

5

Exemplo de aplicação

5.1.

Introdução

Neste capítulo é apresentado um exemplo de aplicação da metodologia de otimização – descrita no capítulo anterior – para obtenção da configuração ótima de *risers* em catenária com amortecedores hidrodinâmicos (RCHA). São estudados três casos de otimização: o primeiro consiste em minimizar as variações de amplitudes das tensões de *von Mises* ao longo do *riser* (trata-se de um problema de otimização mono-objetivo); o segundo consiste em minimizar o comprimento total dos trechos com amortecedores hidrodinâmicos (que também é um problema mono-objetivo); e o terceiro consiste em minimizar, simultaneamente, as variações de amplitudes das tensões de *von Mises* e o comprimento total dos segmentos com amortecedores hidrodinâmicos (este último caso representa um problema multiobjetivo). Em seguida, são comparados os resultados obtidos em cada caso de otimização com a configuração de equilíbrio original do *riser*, sem a utilização de amortecedores hidrodinâmicos.

Conforme mencionado anteriormente, para o desenvolvimento deste estudo são utilizados dois programas computacionais: o Anflex (Mourelle, 2001), para as simulações estática e dinâmica dos *risers* e o modeFRONTIER (modeFRONTIER, 2011) para o processo de otimização.

5.2.

Descrição do modelo

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado um modelo de *riser* proposto por engenheiros da Petrobras. Trata-se de um *riser* rígido de aço em catenária, instalado em uma lâmina d'água de 2136.9 m e conectado a uma unidade flutuante do tipo FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*). O comprimento total do *riser* é de 4177.93 m e os dados referentes às propriedades físicas do material que o compõe encontram-se resumidos na Tabela 5.1. Com relação às condições de contorno, a base do *riser* (âncora) é considerada fixa no fundo do mar enquanto que o

seu topo está conectado ao FPSO, ou seja, os movimentos da unidade flutuante são transferidos para o topo do *riser*.

Tabela 5.1. Propriedades físicas e geométricas do *riser*.

Propriedades	
Diâmetro interno (m)	0.16510
Espessura (m)	0.02362
Módulo de elasticidade do aço (kN/m^2)	2.07e+08
Peso específico do aço (kN/m^3)	77.0
Tensão de escoamento do aço (kN/m^2)	531000.0

O modelo utilizado neste trabalho, corresponde ao que produziu os piores resultados (maiores valores de tensões ao longo do *riser*) dentre todas as combinações das condições ambientais (ondas e correntes) analisadas pelos engenheiros da Petrobras no estudo de carga extrema desse *riser*. O caso de carregamento associado a este modelo contém a onda “OSEE_105_100” (onda irregular, com 13 s de período de pico, 6.5 m de altura significativa e azimute de 292.5°) e a corrente “CWNWsup_10” (com perfil aproximadamente triangular, velocidade na superfície da ordem de 1.3 m no mesmo azimute da onda). O movimento da unidade flutuante gerado por esse caso de carregamento é transferido para o topo do *riser* e as séries temporais correspondentes aos deslocamentos a serem aplicados no *riser* são aproximadas por 6 funções harmônicas, uma para cada grau de liberdade (*surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* e *yaw*), conforme mostrado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Funções harmônicas equivalentes aos deslocamentos aplicados no topo do *riser*.

Grau de Liberdade	Amplitude (m)	Período (s)	Fase (graus)
<i>Surge</i> (X)	0.81	12.41	53.73
<i>Sway</i> (Y)	2.97	12.41	70.12
<i>Heave</i> (Z)	8.97	12.41	321.04
<i>Roll</i> (Rx)	5.51	12.41	287.88
<i>Pitch</i> (Ry)	1.01	12.41	257.78
<i>Yaw</i> (Rz)	0.85	12.41	177.44

De acordo com a Tabela 5.3, o *riser* é subdividido em 16 trechos (ou segmentos), dos quais 15 são do tipo “*rigid tube*” e o segmento do topo, responsável

pela conexão do *riser* à unidade flutuante, é modelado como uma junta flexível (“*flex joint*”).

Tabela 5.3. Segmentos ou trechos que compõem o *riser* em estudo.

Trecho	Tipo	Descrição
1	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i>
2	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i>
3	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser com amortecedor hidrodinâmico</i>
4	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i>
5	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser com amortecedor hidrodinâmico</i>
6	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i>
7	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser com amortecedor hidrodinâmico</i>
8	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i>
9	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser com amortecedor hidrodinâmico</i>
10	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i>
11	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser com amortecedor hidrodinâmico</i>
12	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i>
13	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i>
14	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i>
15	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i>
16	<i>Flex Joint</i>	<i>Junta Flexível</i>

Conforme mencionado no capítulo anterior, dos 15 segmentos do tipo “*rigid tube*” 5 correspondem a segmentos com amortecedores hidrodinâmicos. Para se chegar a esta quantidade “ótima” de 5 trechos de *riser* com amortecedores hidrodinâmicos, foram realizados estudos preliminares de otimização considerando-se este mesmo *riser*, porém com uma quantidade de amortecedores variando de 1 até 5. As Figuras 5.1a até 5.1e, ilustram as configurações “ótimas” obtidas para um dos casos.

