de ancoragem vertical.

Por fim, a estaca de sucção com maior número de ranhuras apresentou um ganho de resistência ao arrancamento vertical de aproximadamente 15% em relação à estaca de sucção lisa tanto para os modelos numéricos tridimensionais quanto para os axissimétricos. Esse ganho de capacidade de carga está atribuído a 89,69% de área externa de contato lateral da estaca com aplicação de ranhuras.

6.2. Indicações para trabalhos futuros

Os resultados obtidos nesta pesquisa servem como base para o desenvolvimento de novos estudos envolvendo esta área. Seguem algumas sugestões para trabalhos futuros relacionados a este tema.

- Investigar a influência da variação da relação de aspecto e do índice de esbeltez para as simulações numéricas desta pesquisa.

- Avaliar o desempenho de estacas de sucção com diferentes geometrias de fuste, ou seja, rugosidade aplicada na parede externa, para o sistema de ancoragem *taut-leg*, o que vai influenciar na direção do arrancamento.
- Analisar a influência do posicionamento do olhal no fuste de estaca de sucção com rugosidade aplicada em relação à sua resistência ao arrancamento para o sistema de ancoragem *taut-leg*.
- Realizar estudos com carregamentos dinâmicos para modelos numéricos de estacas de sucção com rugosidade atribuída à sua parede externa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAQUS (2009). *ABAQUS User's Manual*. Dassault Systemes, Simulia Corporation ABAQUS vs. 6.9; Providence, Rhode Island, USA.

AHN, J., Lee, H., Kim, Y.T. (2013). *Finite Element Analysis of the Holding Capacity of Shallow Suction Caisson Anchors*. Marine Georesources & Geotechnology, 33:1, 33-44.

AHN, J., Lee, H., Kim, Y.T. (2014). *Holding capacity of suction caisson anchors embedded in cohesive soils based on finite element analysis*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics; 38: 1541-1555.

ANDERSEN, K.H., Dyvik R., Schroeder K., Hansteen O.E., Bysveen S. (1993). *Field tests of anchors in clay II: predictions and interpretation*. Journal of Geotechnical Engineering ASCE, 119(10): 1532-1549.

ANDERSEN, K.H., Jostad, H.P. (1999). *Foundation design of skirted foundations and anchors in clay*. Offshore Technology Conference; Houston, Texas; OTC-10824-MS.

API - American Petroleum Institute (1993), *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Load and Resistance Factor Design*, API RP 2A – LRFD, 1st Edition, USA.

AUBENY, C., Han, S., Murff, J. (2003). *Inclined load capacity of suction caissons*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics; 27(14): 1235-1254.

CAO, J., Phillips, R., Popescu, R., Audibert, J., Al-Khafaji, Z. (2003). *Numerical analysis of the behavior of suction caissons in clay*. International Journal of Offshore and Polar Engineering; 13(2): 154-159.

CHEN, C.H. (2013). *Performance of suction caissons with a small aspect ratio*. PhD Dissertation, Austin, Texas – United States of America, The University of Texas at Austin, 313p.

CLUCKEY, E.C., Morrison, M.J. (1993). *A centrifuge and analytical study to evaluate suction caissons for TLP applications in the Gulf of Mexico, design and performance of deep foundations: piles and piers in soil and soft rock*, ASCE Geotechnical Special Publication; 38: 141-156.

CORRÊA, F.N. (2003). *Aplicação de metodologias híbridas em estudos paramétricos sobre o comportamento de sistemas offshore*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Rio de Janeiro - RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 147p.

COSTA, R.G.B. (2008). *Análise paramétrica das condições de ancoragem de plataformas offshore utilizando estacas torpedo a partir de modelos em elementos finitos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Rio de Janeiro - RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 109p.

DERAKHSHANI, A. (2017). *Estimating uplift capacity of suction caissons in soft clay: A hybrid computational approach based on model tree and GP*. Ocean Engineering, 146: 1-8.

DESAI, C.S., Abel, J.F.(1972). *Introduction to the Finite Element Method: a numerical method for engineering analysis*. Van Nostrand Reinhold Company, New York, USA, 477p.

DIÁRIO DO NORDESTE. Disponível em <http://goo.gl/uB1CDc>. Acessado em 28/01/2018.

FIRST SUBSEA. Disponível em <http://goo.gl/Yz2wqd>. Acessado em 15/04/2016.

GONÇALVES, R.C.F., Costa, L.C.S. (2002). *Inspeção em linhas de ancoragem de unidades de produção*. Trabalho apresentado no XXI Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos, Salvador – BA, 9p.

GOODMAN, L.J., Lee, C.N., Walker, F.J. (1961). *The feasibility of vacuum anchorage in soil*. Geotechnique; 1(3): 356-359.

HELFRICH, S.C., Brazill, R.L., Richards, A.F. (1976). *Pullout characteristics of a suction anchor in sand*. "Proceedings of the 8th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, OTC 2469; 3(6): 501-506.

HELWANY, S. (2007). *Applied Soil Mechanics: with ABAQUS Applications*. John Wiley & Sons, INC, Hoboken, New Jersey, 398 p.

HOUSE A., Randolph M. (2001). *Installation and pull-out capacity of stiffened suction caissons in cohesive sediments*. Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference; Stavanger, Norway; ISOPE-I-01-212.

JORNAL GGN. Disponível em <http://goo.gl/qgyrWQ>. Acessado em 12/01/2016.

JUNIOR, A.M. (2014). *Estruturas metálicas para suporte de turbinas eólicas offshore*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Coimbra - PT, Universidade de Coimbra - UC, 81p.

KEAVENY, J.M., Hansen, S.B., Madshus, C., Dyvik, R. (1994), *Horizontal capacity of large-scale model anchors*. Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering - ICSMFE, New Delhi, India; 2: 677-680.

KELLY, R.B., Houlsby, G.T., Byrne, B.W. (2006). *A comparison of field and laboratory tests of caisson foundations in sand and clay*. Geotechnique; 56(9): 617-626.

KUNITAKI, D.M.K.N. (2006). *Tratamento de incertezas no comportamento dinâmico de estacas torpedo para ancoragem de sistemas flutuantes na exploração de petróleo offshore*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Rio de Janeiro - RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 111p.

LATINI, C., ZANIA, V. (2017). *Dynamic lateral response of suction caissons*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering; 100: 59-71.

LIMA, A.L. (2006). *Avaliação de metodologias de análise de unidades estacionárias de produção de petróleo offshore*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Rio de Janeiro - RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 165p.

MELO, C.M.A.R. (2015). *Avaliação da influência da geometria do fuste na capacidade de carga das estacas de sucção por modelos centrifugados*. Tese

(Doutorado em Engenharia Civil), Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 238p.

MORAIS, J.M. (2013). *Petróleo em águas profundas - Uma história tecnológica da PETROBRAS na exploração e produção offshore*. Brasília - DF, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA, 421p.

MORENO, J.S. (2005). *Proposta de metodologia para critério de projeto de fundações de estacas de sucção para TLP*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Rio de Janeiro - RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 223p.

PALMER, A.C., White, D.J., Baumgard, A.J., Bolton, M.D., Barefoot, A.J., Finch, M., Powell, T., Faranski, A.S., Baldry, J.A.S. (2003). *Uplift resistance of buried submarine pipelines: comparison between centrifuge modelling and full-scale tests*. *Geotechnique*; 53(10): 877-883.

RAHMAN, M., Wang, J., Deng, W., Carter, J. (2001). *A neural network model for the uplift capacity of suction caissons*. *Computers and Geotechnics*; 28(4): 269-287.

RANDOLPH, M.F., House, A.R. (2002). *Analysis of suction caisson capacity in clay*. Offshore technology conference; Houston, Texas, OTC-14236-MS.

RANDOLPH, M.F., Gourvenec, M.R.S. (2011). *Offshore Geotechnical Engineering*. Spon Press, Taylor and Francis, London – UK; ISBN: 978-0-415-47744-4, 528.

SANTOS, A.L.F. (1997). *Âncoras de sucção*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Rio de Janeiro - RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 114p.

SCIELO BRAZIL. Disponível em <http://goo.gl/N3aNpW>. Acessado em 06/10/2016.

SOSA, S.A.S. (2015). *Simulação numérica do comportamento ao arrancamento de estacas tubulares vazadas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 89p.

TJELTA, T.I. (2001). *Suction Piles. Their position and application today*. Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference - ISOPE, Stavanger, Norway; 2: 1-6.

WANG, M.C., Nacci, V.A., Demars, K.R. (1975). *Behavior of underwater suction anchor in soil*. *Ocean Engineering*, Kansas, USA; 1: 47-62.

ZHAN, Y, Liu, F. (2010) *Numerical analysis of bearing capacity of suction bucket foundation for offshore wind turbines*. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*; 15: 633-644.

ZIENKIEWICZ, O.C., Taylor, R.L. (2000). *The Finite Element Method*. Volume 1 - The Basis, Quinta Edição, Butterworth-Heinemann, Oxford, Massachusetts, 689p.

ANEXO A – DISTRIBUIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS VERTICAIS ATUANTES NO SOLO

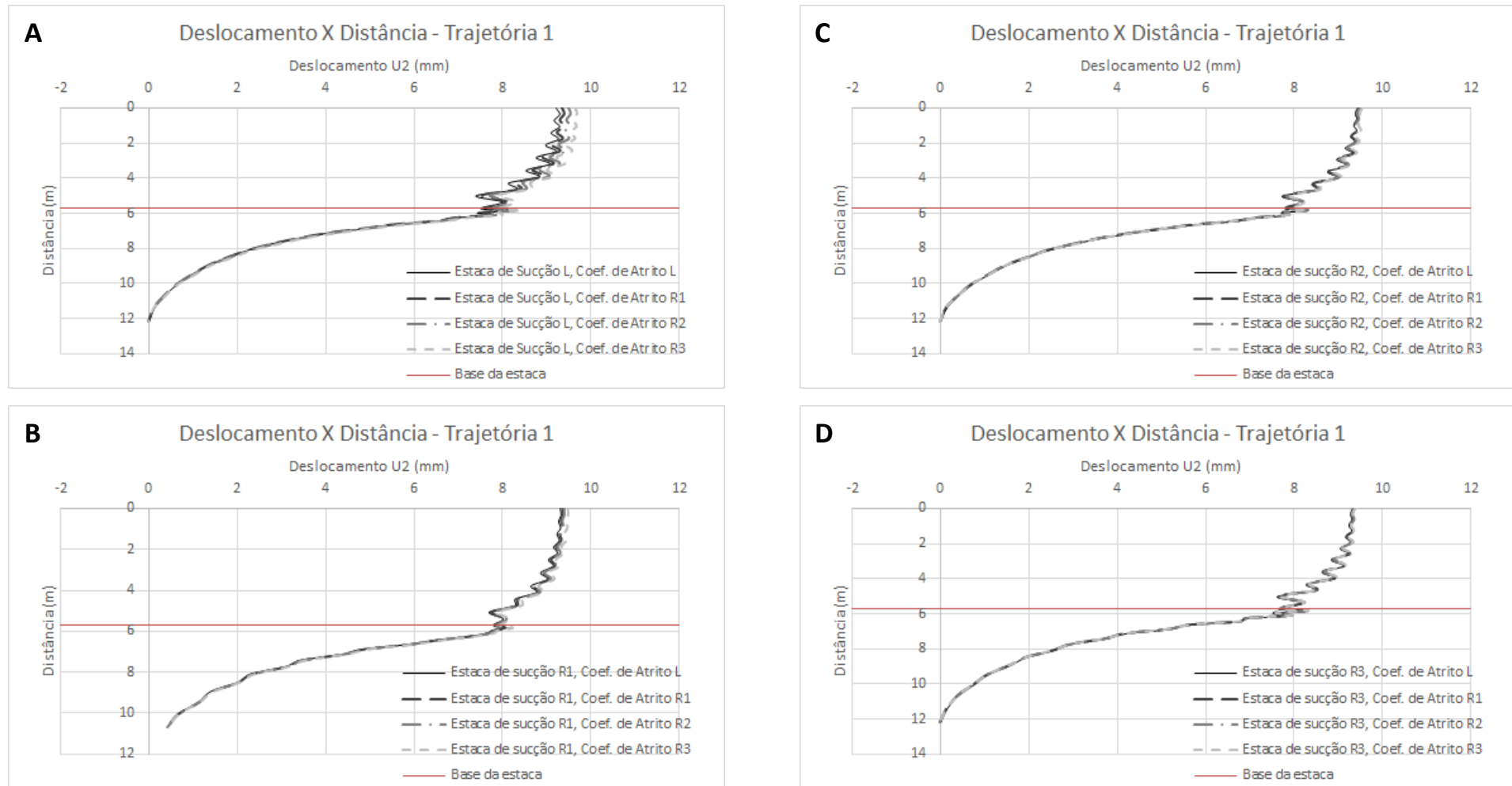


Figura 67: Gráfico de deslocamento por distância da Trajetória 1 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

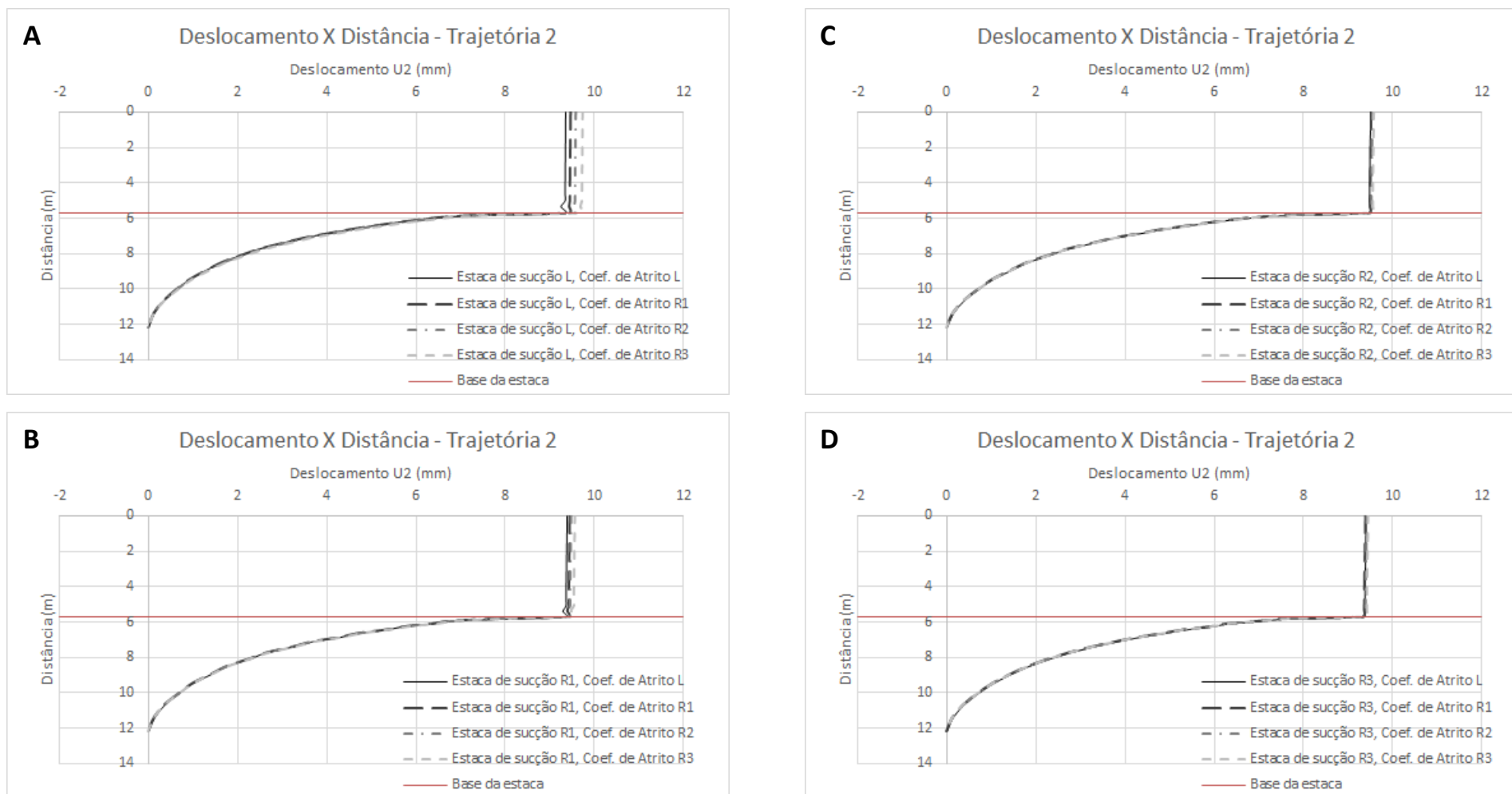


Figura 68: Gráfico de deslocamento por distância da Trajetória 2 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