Para todas as configurações estudadas, foi fixado um valor máximo de 1200 m para o comprimento total dos segmentos com amortecedores hidrodinâmicos. Assim, para a configuração com apenas 1 segmento de amortecedores, o comprimento máximo desse segmento será de 1200 m; para a configuração com 2 segmentos, cada um poderá atingir no máximo 600 m; para a configuração com 3 segmentos, o limite máximo para cada comprimento será de 400 m; seguindo o mesmo raciocínio, a configuração com 4 segmentos permitirá um valor máximo de 300 m para cada comprimento; e, finalmente, para a configuração com 5 segmentos de amortecedores, cada um terá um comprimento máximo de 240 m. Em todos os casos, o processo de

otimização modifica os comprimentos dos segmentos em incrementos discretos de 12 m.

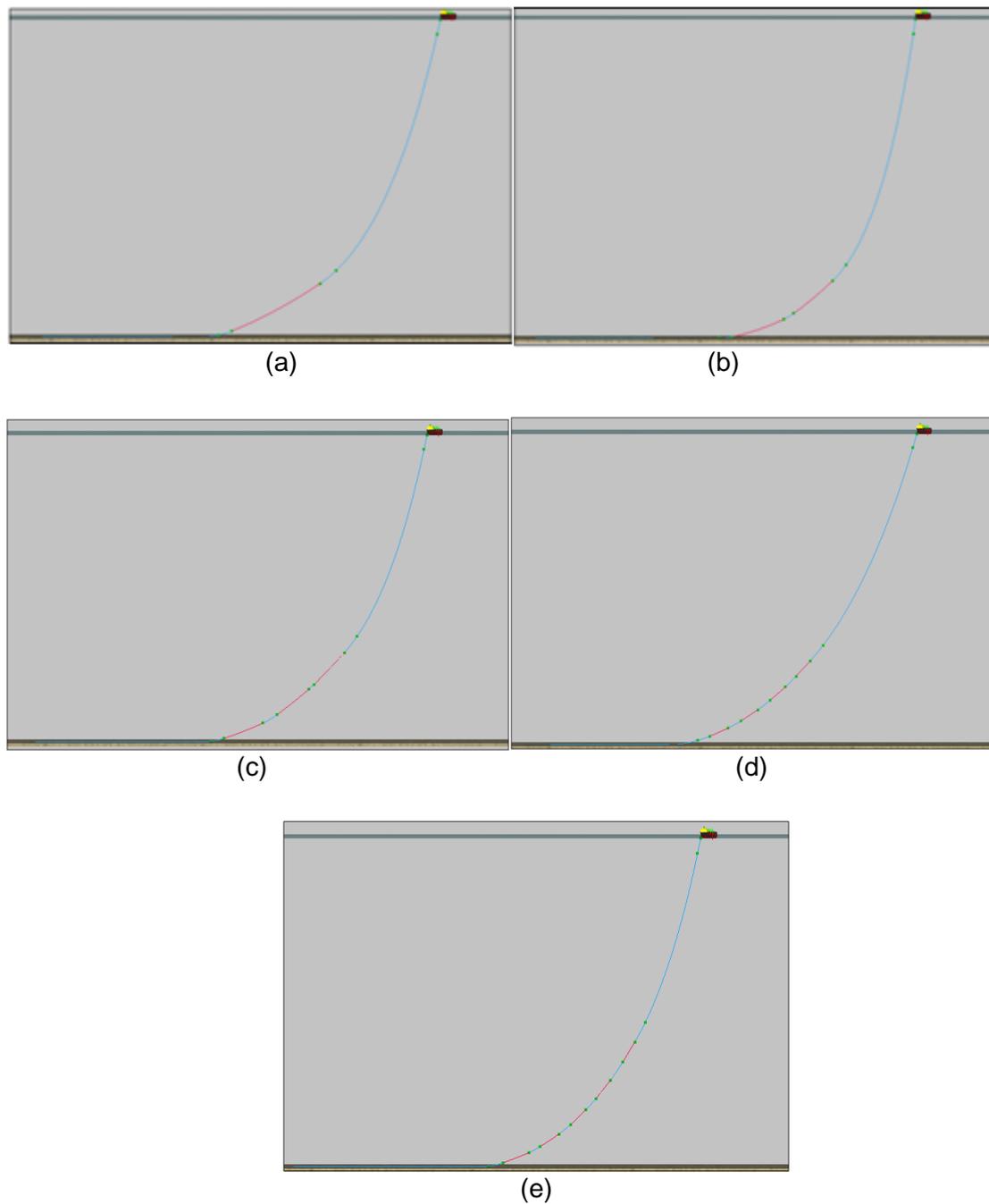


Figura 5.1 – Modelos com a quantidade variável de amortecedores hidrodinâmicos.

O objetivo desta análise preliminar foi determinar qual dos cinco modelos apresentados na Figura 5.1 conduzirá o *riser* a uma “melhor” configuração, ou seja, aquela que minimiza as tensões ao longo do seu comprimento. Para tanto, foi escolhido como parâmetro do processo de otimização, a verificação de que o fator

DNL deve assumir valores menores do que “1” no espaço de busca compreendido entre os comprimentos “0” (âncora) e “L/2”, (metade do comprimento do *riser*). Os modelos foram analisados estática e dinamicamente, e os resultados das envoltórias de valores máximos do fator *DNL*, correspondente às configurações “ótimas” de cada modelo, estão ilustrados nas Figuras 5.2. Em cada figura, além da envoltória de valores de *DNL*, foi acrescentada uma linha vertical (correspondente ao valor de *DNL* = 1), para servir de referência.

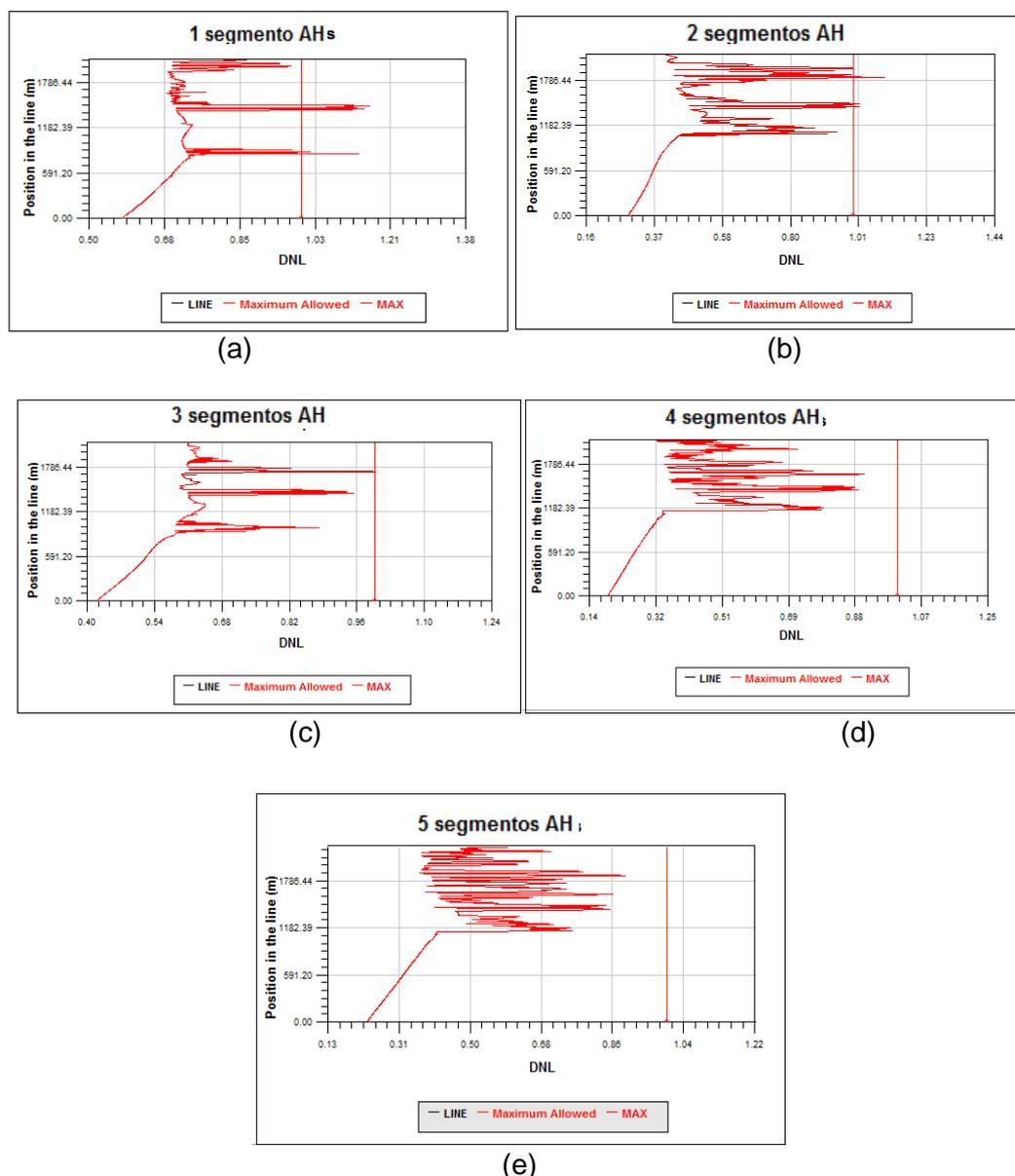


Figura 5.2. Gráfico das envoltórias “ótimas” de valores de *DNL* para cada um dos modelos analisados, variando de (a) 1 a (e) 5 trechos com amortecedores.