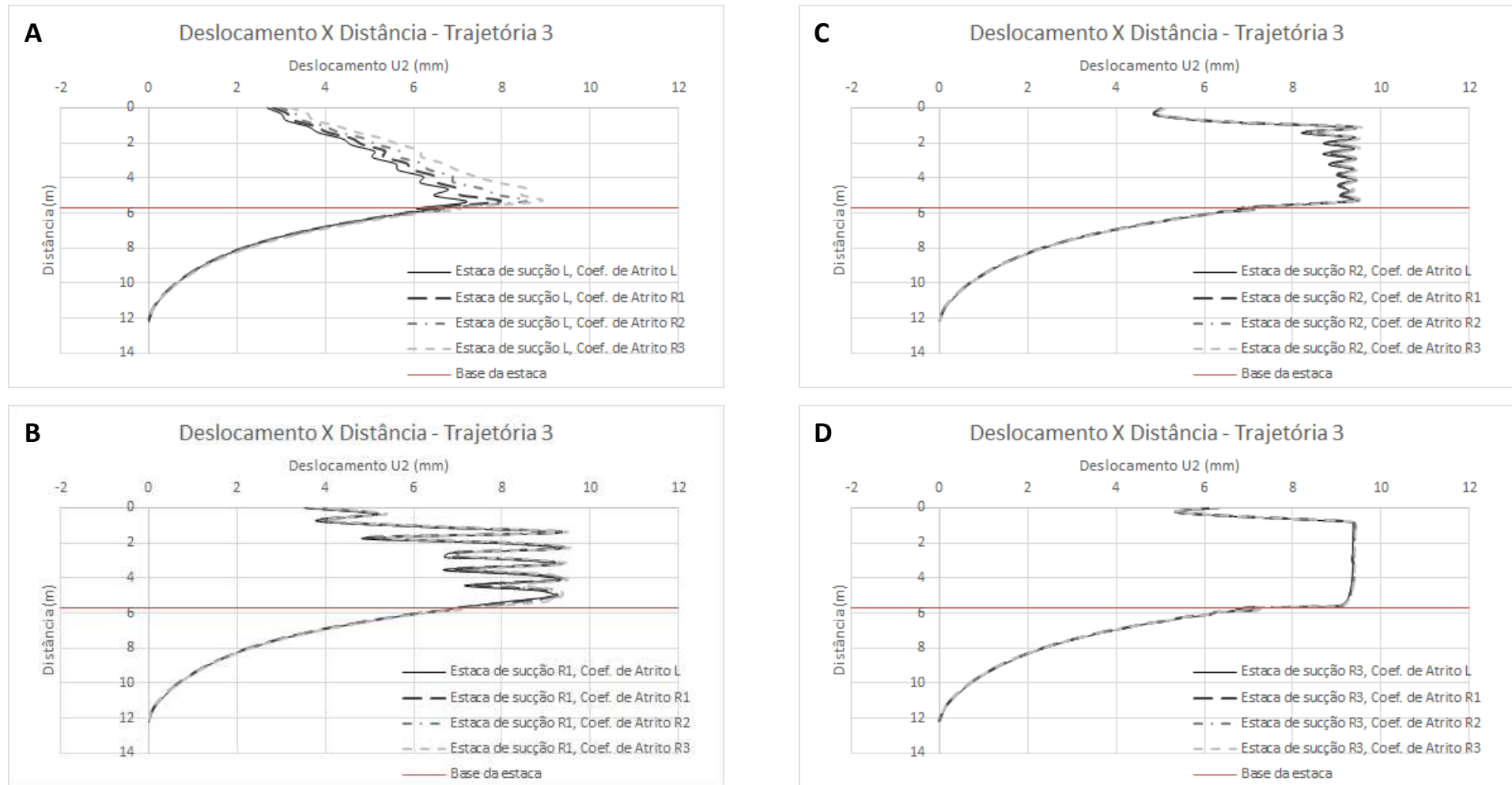


Figura 69: Gráfico de deslocamento por distância da Trajetória 3 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

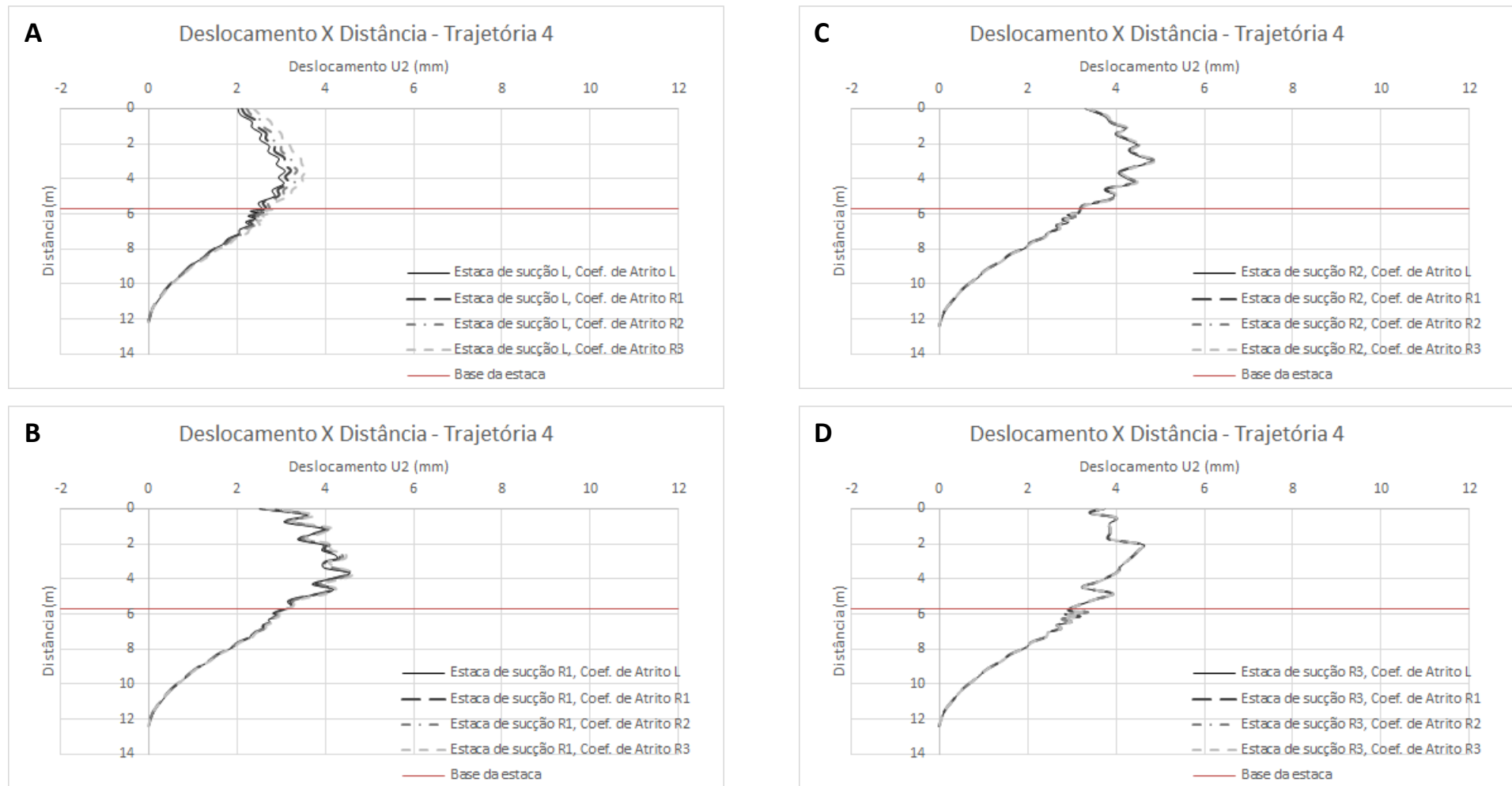


Figura 70: Gráfico de deslocamento por distância da Trajetória 4 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

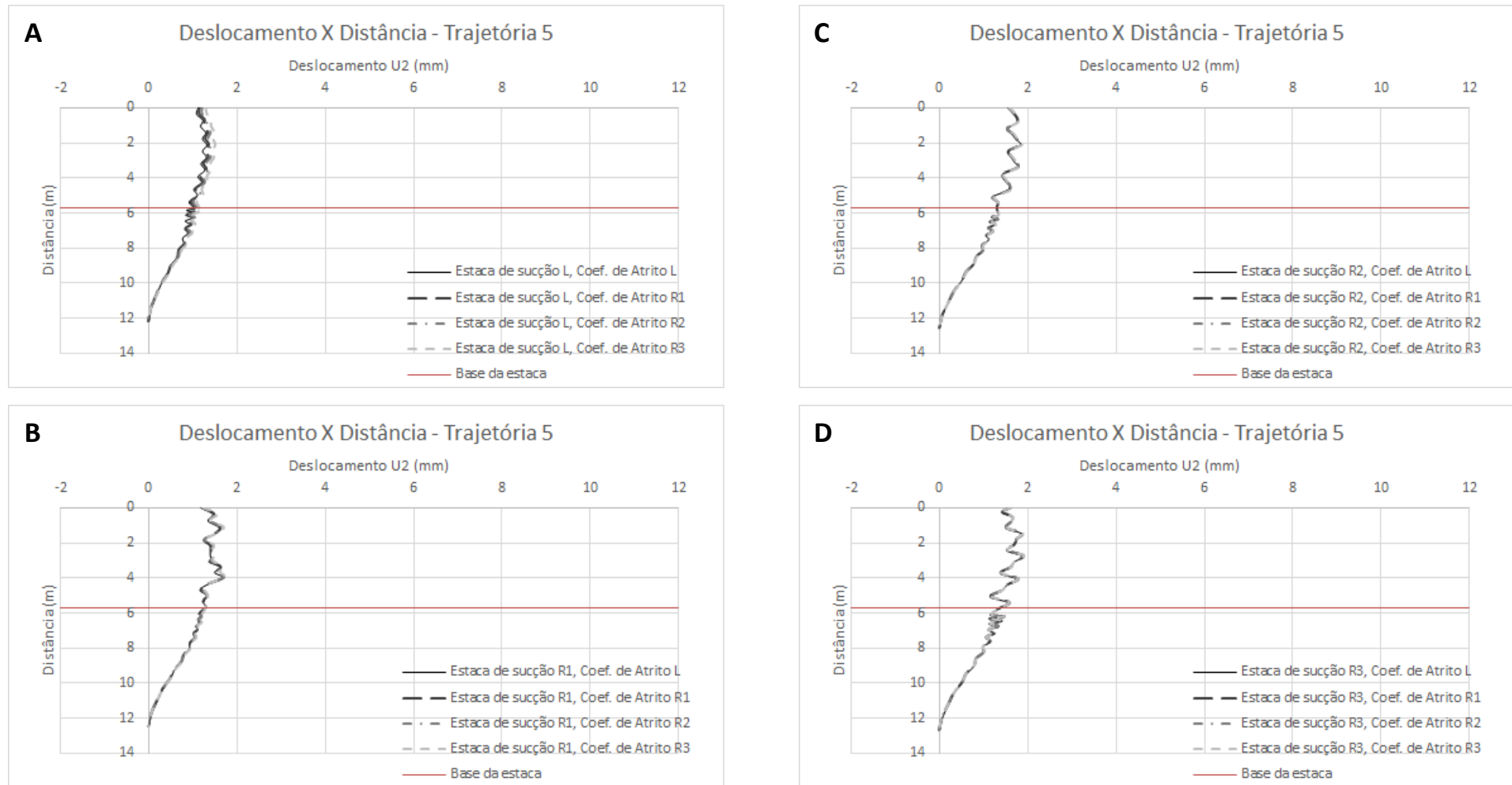


Figura 71: Gráfico de deslocamento por distância da Trajetória 5 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

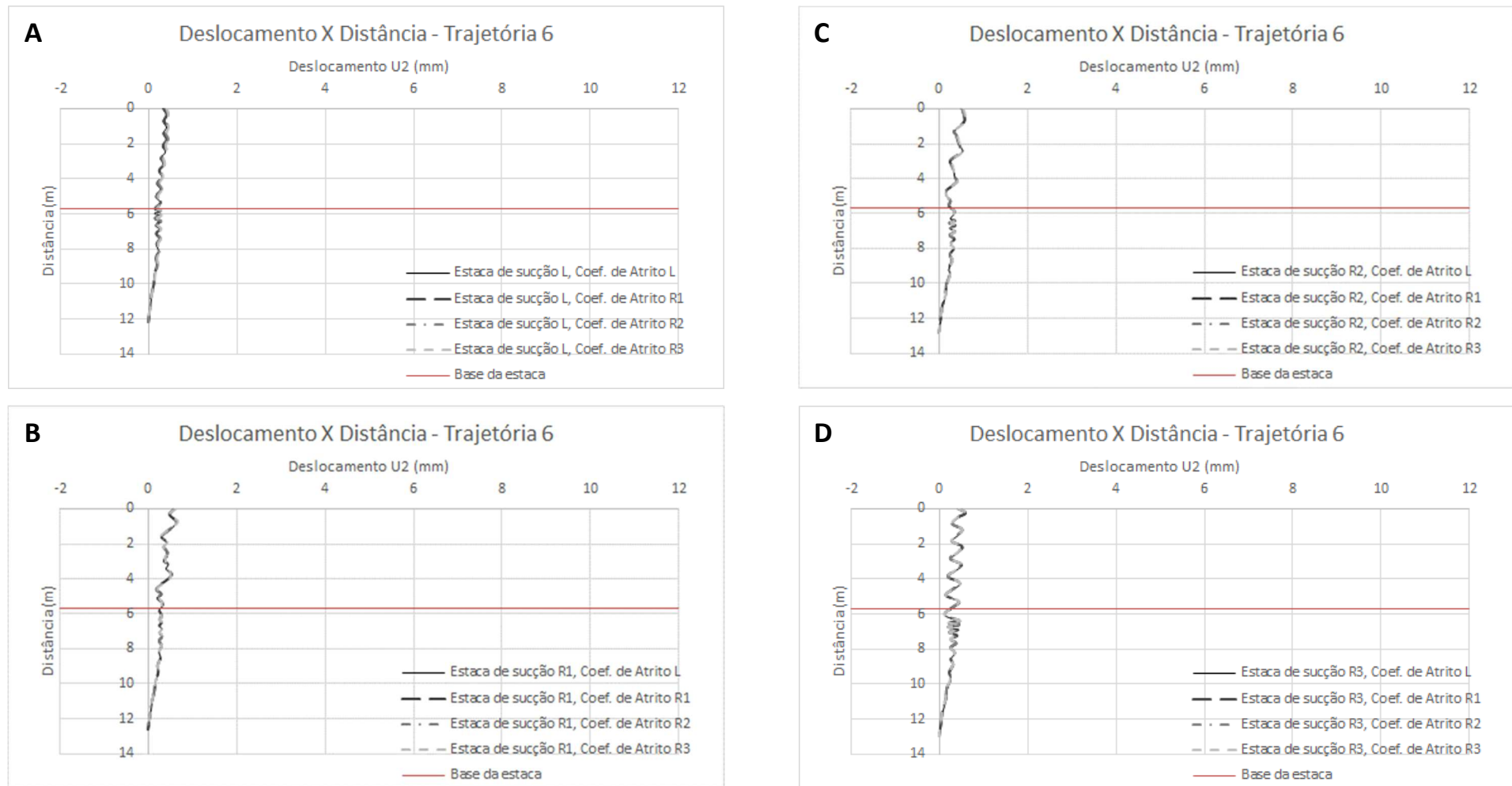


Figura 72: Gráfico de deslocamento por distância da Trajetória 6 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

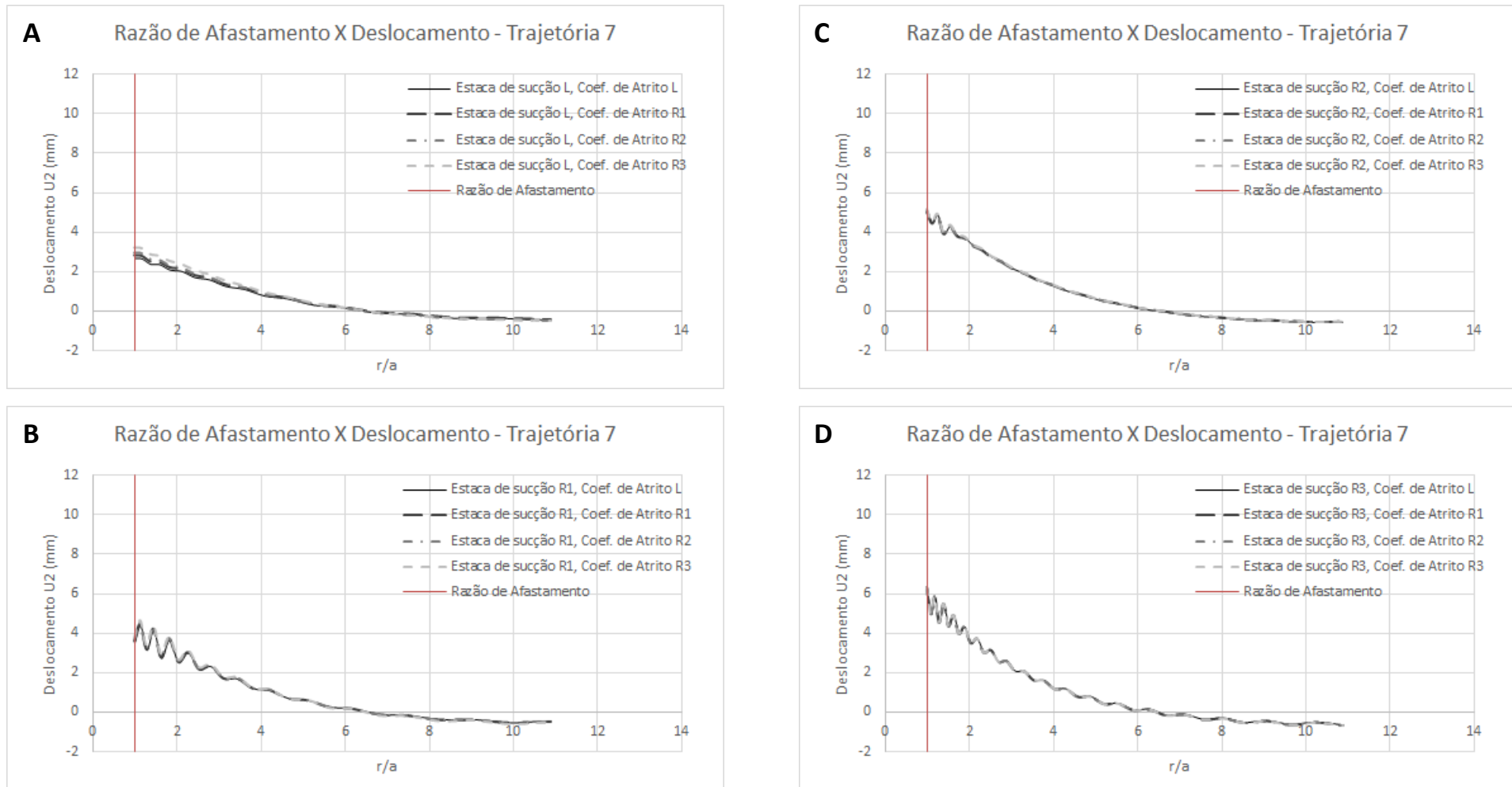


Figura 73: Gráfico de deslocamento por distância da Trajetória 7 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