A Figura 5.3 ilustra, de forma mais detalhada, as 5 envoltórias da figura anterior, correspondentes aos valores de DNL nas respectivas configurações “ótimas”.

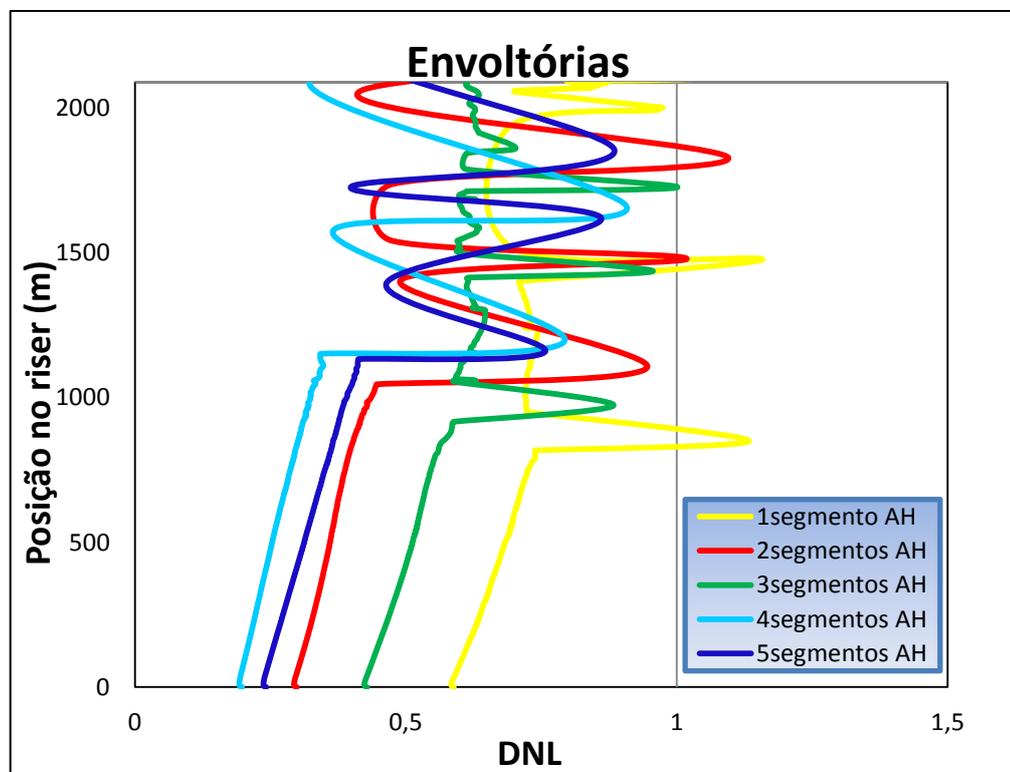


Figura 5.3. Gráfico comparativo das envoltórias de valores de DNL

Levando-se em consideração os resultados apresentados nas Figuras 5.2 e 5.3, que correspondem às envoltórias dos valores “ótimos” do fator DNL (considerando um espaço de busca compreendido entre 0 e 2088 m , ou seja, desde a âncora até a metade do comprimento L do *riser*), pode-se concluir que apenas os modelos com 4 e 5 trechos de amortecedores hidrodinâmicos foram capazes de satisfazer os critérios estabelecidos, de manter os valores de DNL abaixo de 1. Apesar dos resultados desses dois modelos serem próximos, a configuração com 5 trechos de amortecedores hidrodinâmicos foi a que conduziu aos melhores resultados em termos de distribuição de tensões e, portanto, foi a escolhida para o estudo de otimização realizado neste trabalho.

5.3

Variáveis de Entrada

Conforme mencionado na seção 4.3.1.1, as variáveis de entrada do problema de otimização da configuração RCHA são o ângulo de topo do *riser* medido em

relação à vertical, os comprimentos dos 5 trechos com amortecedores ($L3$, $L5$, $L7$, $L9$ e $L11$), os comprimentos dos trechos de espaçamento entre os amortecedores ($L4$, $L6$, $L8$ e $L10$) e o comprimento do trecho superior do *riser* ($L13$). Na Tabela 5.4 são apresentados os intervalos de variação de cada uma das variáveis descritas anteriormente:

Tabela 5.4 – Variáveis de entrada do exemplo de aplicação

Variáveis	Valor min.	Valor max.
Θ (graus)	6.0	20.0
L1 (m)	1348.93	
L2 (m)	100.0	
L3 (m)	12.0	240.0
L4 (m)	12.0	240.0
L5 (m)	12.0	240.0
L6 (m)	12.0	240.0
L7 (m)	12.0	240.0
L8 (m)	12.0	240.0
L9 (m)	12.0	240.0
L10 (m)	12.0	240.0
L11 (m)	12.0	240.0
L12 (m)	144.0	
L13 (m)	300.0	2400.0
L14 (m)	100.0	
L15 (m)	1.0	
L16 (m)	3.0	

A espessura dos trechos com amortecedores hidrodinâmicos (que correspondem às camadas de revestimento com material de baixa densidade) foi considerada constante neste trabalho, com valor igual a 0.195 m .

5.4

Análise de otimização

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos no processo de otimização de *risers* em catenária com amortecedores hidrodinâmicos. São consideradas três

diferentes abordagens para a função objetivo: (a) problema mono-objetivo correspondente à minimização das variações de amplitude das tensões de *von Mises*; (b) problema mono-objetivo correspondente à minimização do comprimento total dos trechos de *riser* com amortecedores hidrodinâmicos; e (c) problema multiobjetivo que combina as duas funções objetivo anteriores.

Para a solução do problema em cada abordagem, aplica-se o método NSGA-II com população de 20 indivíduos, 10 gerações, probabilidade de cruzamento de 0,9 e probabilidade de mutação de 0,02. Estes parâmetros foram definidos com base em resultados obtidos na literatura técnica (por exemplo: Tanaka, 2009; Martins, 2011; Esteco, 2011). A população inicial é definida aleatoriamente procurando-se cobrir, o máximo possível, o espaço de busca.

(a) Minimização das variações de amplitude das tensões de *von Mises*

Nesta abordagem, considera-se como objetivo minimizar a maior diferença entre os valores de tensão máxima e mínima de *von Mises* (ΔVME) no intervalo de 0 (âncora) até $L/2$ do *riser*, sendo L o comprimento do *riser*. O critério da escolha deste objetivo se baseia no fato de que grandes variações de tensões em um ponto específico do *riser* pode causar problemas de fadiga do material que compõe o duto. Portanto, o problema de otimização pode ser expresso como:

Encontrar $\arg \min (f_{obj\ i} = maior\ \Delta VME = maior\ (VME_{maximo} - VME_{minimo}))$

tal que:

$$H > 10.0\text{ m}$$

$$DNL < 1.0$$

$$\text{Espaço de busca: } [0, \frac{L}{2}]$$

onde “maior ΔVME ” é a maior diferença entre os valores de tensão máxima e mínima de *von Mises* ao longo do *riser*, H é a distância vertical entre o início do primeiro trecho com amortecedores e o fundo do mar, L é o comprimento total do *riser* e DNL é o fator de utilização da norma *offshore DNV-OS-F201*.

A Figura 5.4 apresenta um resumo das configurações simuladas, informando quantas delas foram viáveis (*Real and Feasible*); quantas foram inviáveis, ou seja, violaram alguma restrição (*Real and Unfeasible*); e quantas não convergiram, em função de algum erro (*Real Erro*).

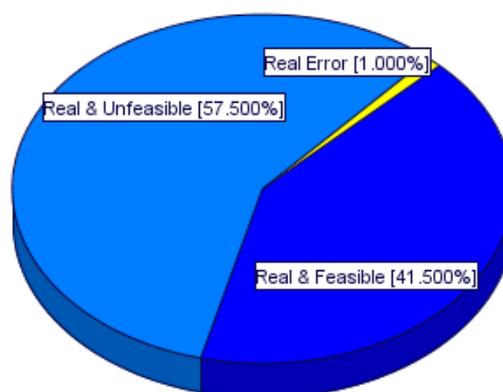


Figura 5.4 – Resumo das simulações realizadas - caso (a)

A partir da Figura 5.4 é possível concluir que 57.5%, ou seja, mais da metade das configurações simuladas, são inviáveis ou violam alguma restrição imposta ao problema de otimização. Ainda, é necessário identificar qual ou quais das restrições foram as mais violadas com a finalidade de estudar a possibilidade de flexibilizar os limites das mesmas para permitir a validação de algumas dessas configurações inviáveis, aumentando assim o conjunto de soluções factíveis. A Figura 5.5 apresenta o percentual de configurações inviáveis em relação ao tipo de restrição e mostra que 96,6% das configurações inviáveis violaram a restrição referente ao fator DNL e apenas 3,4% correspondem à violação da restrição da altura mínima H .