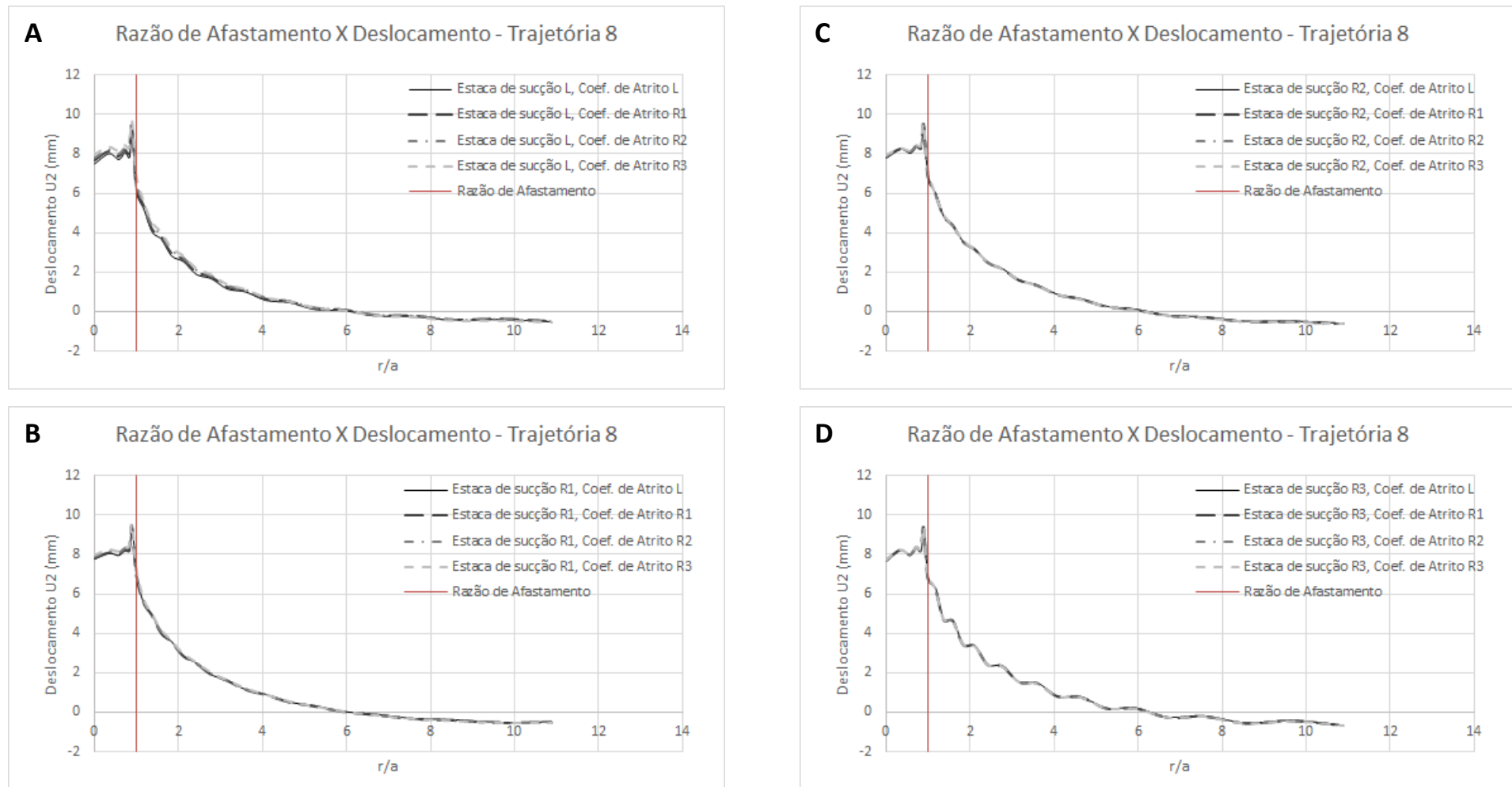


Figura 74: Gráfico de deslocamento por distância da Trajetória 8 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

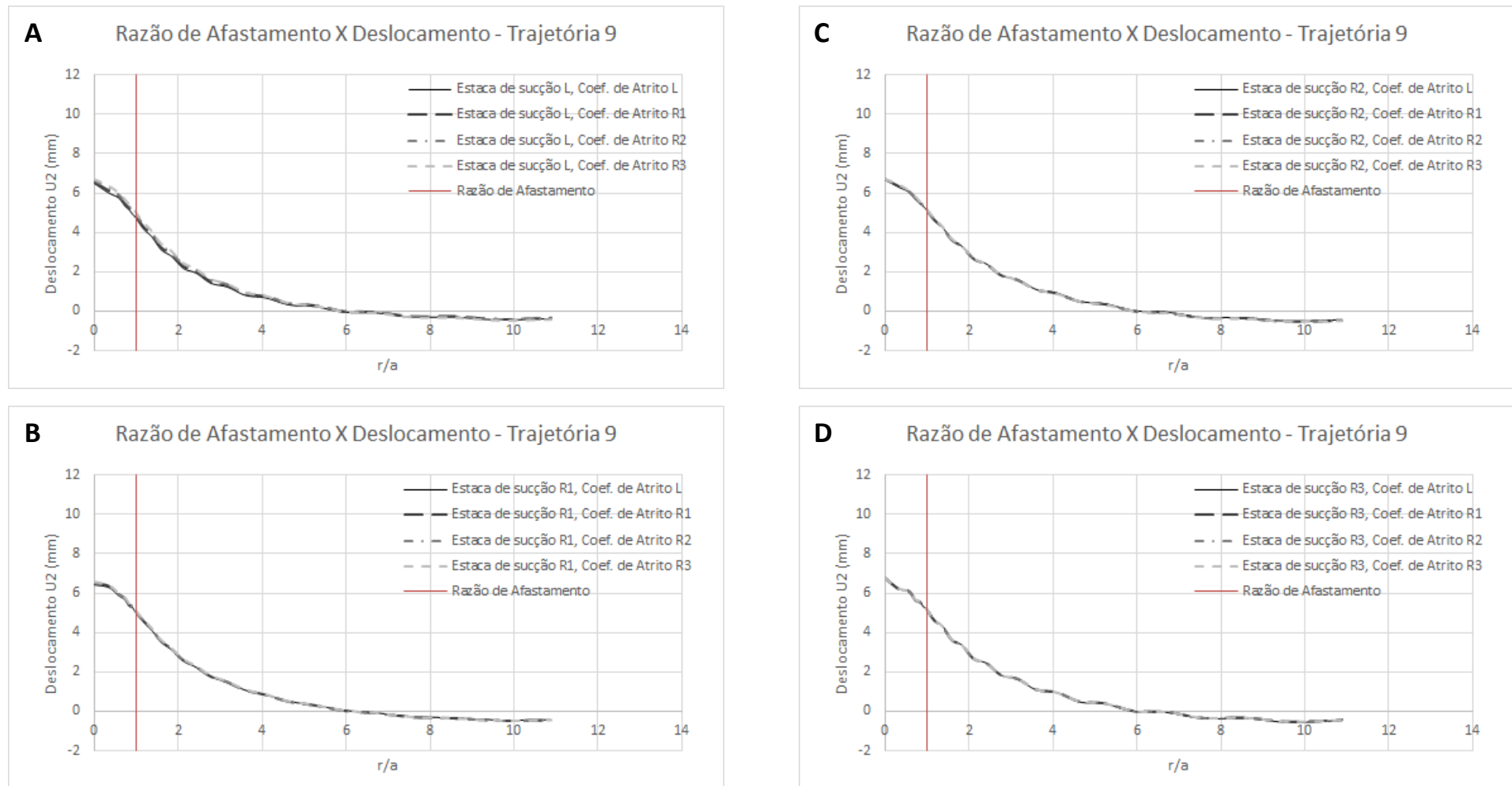


Figura 75: Gráfico de deslocamento por distância da Trajetória 9 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

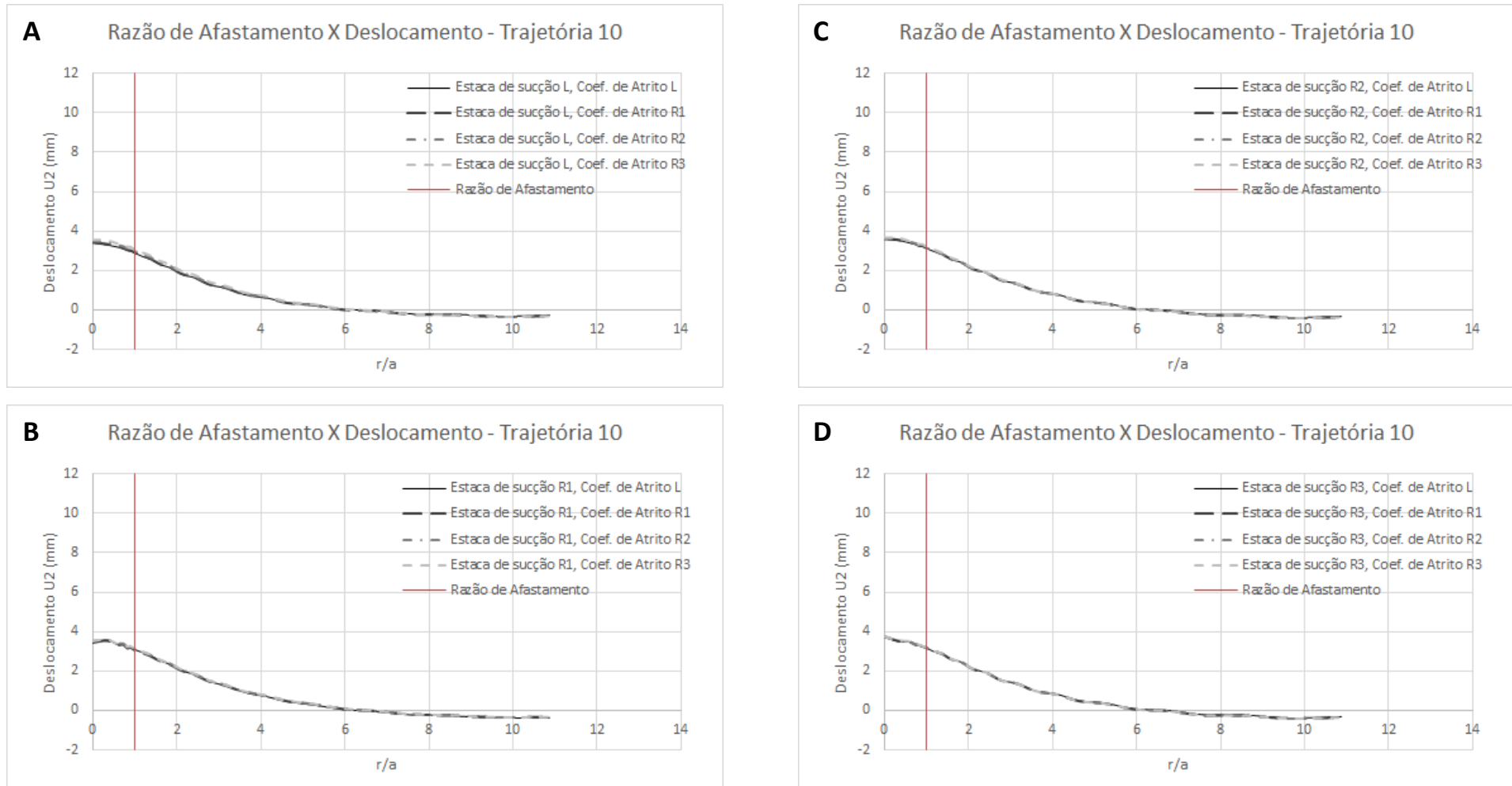


Figura 76: Gráfico de deslocamento por distância da Trajetória 10 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

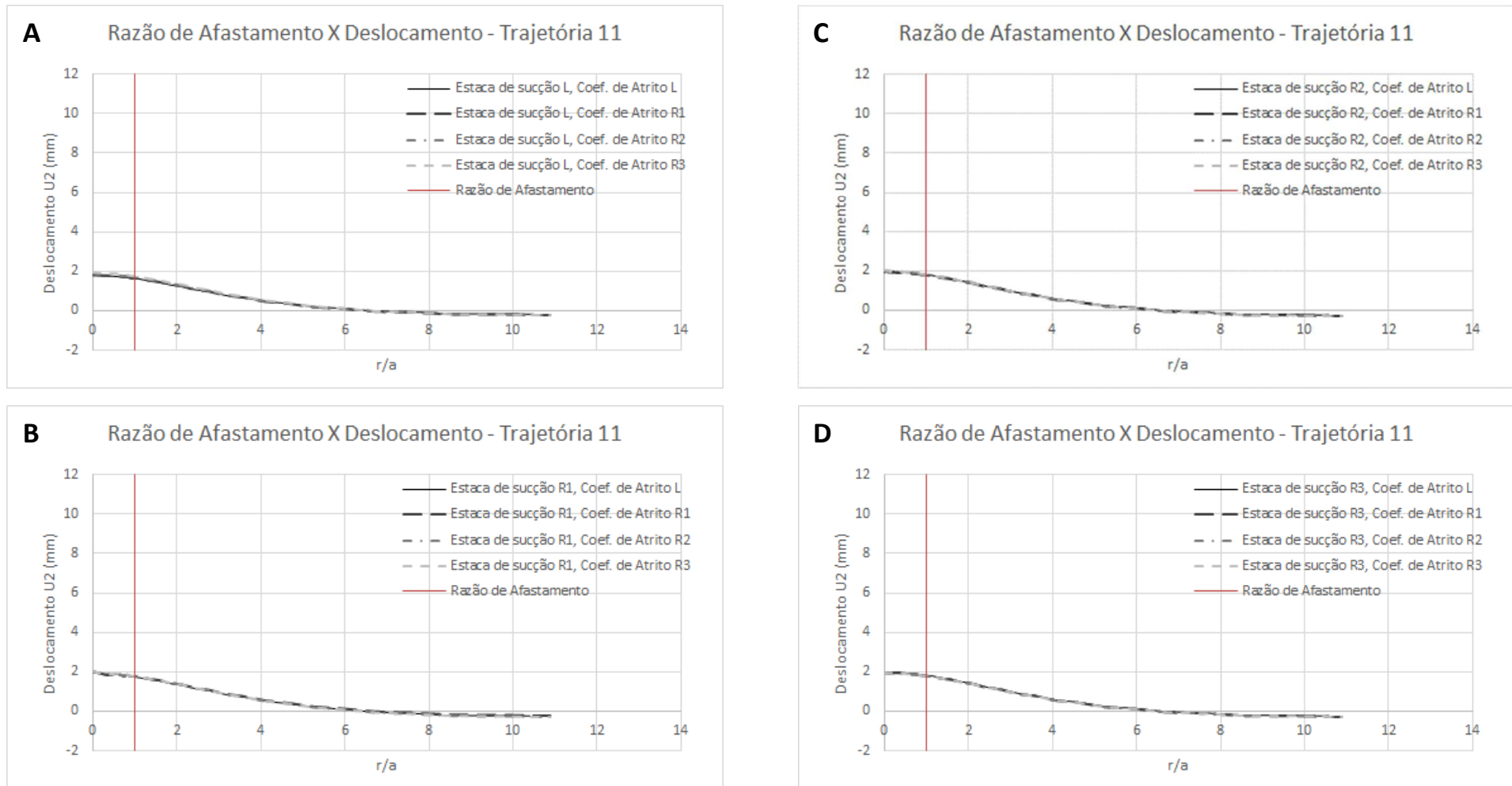


Figura 77: Gráfico de deslocamento por distância da Trajetória 11 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

ANEXO B – DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES CISALHANTES ATUANTES NO SOLO

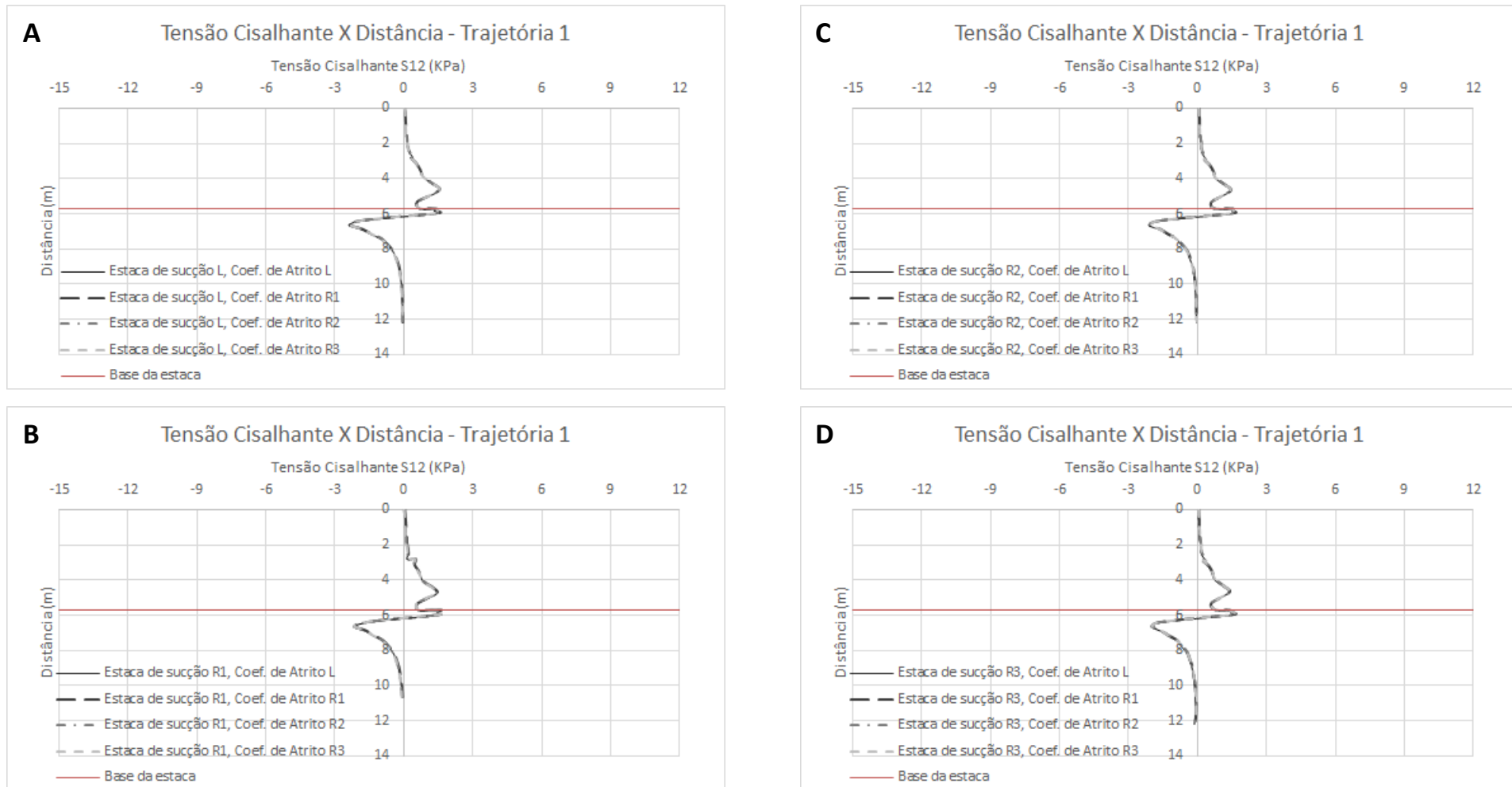


Figura 78: Gráfico de tensão cisalhante por distância da Trajetória 1 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