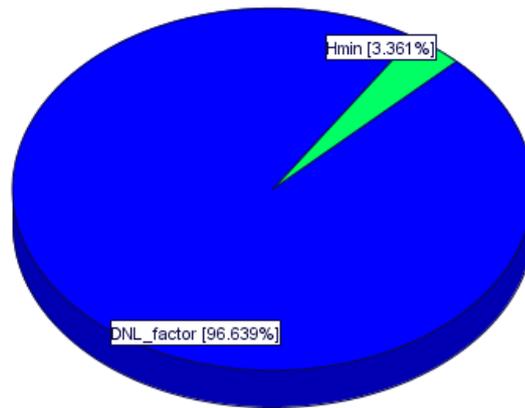


Figura 5.5 – Proporção de violação das restrições - caso (a).

A Figura 5.6 apresenta o gráfico de convergência da função objetivo f_{obji} ao longo do processo de otimização, referente ao problema estudado no caso (a). É importante destacar a evolução do processo de otimização onde, no início, as configurações viáveis apresentavam uma variação de amplitude das tensões de *von Mises* da ordem de 404440 Kn/m^2 e, no final do processo, foram encontradas configurações viáveis com valores de variação de amplitude das tensões de *von Mises* da ordem de 332640 kN/m^2 , o que representa um ganho de aproximadamente 18%.

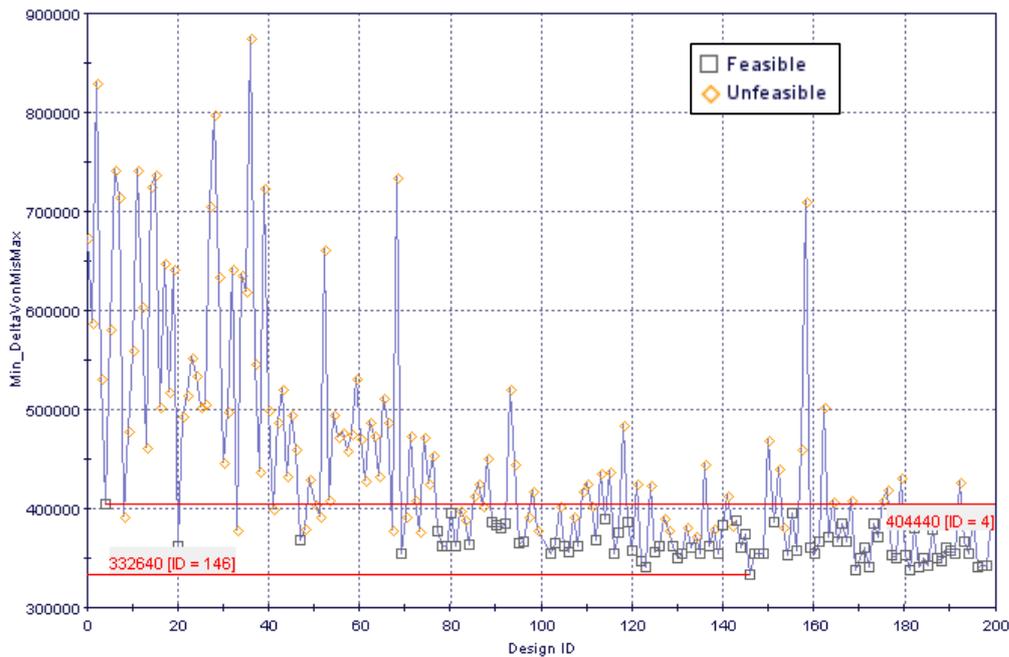


Figura 5.6 – Gráfico dos valores da função objetivo ao longo do processo de otimização do caso (a).

As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam gráficos que relacionam as diferentes variáveis de tipo geométrico, estrutural, de segurança e de eficiência envolvidas no processo de otimização de cada configuração simulada. Esses gráficos auxiliam o projetista na escolha das melhores configurações em função dos critérios específicos do projeto. Além disso, eles permitem refinar a busca de melhores configurações em torno de um valor específico. A Figura 5.7 apresenta um gráfico de quatro dimensões (4D) que relaciona para cada configuração: a variação de amplitude dos valores das tensões de *von Mises* no eixo vertical; o fator de utilização *DNL* no eixo horizontal; o comprimento total de segmentos com amortecedores hidrodinâmicos por meio dos diâmetros das bolinhas; e a altura mínima *H* utilizando diferentes cores das bolinhas (a cor azul representa o menor valor e a cor vermelha o maior). Neste caso, a região de interesse, ou seja, aquela onde estão as melhores soluções está compreendida pelos valores de *DNL* menores do que 1, situados na parte esquerda do eixo horizontal; pelos menores valores das variações de amplitudes das tensões de *von Mises*, situados na parte inferior do eixo vertical; e pelas bolinhas com menor diâmetro e cor azul-clara.