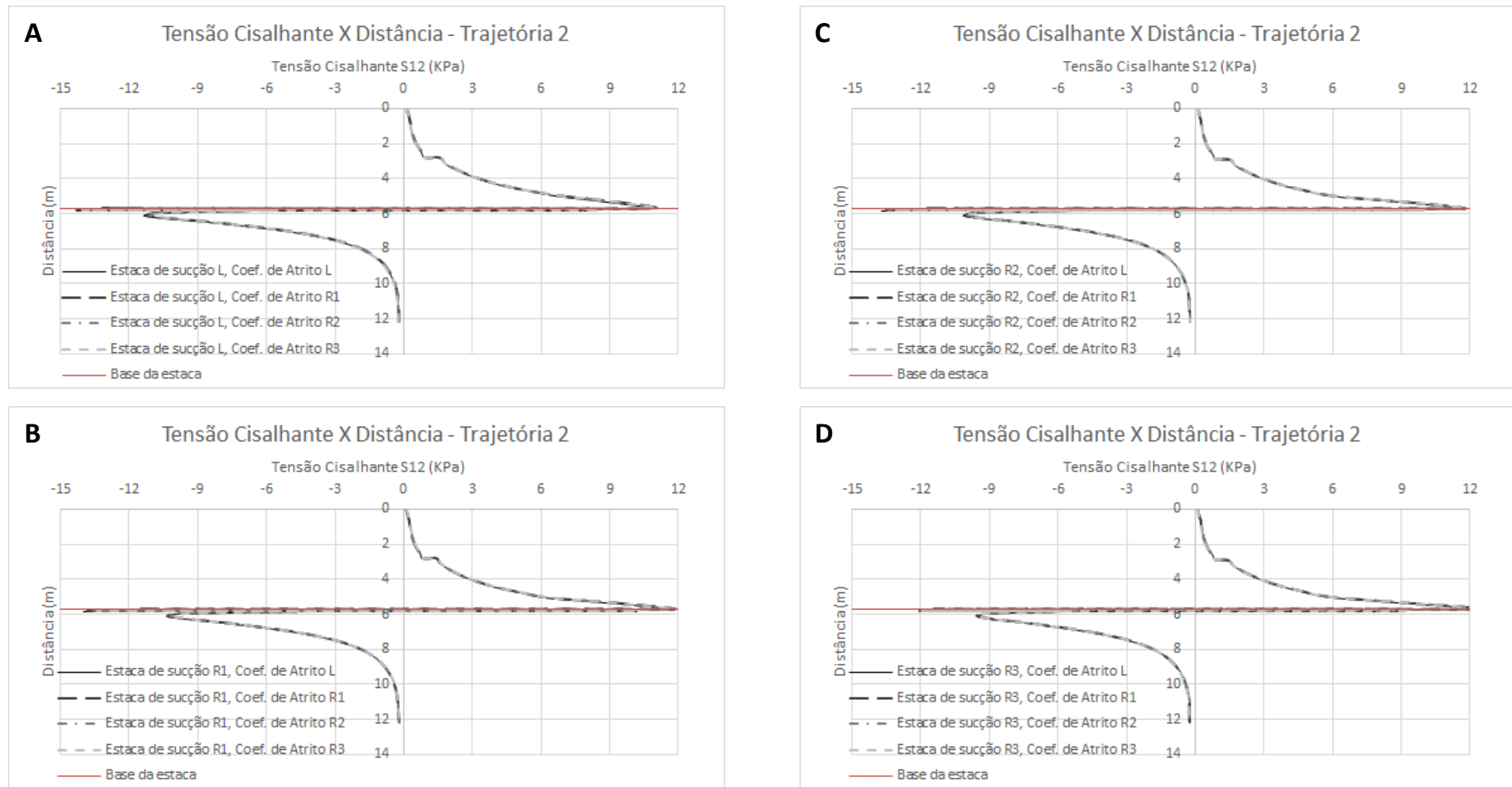


Figura 79: Gráfico de tensão cisalhante por distância da Trajetória 2 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

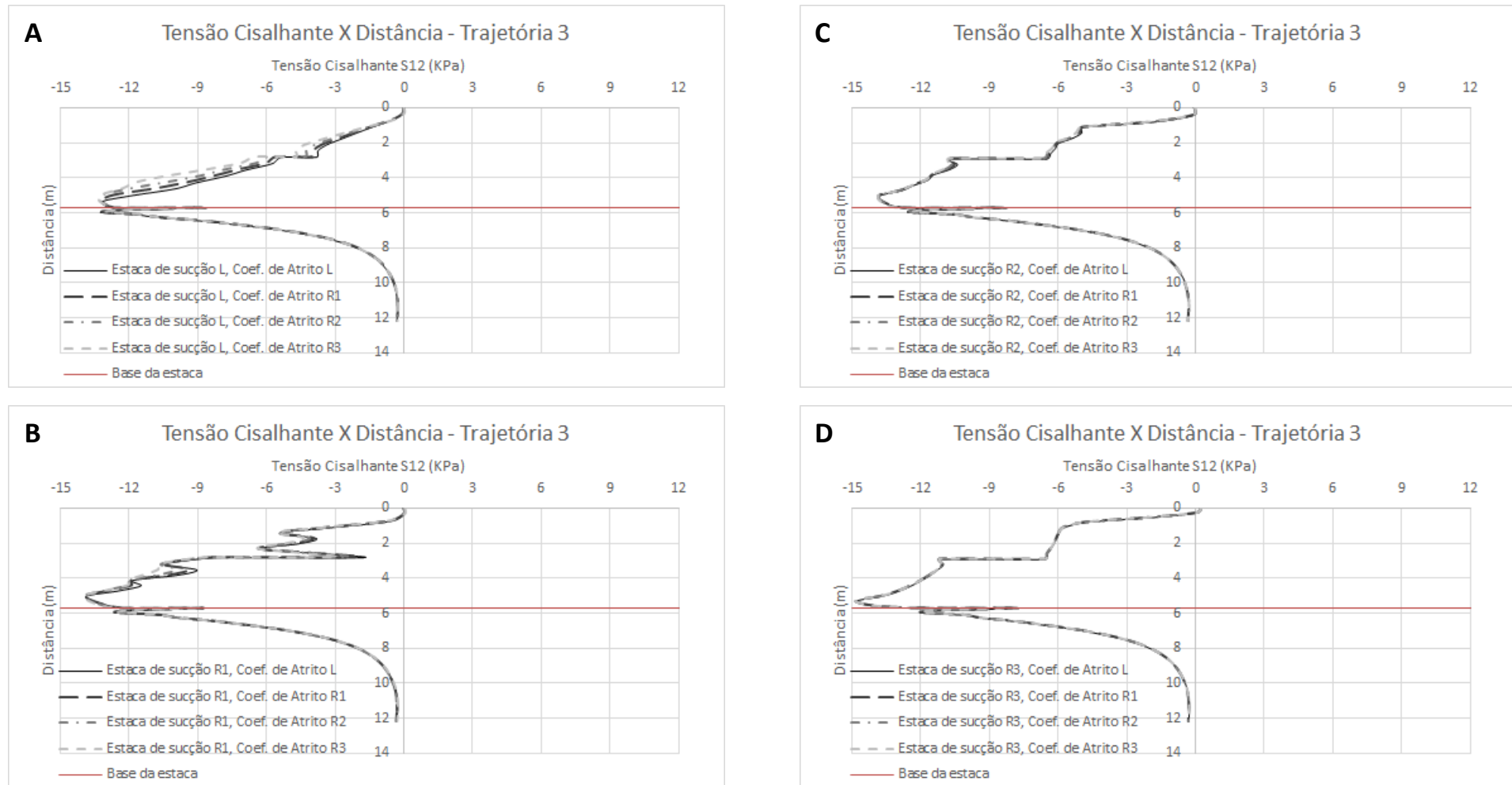


Figura 80: Gráfico de tensão cisalhante por distância da Trajetória 3 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

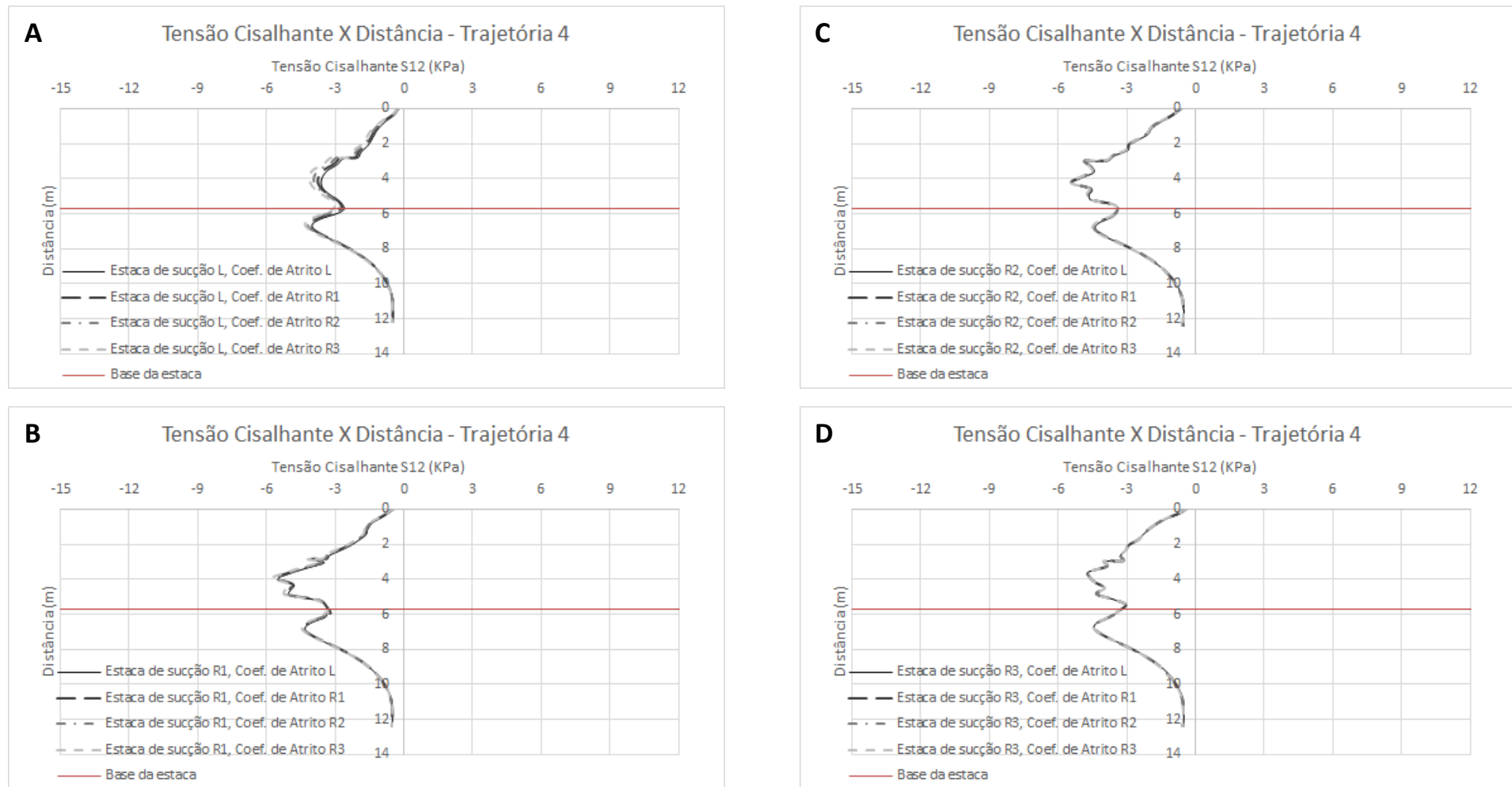


Figura 81: Gráfico de tensão cisalhante por distância da Trajetória 4 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

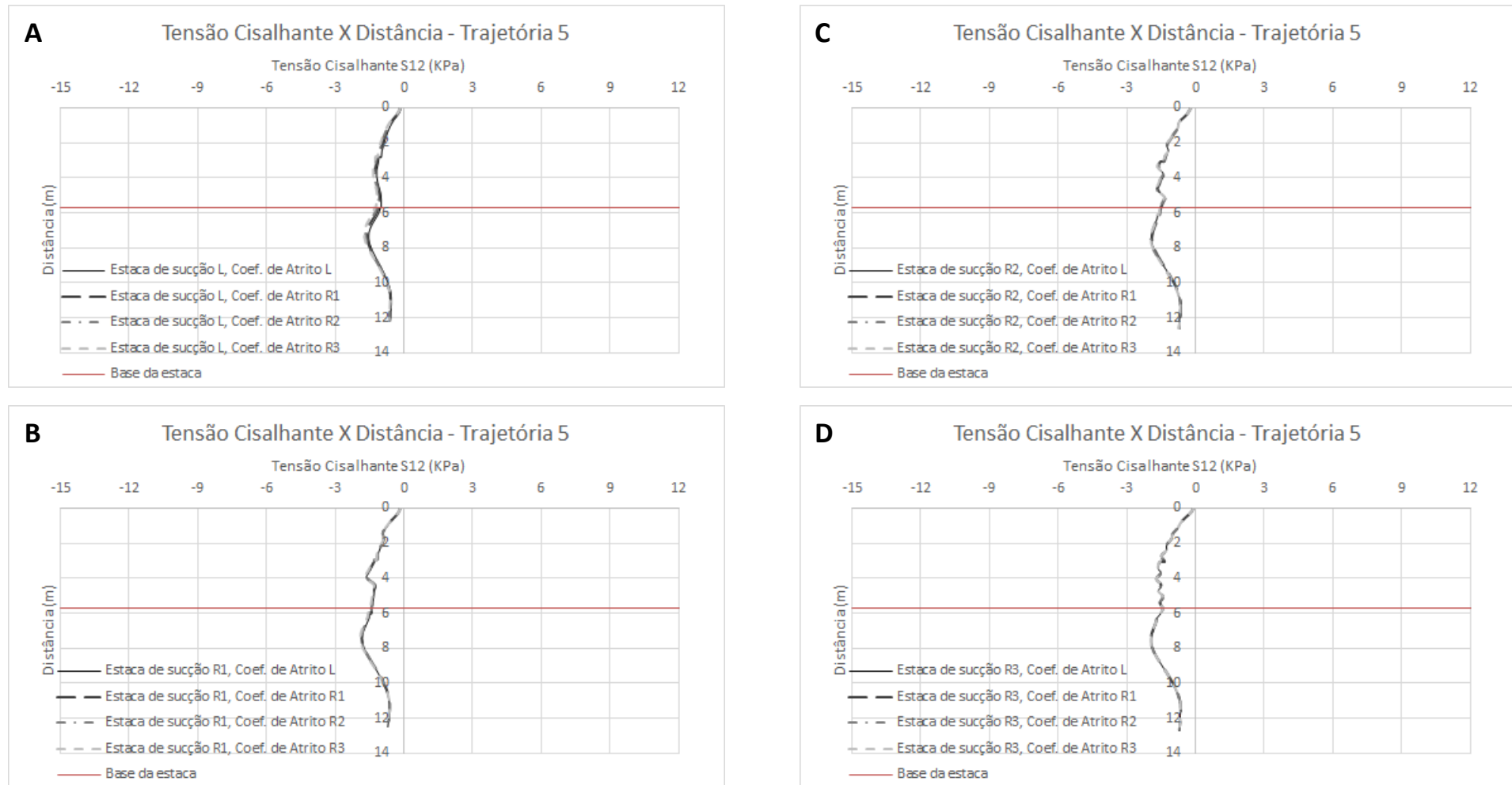


Figura 82: Gráfico de tensão cisalhante por distância da Trajetória 5 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