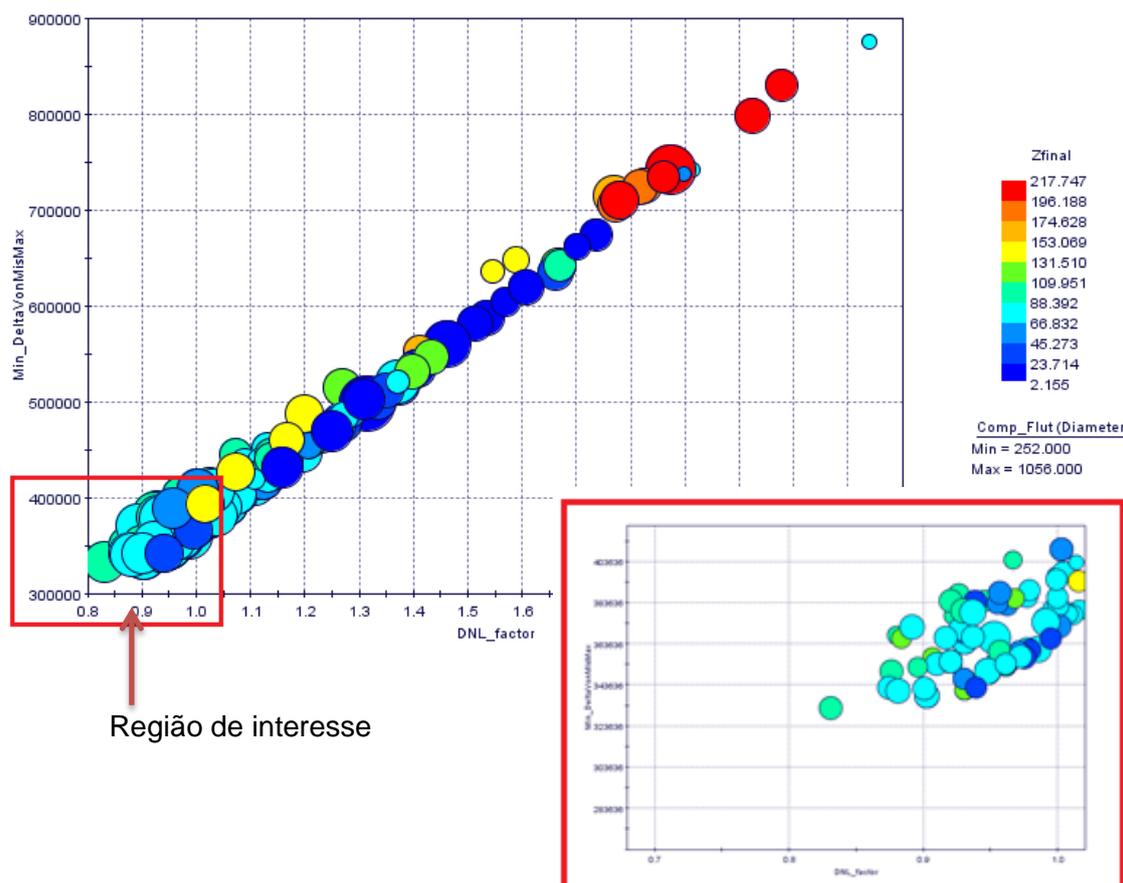


Figura 5.7 – Gráfico 4D para a escolha da solução ótima - caso (a).

Os resultados da busca de melhores configurações a partir do gráfico da Figura 5.7 estão apresentados na Tabela 5.5 com os seus respectivos valores numéricos.

Tabela 5.5 – Melhores configurações do problema referente ao caso (a).

Configuração do riser	$\Delta VonMises$ (kN/m²)	DNL	Comprimento AH (m)	Altura H (m)
1	332640	0.83057	768.0	109.62
2	341120	0.93043	672.0	110.19
3	346980	0.92973	720.0	64.59
4	352550	0.89561	660.0	98.86
5	355930	0.96517	600.0	95.35

A Figura 5.8 apresenta os intervalos de valores dos parâmetros de otimização mais significativos que ajudam na escolha das melhores configurações. Assim, são traçados os intervalos de variação do ângulo de topo; do comprimento total de amortecedores hidrodinâmicos; das variações de amplitudes das tensões de *von Mises*; do fator *DNL* e da altura *H* para os quais as soluções resultam em configurações viáveis. Dessa maneira, é possível concluir que as configurações viáveis resultantes do processo de otimização são aquelas cujo ângulo de topo pode estar compreendido entre 9 e 14 graus, o comprimento total de segmentos com amortecedores está compreendido entre 620 m e 800 m, as variações de amplitudes das tensões de *von Mises* estão compreendidas entre 330.000 kN/m² e 400.000 kN/m² e a altura *H* está compreendida entre 30 m e 100 m. É possível ainda refinar esses intervalos com valores específicos desejados e identificar a configuração mais apropriada para o projeto.