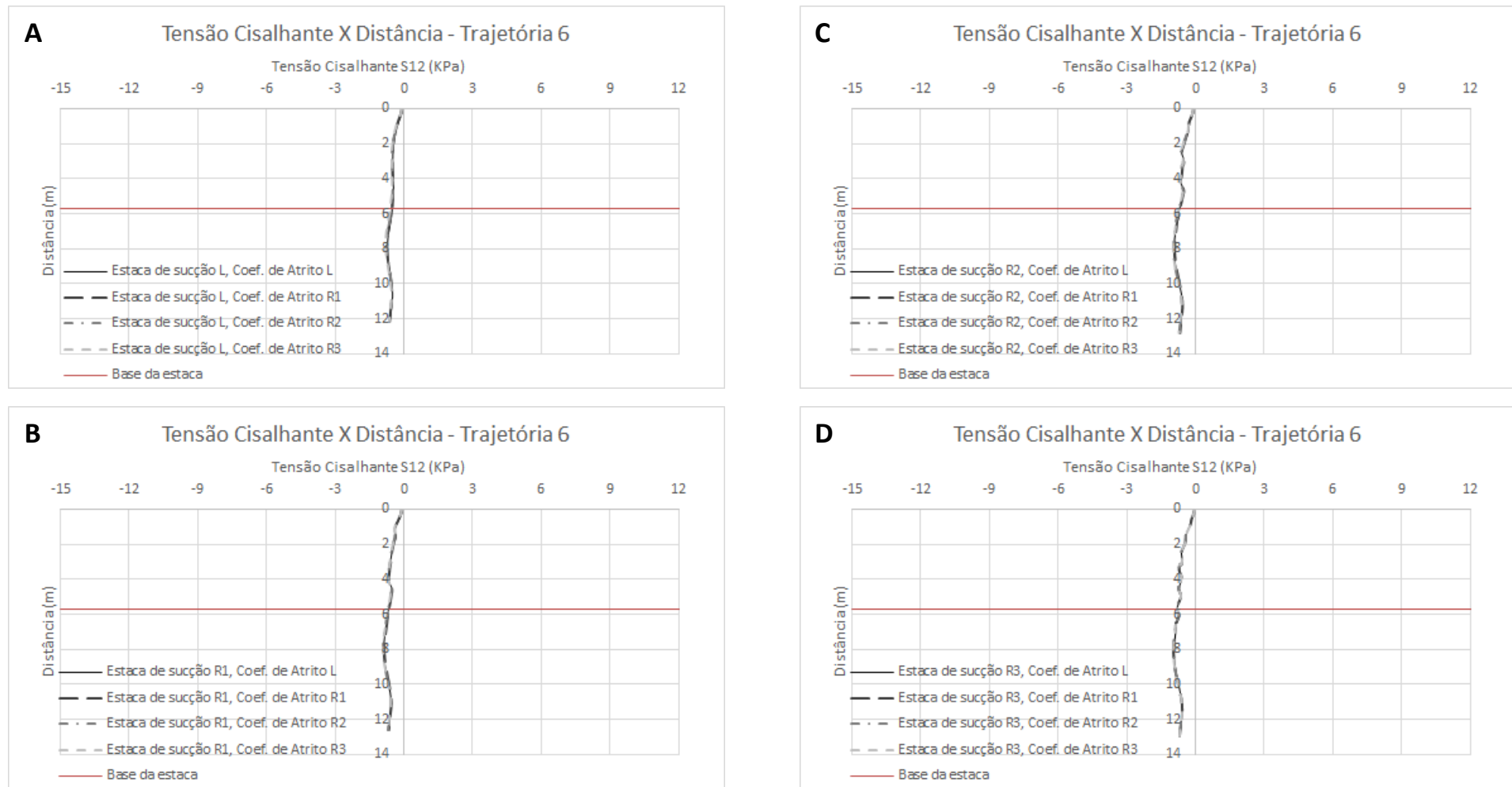


Figura 83: Gráfico de tensão cisalhante por distância da Trajetória 6 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

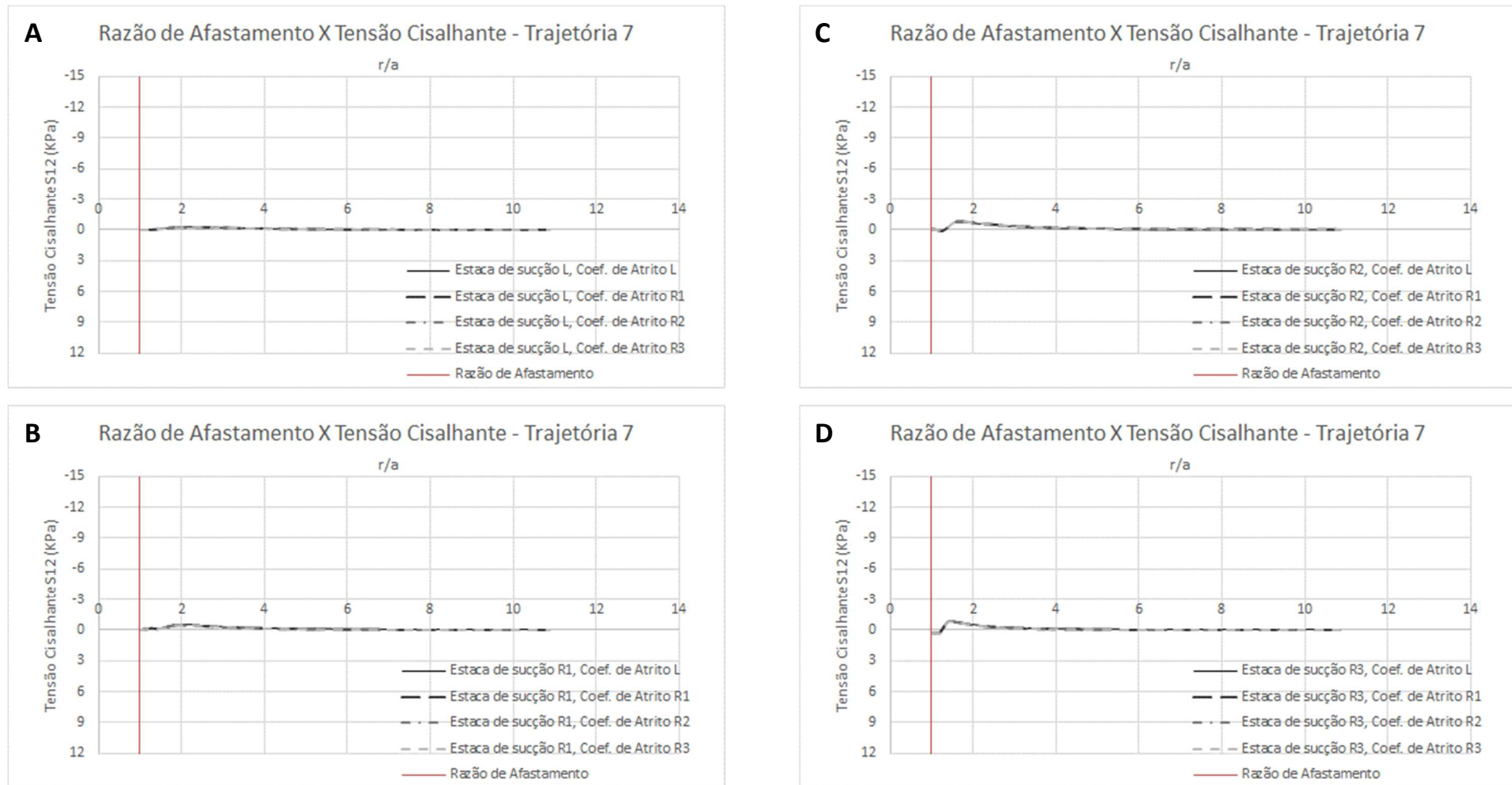


Figura 84: Gráfico de tensão cisalhante por distância da Trajetória 7 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

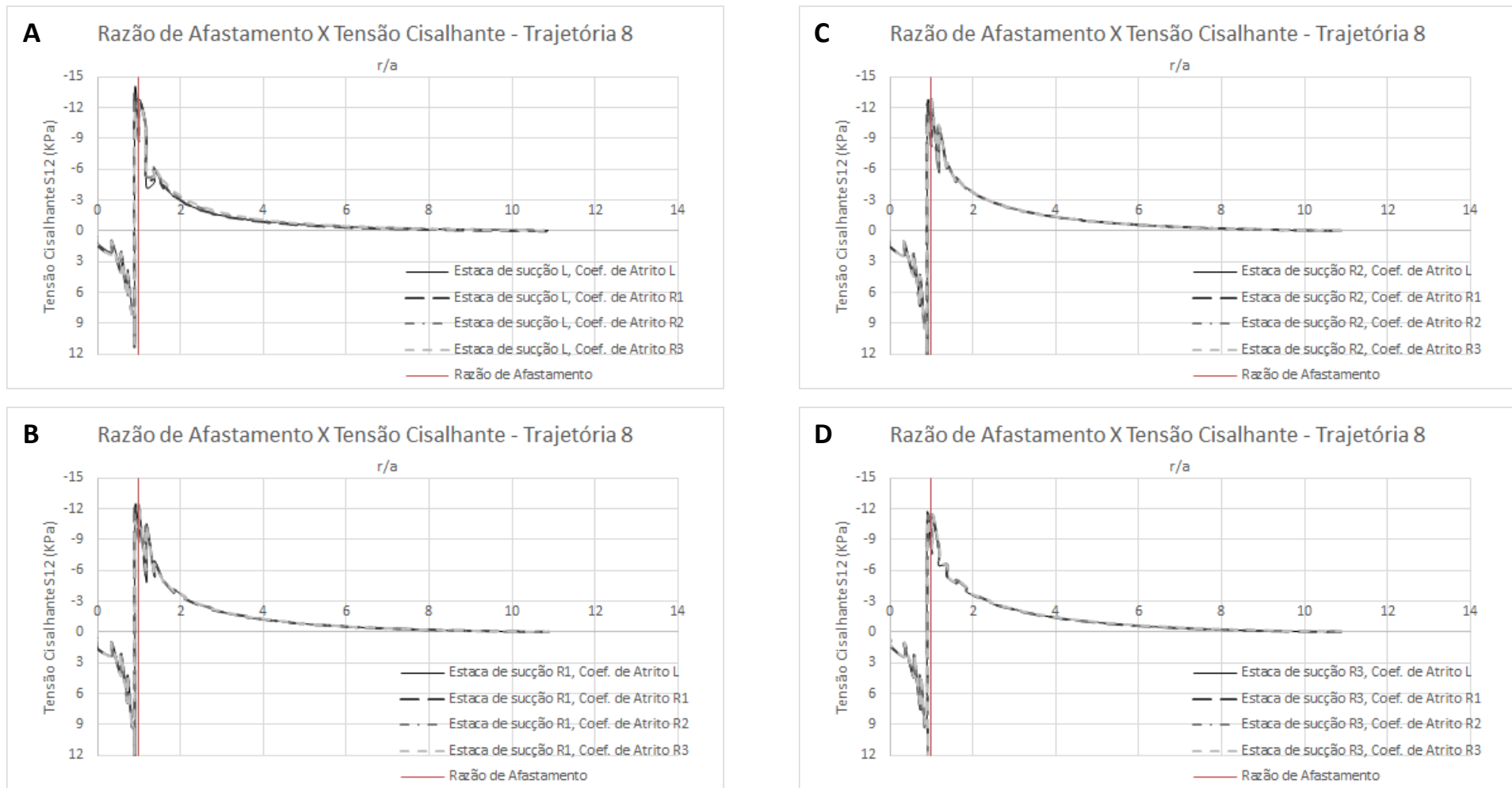


Figura 85: Gráfico de tensão cisalhante por distância da Trajetória 8 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

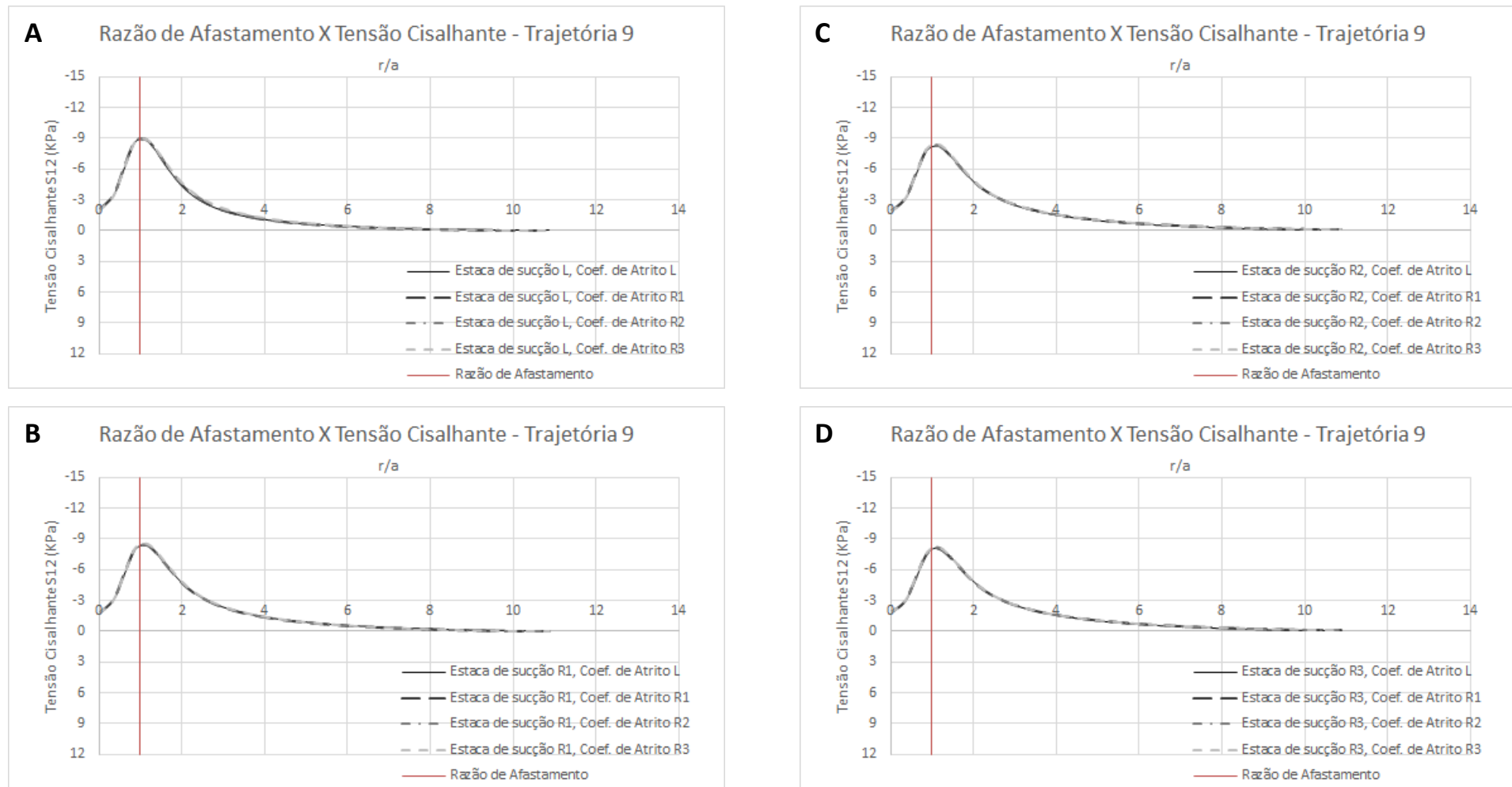


Figura 86: Gráfico de tensão cisalhante por distância da Trajetória 9 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

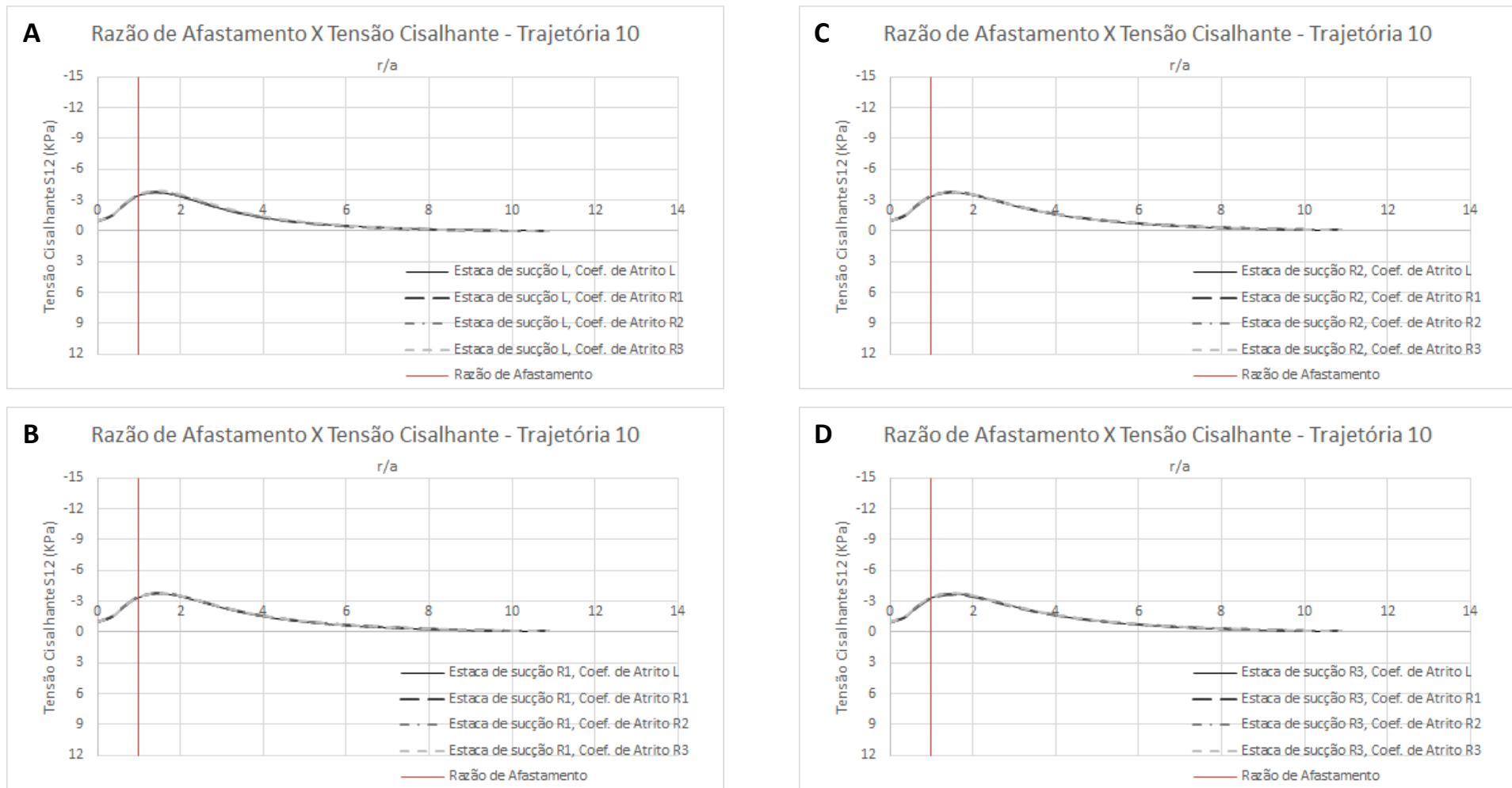


Figura 87: Gráfico de tensão cisalhante por distância da Trajetória 10 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

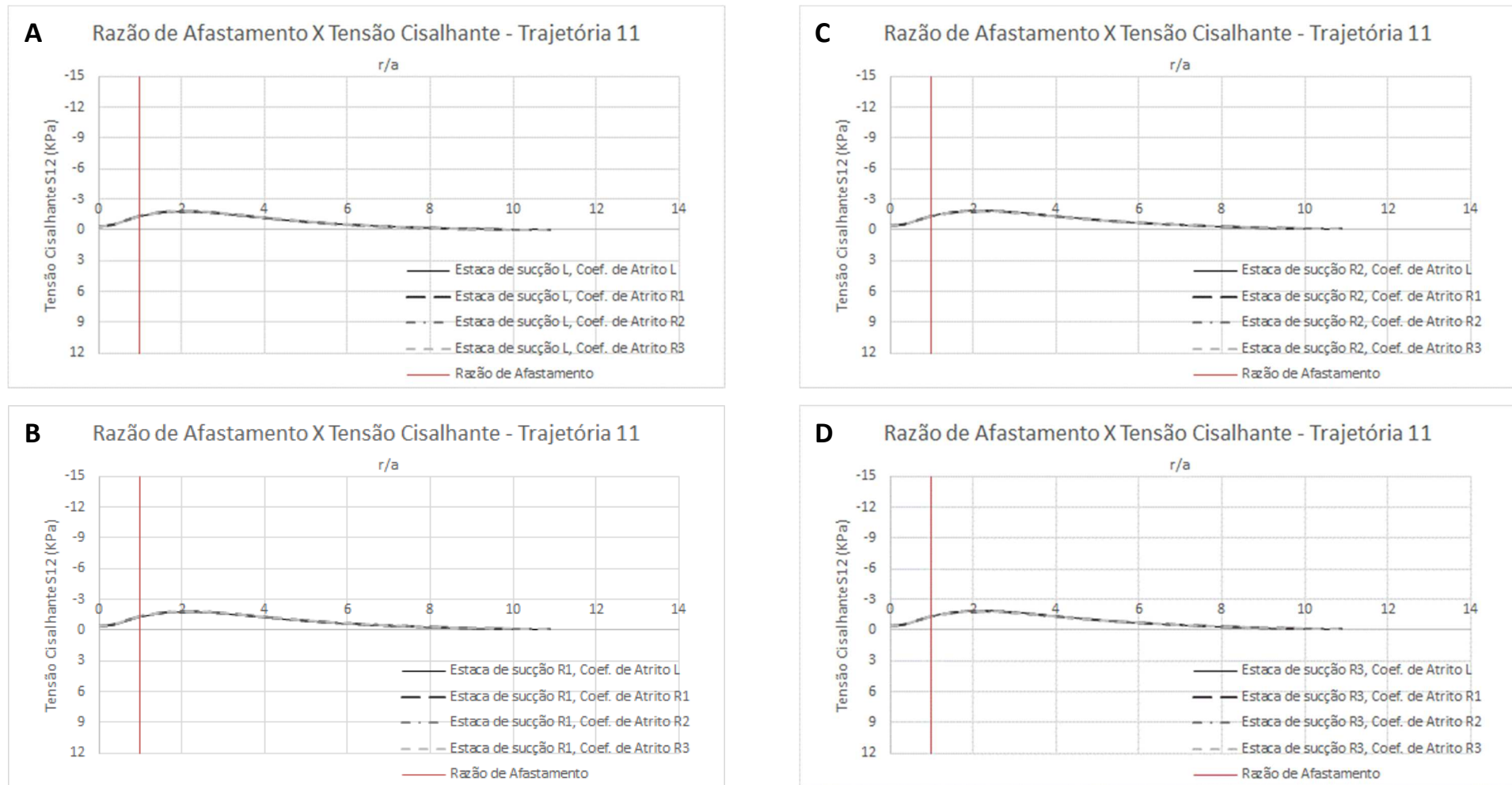


Figura 88: Gráfico de tensão cisalhante por distância da Trajetória 11 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

ANEXO C – DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES NORMAIS ATUANTES NO SOLO

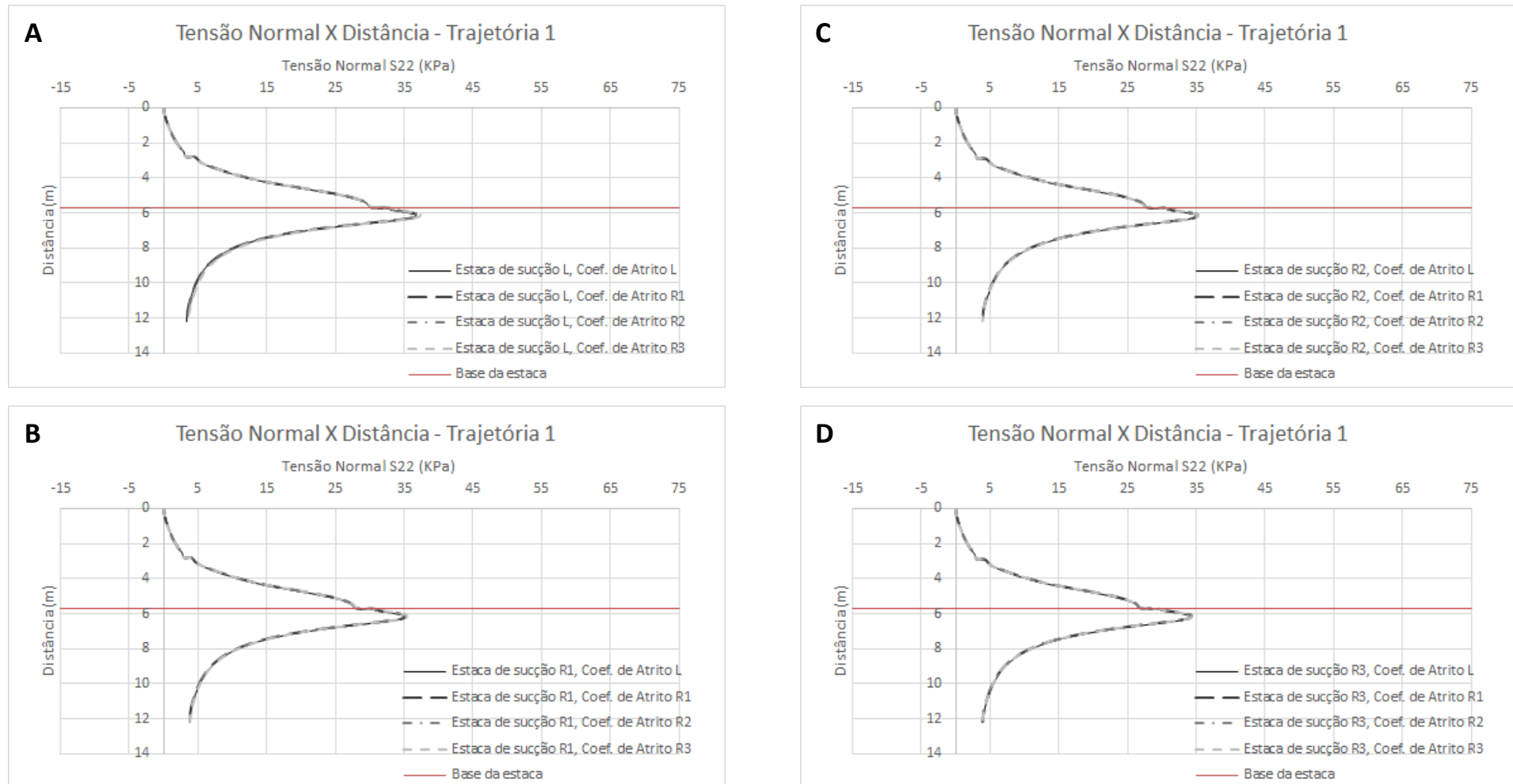


Figura 89: Gráfico de tensões normais por distância da Trajetória 1 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

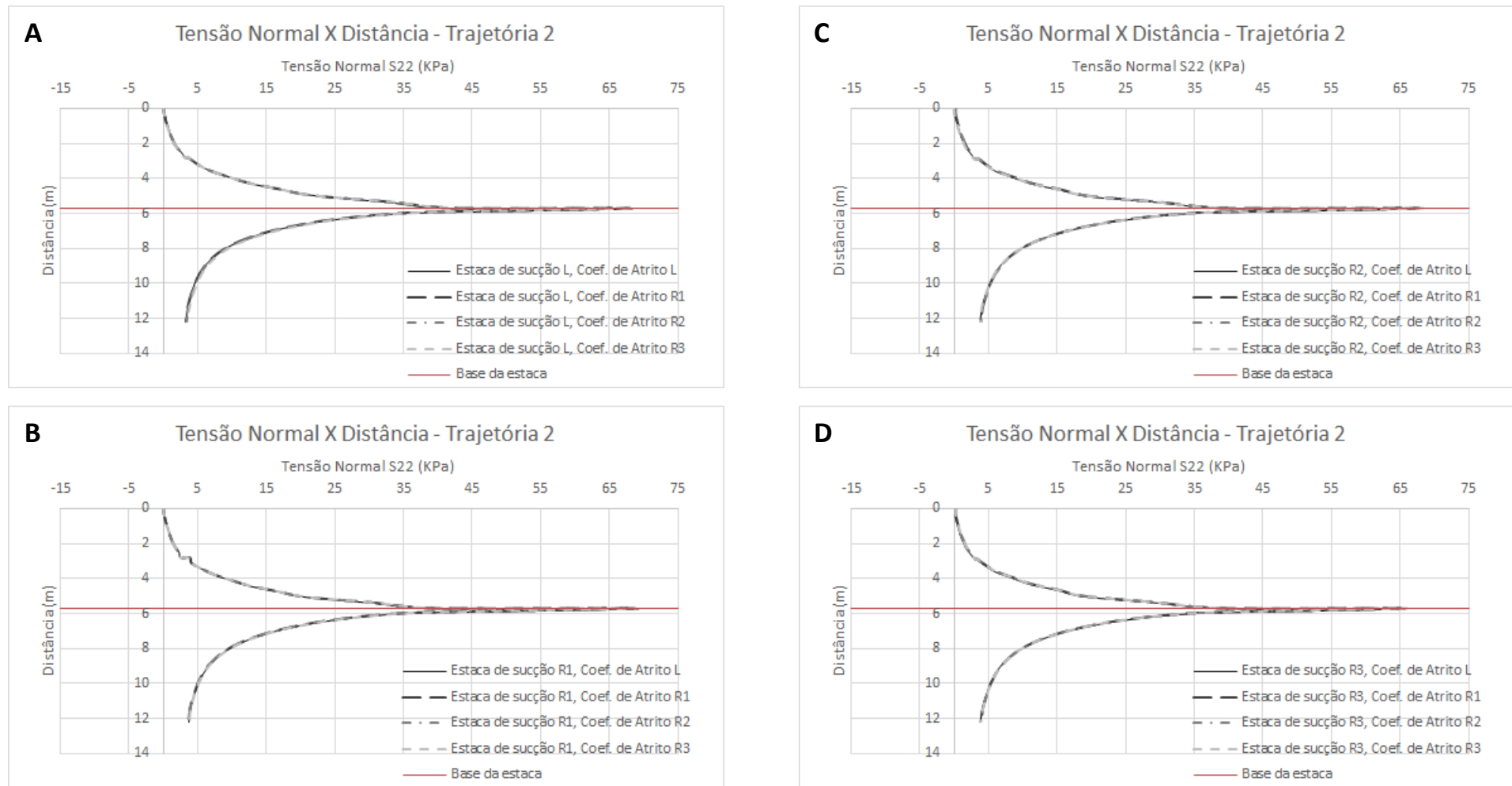


Figura 90: Gráfico de tensões normais por distância da Trajetória 2 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

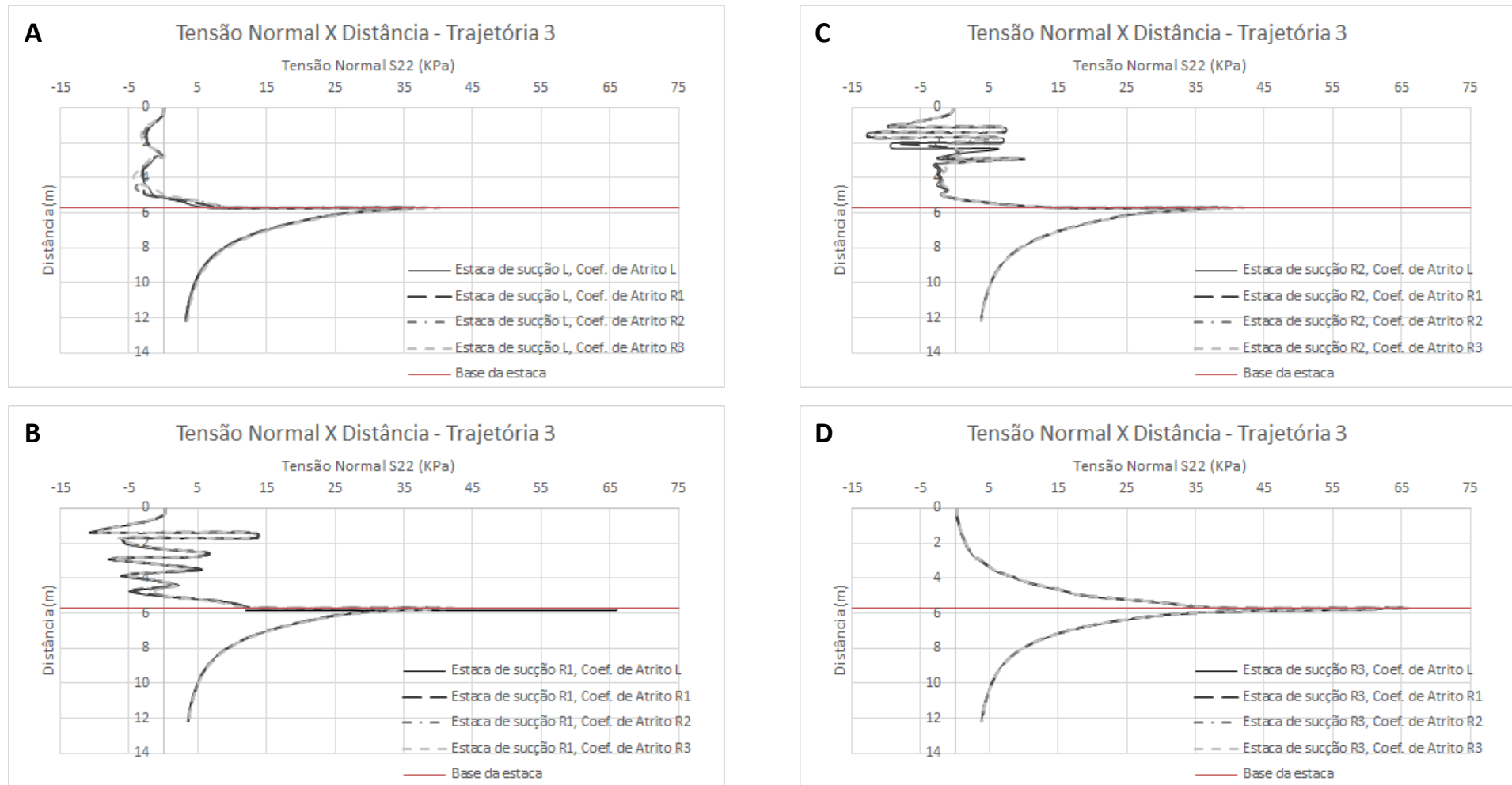


Figura 91: Gráfico de tensões normais por distância da Trajetória 3 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

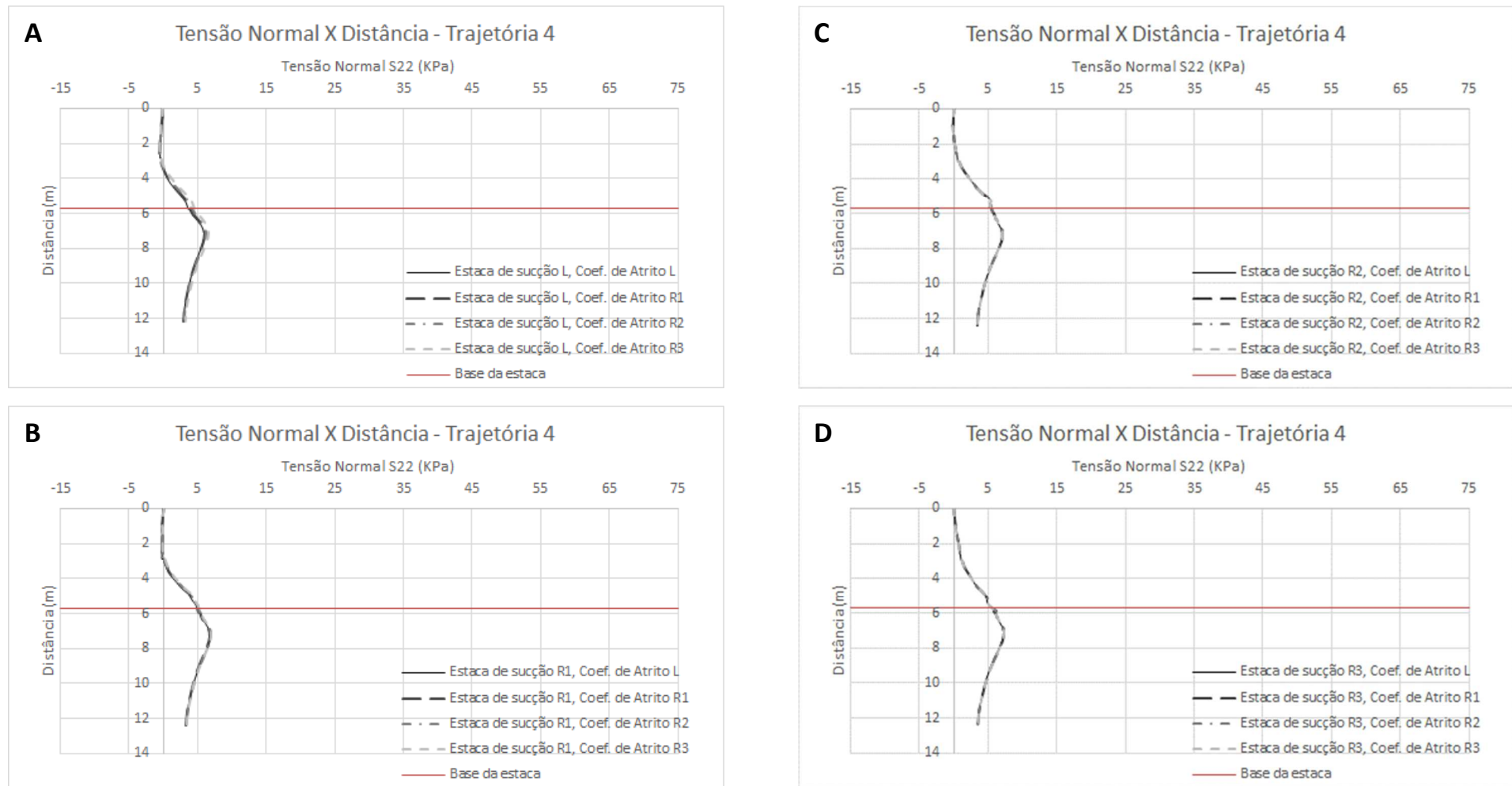


Figura 92: Gráfico de tensões normais por distância da Trajetória 4 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

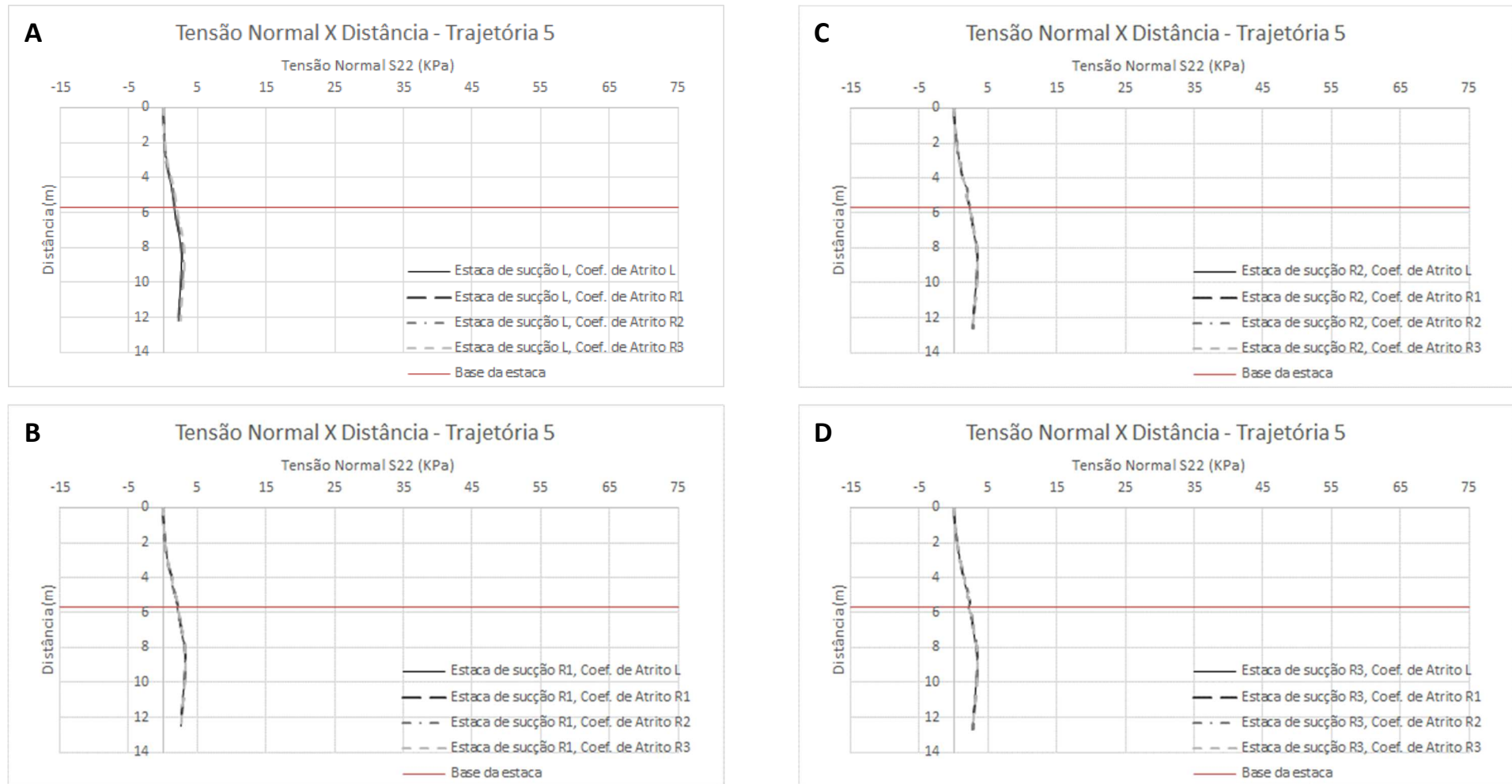


Figura 93: Gráfico de tensões normais por distância da Trajetória 5 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

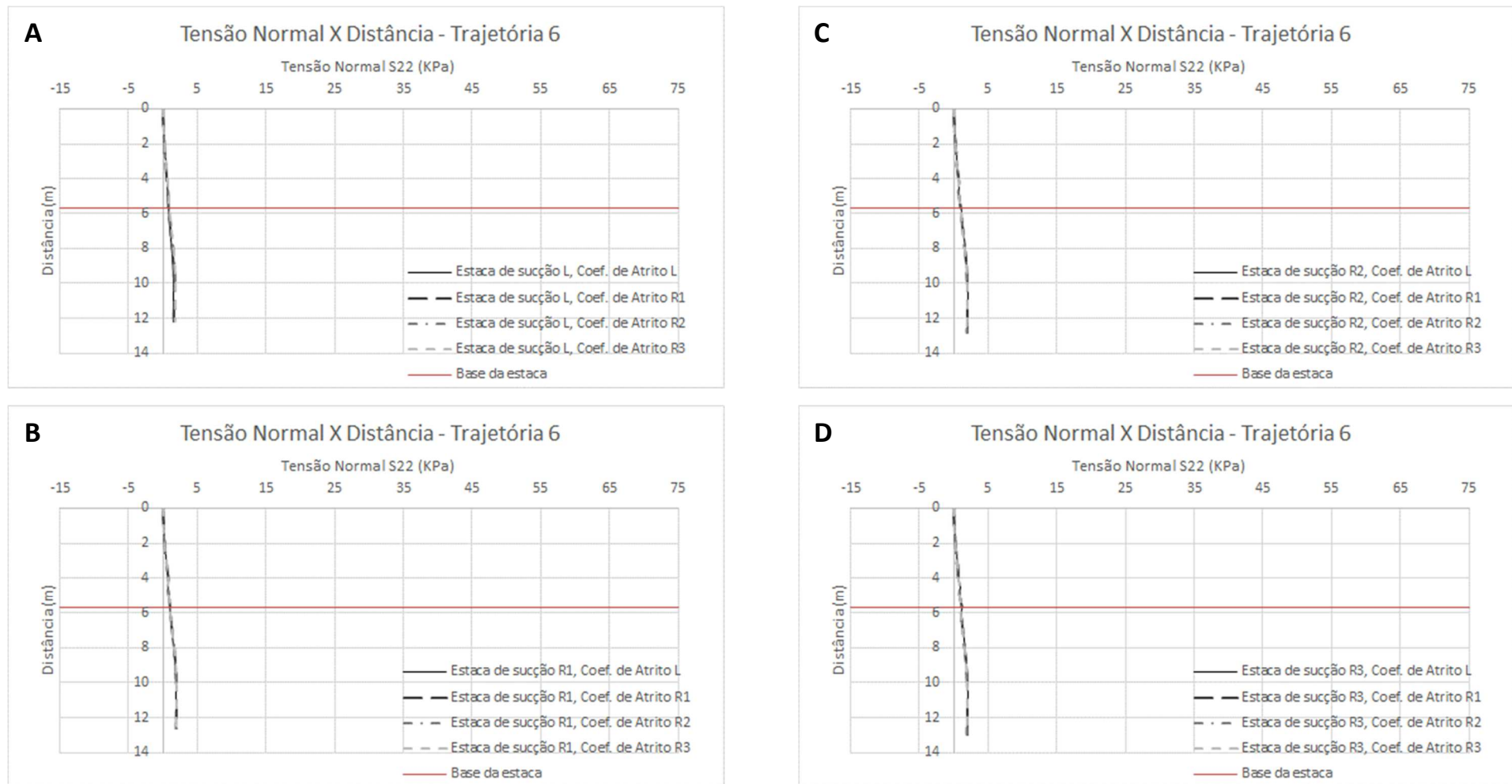


Figura 94: Gráfico de tensões normais por distância da Trajetória 6 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

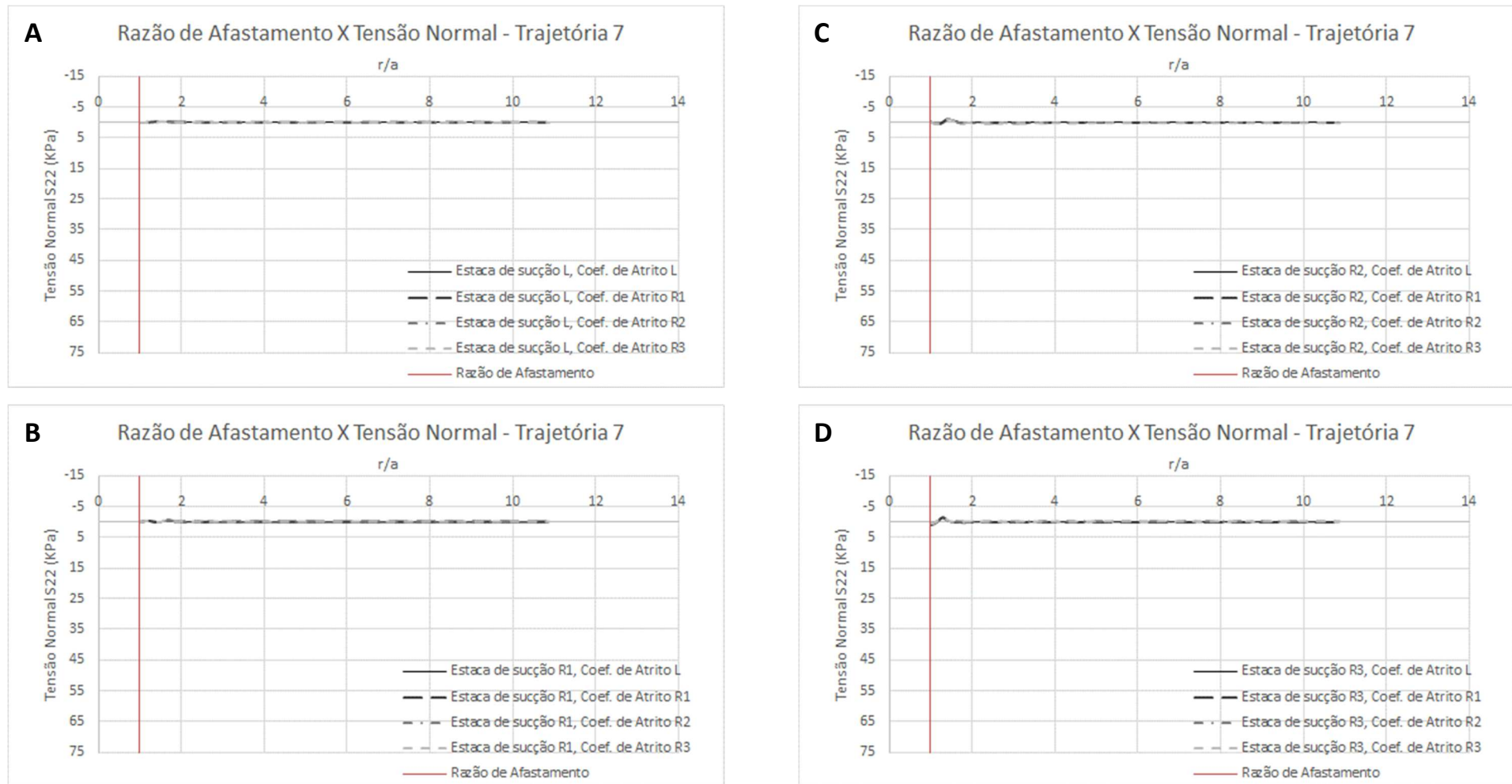


Figura 95: Gráfico de tensões normais por distância da Trajetória 7 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

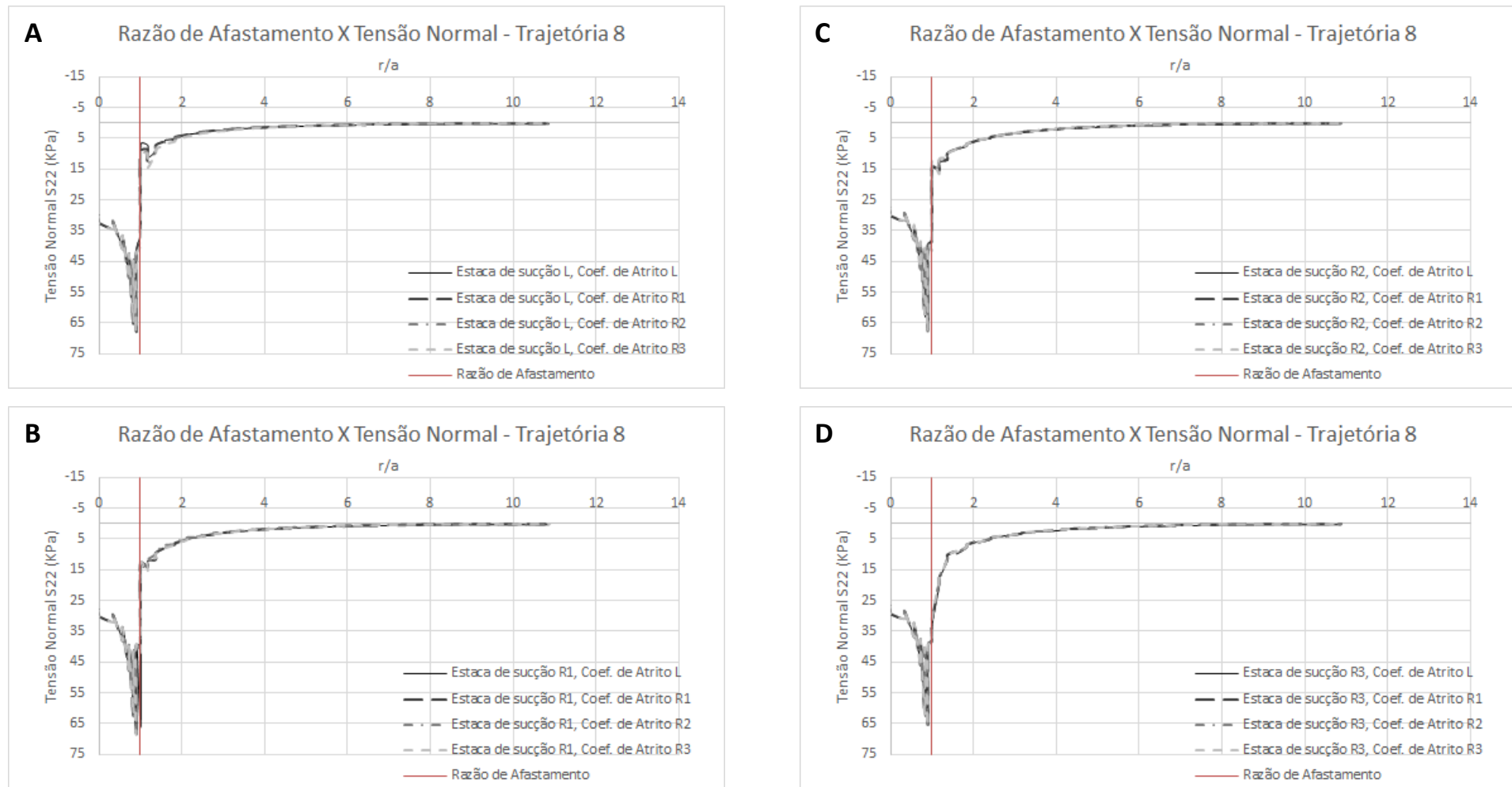


Figura 96: Gráfico de tensões normais por distância da Trajetória 8 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

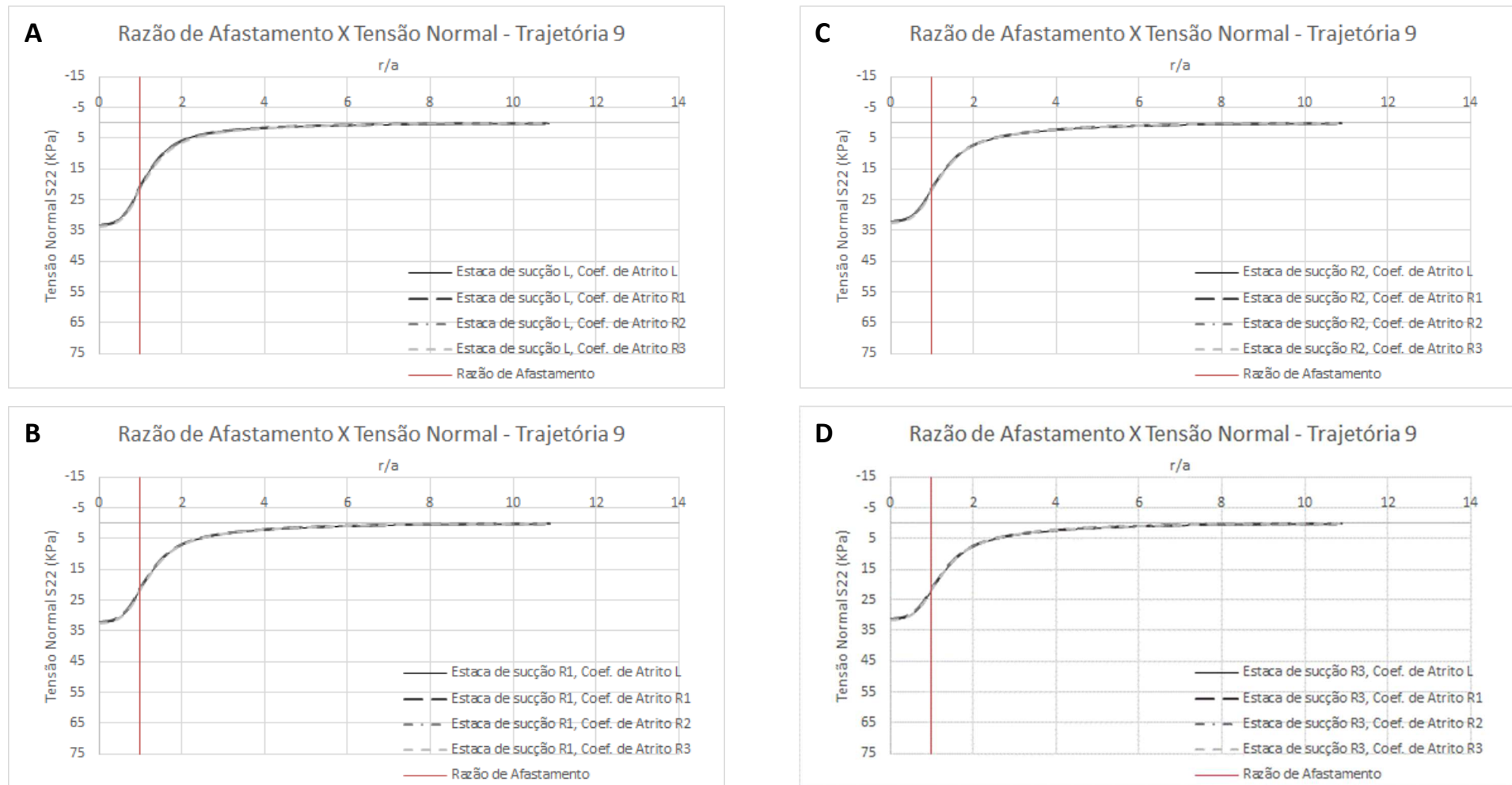


Figura 97: Gráfico de tensões normais por distância da Trajetória 9 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

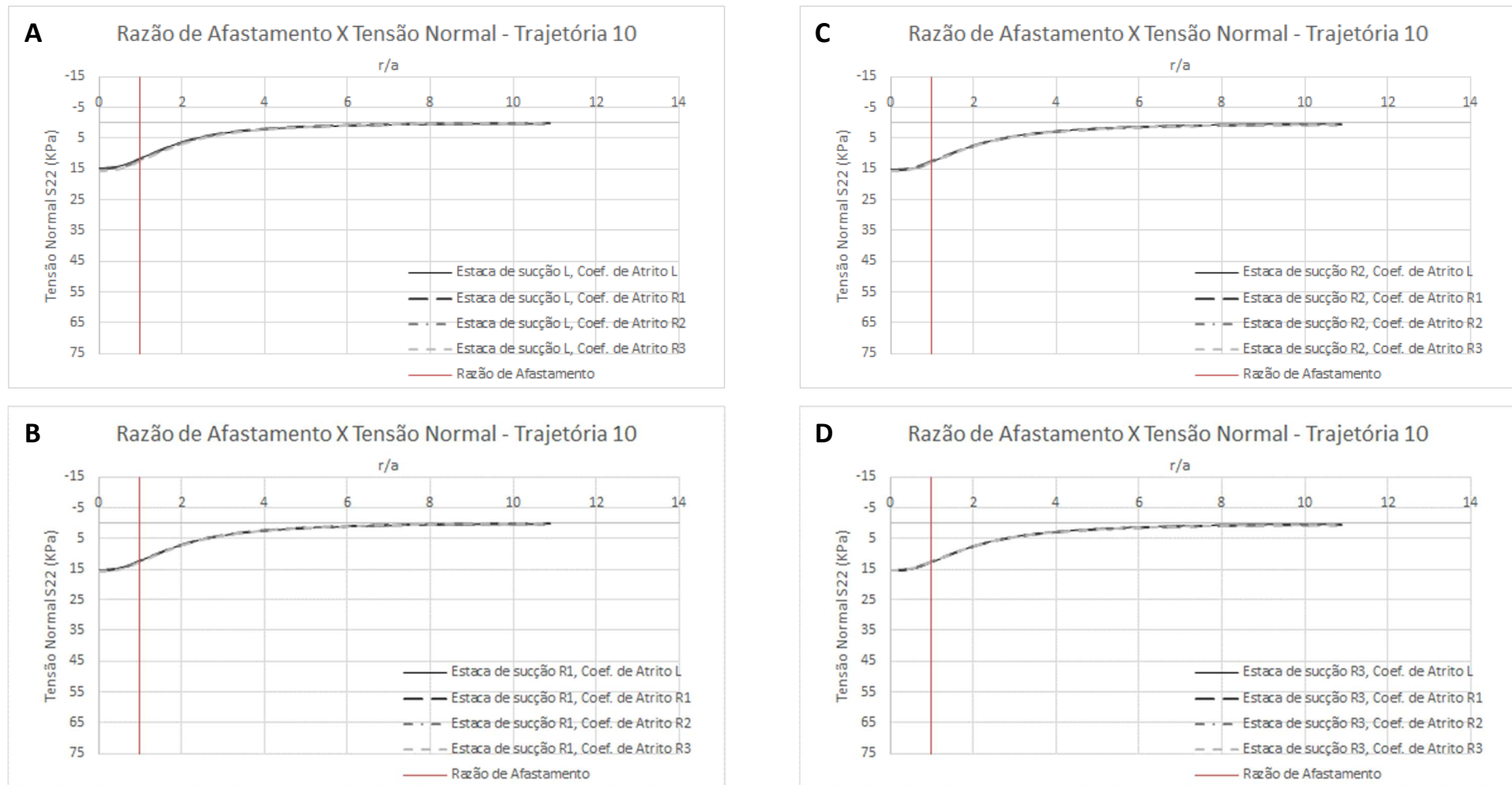


Figura 98: Gráfico de tensões normais por distância da Trajetória 10 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

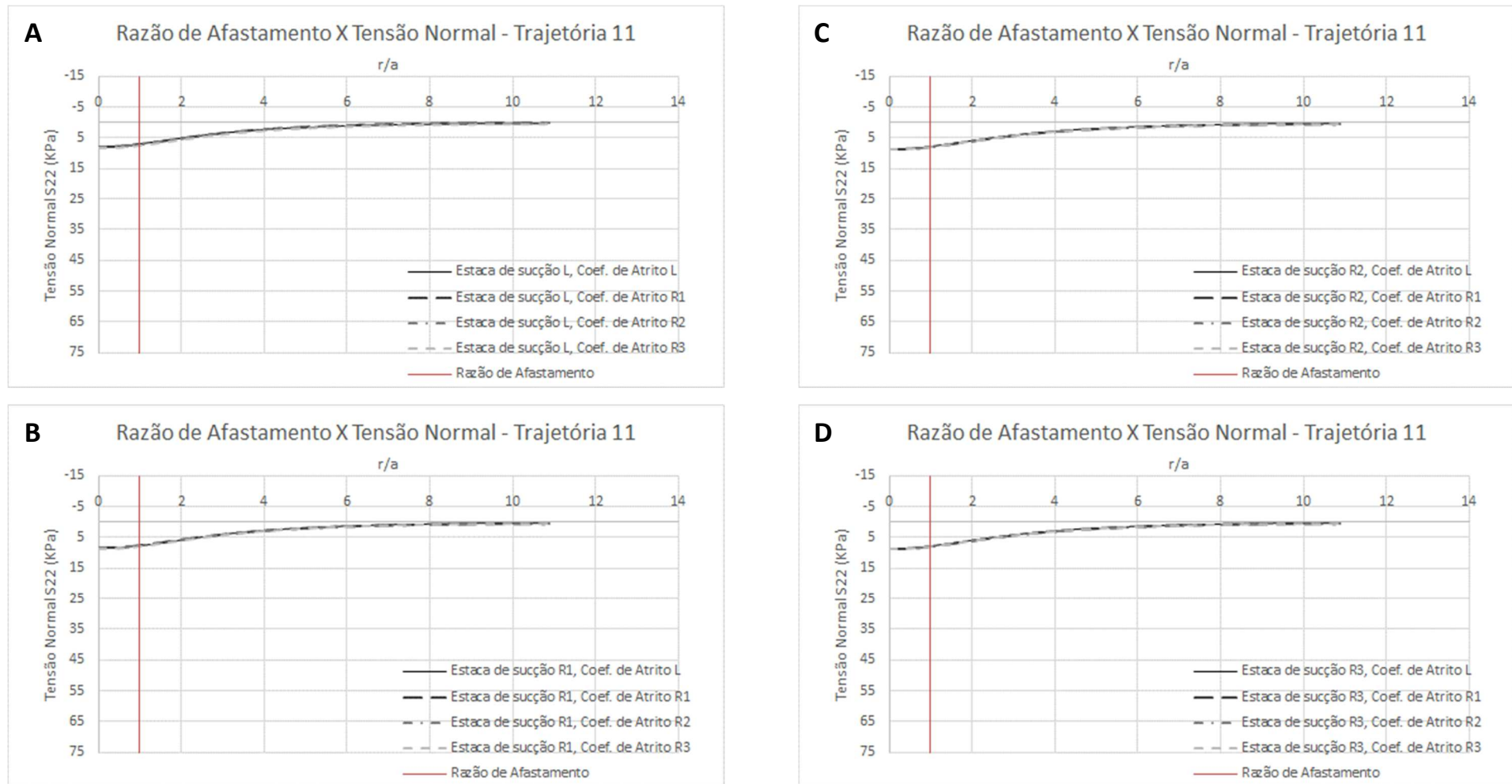


Figura 99: Gráfico de tensões normais por distância da Trajetória 11 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

ANEXO D – DISTRIBUIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS ATUANTES NO SOLO

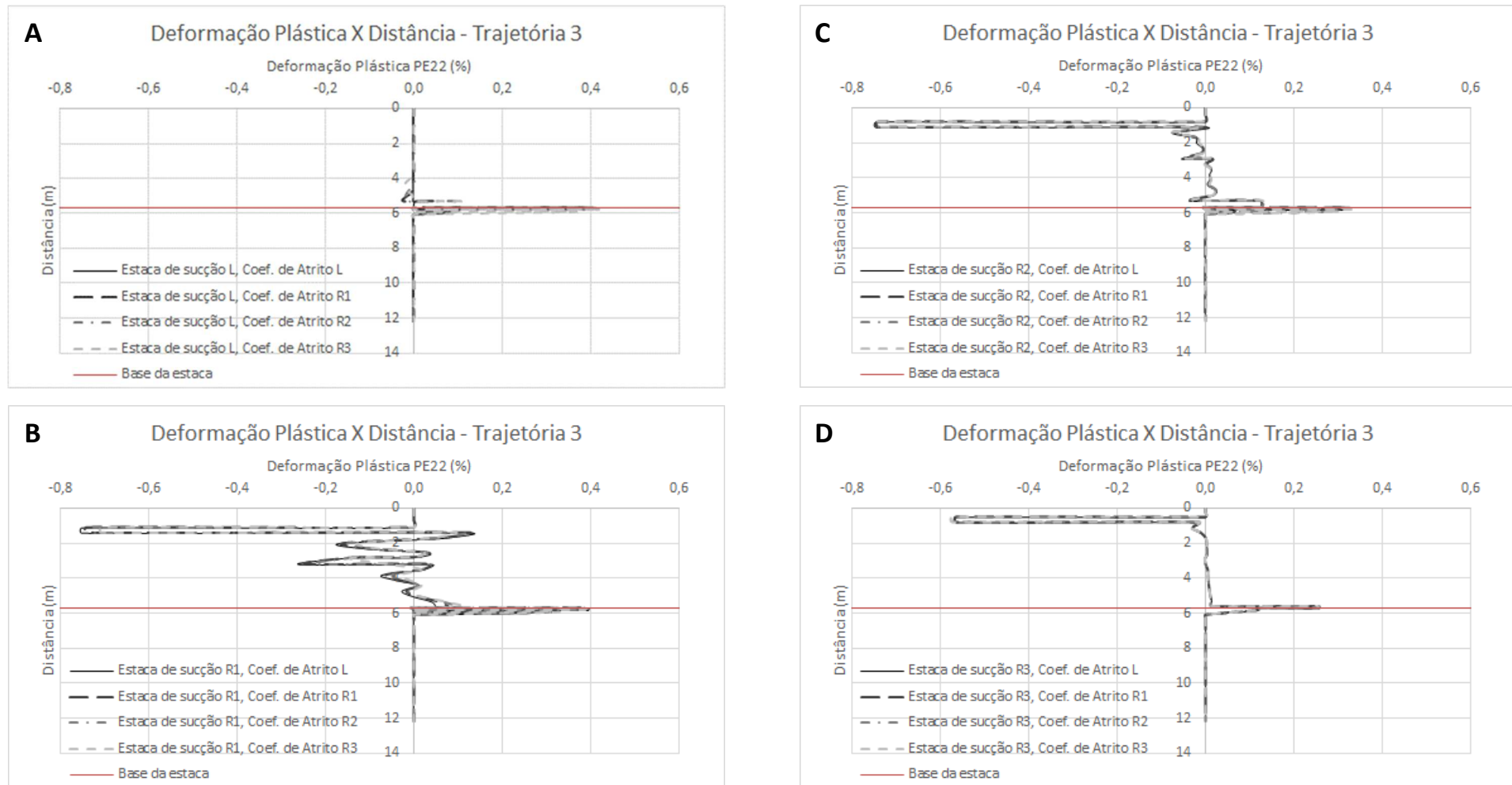


Figura 100: Gráfico de deformações plásticas por distância da Trajetória 3 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)

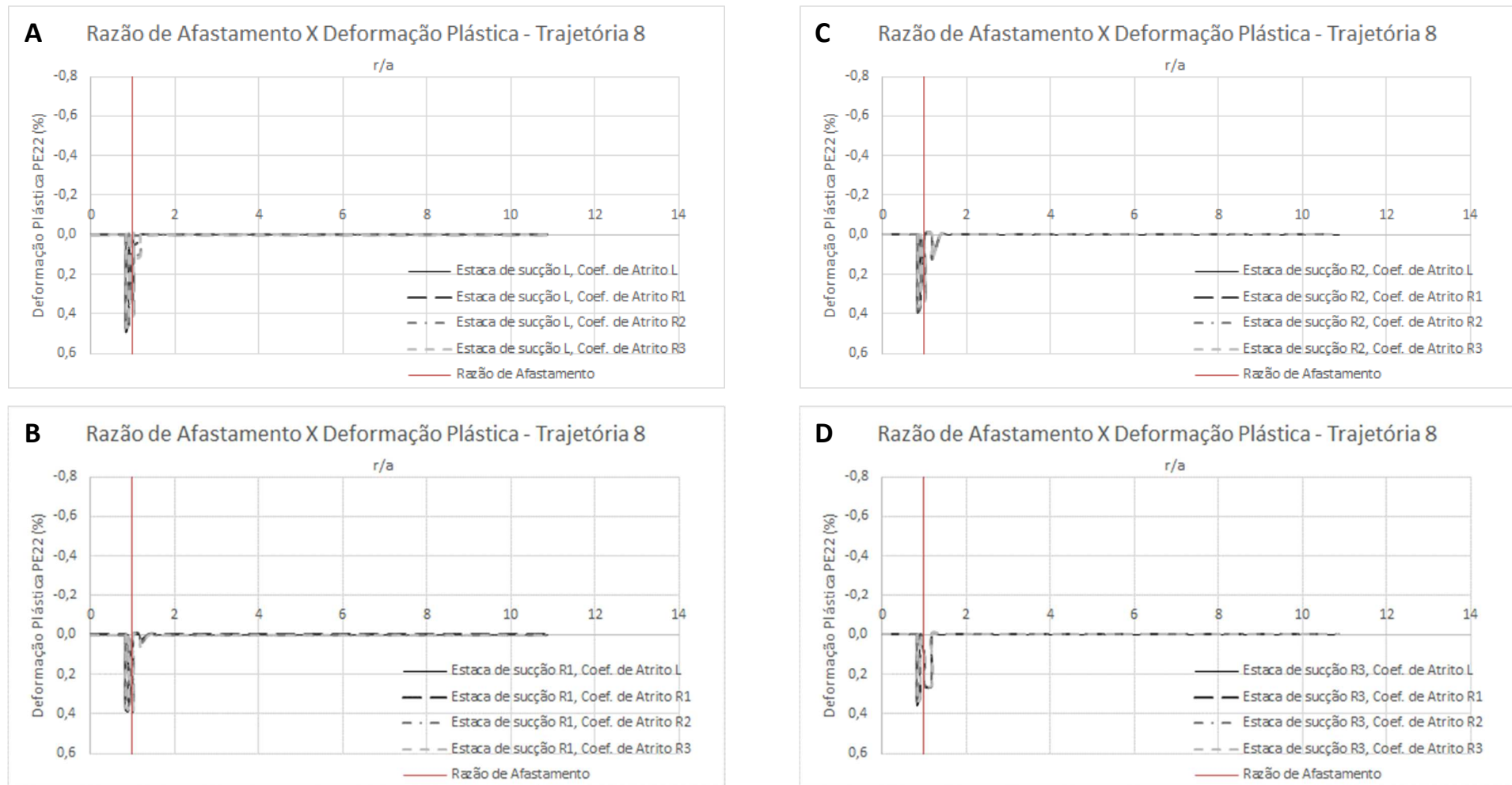


Figura 101: Gráfico de deformações plásticas por distância da Trajetória 8 para as estacas com geometria lisa (A), menos rugosa (B), rugosa (C) e mais rugosa (D)