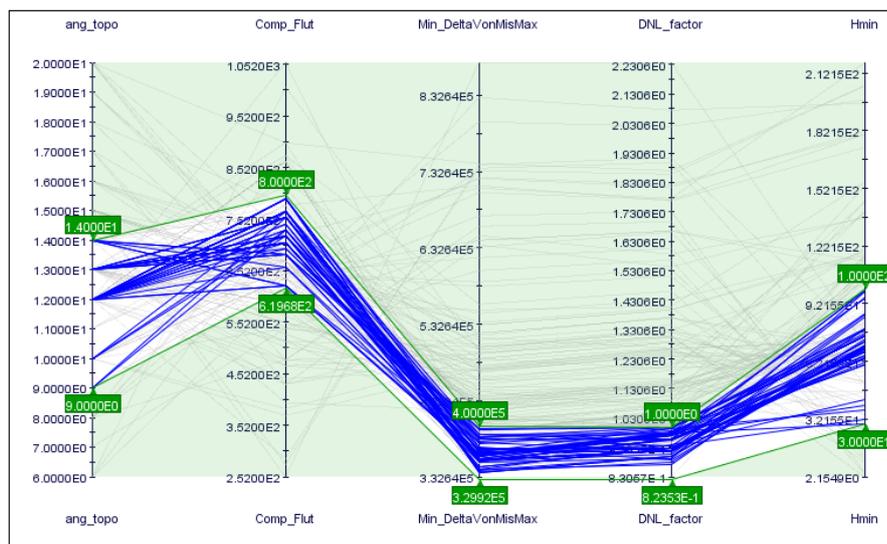


Figura 5.8 – Gráfico de coordenadas paralelas de parâmetros de otimização - caso (a).

Finalmente, baseado no critério de escolha da configuração com o valor mínimo das variações de amplitudes das tensões de *von Mises*, a Tabela 5.6 apresenta os valores numéricos correspondentes à configuração ótima de número 1 (vide Tabela 5.5):

Tabela 5.6 – Parâmetros da configuração ótima - caso (a)

Configuração	$\Delta VonMises$ (kN/m^2)	DNL	Comprimento AH (m)	Altura H (m)
1	332640	0.83057	768.0	109.62

A Figura 5.9 apresenta a configuração ótima do *riser* RCHA modelada pelo programa Anflex.

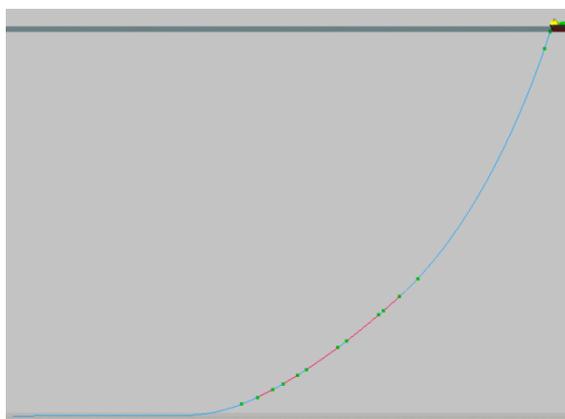


Figura 5.9 – Configuração ótima encontrada na abordagem 1 – caso (a).

(b) Minimização do comprimento total dos trechos com amortecedores

Nesta segunda abordagem, considera-se como objetivo minimizar o comprimento total dos segmentos que apresentam amortecedores hidrodinâmicos, considerando o intervalo de 0 (âncora) até $L/2$, onde L é o comprimento total do riser. O problema de otimização pode ser expresso como:

$$\text{Encontrar } \arg \min (f_{\text{obj}} = L_{tf} = L_3 + L_5 + L_7 + L_9 + L_{11})$$

tal que:

$$H > 10.0 \text{ m}$$

$$DNL < 1.0$$

$$\text{Espaço de busca: } [0, \frac{L}{2}]$$

onde L_{tf} é o comprimento total dos trechos com amortecedores; $L_3, L_5, L_7, L_9, L_{11}$ são os comprimentos de cada um dos segmentos com amortecedores; H é a distância vertical entre o início do primeiro trecho com amortecedores e o fundo do mar, L é o comprimento total do riser e DNL é o fator de utilização da norma offshore DNV-OS-F201.

A Figura 5.10 apresenta um resumo das configurações simuladas.

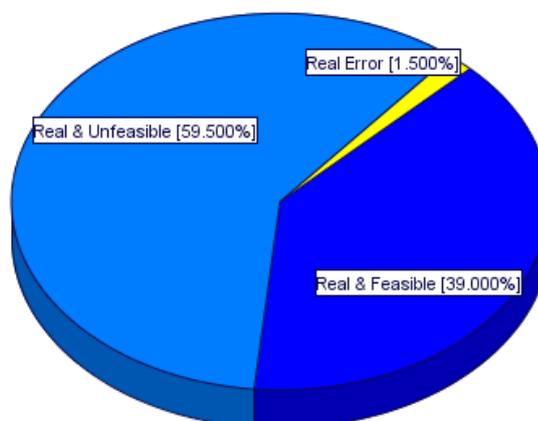


Figura 5.10 - Resumo das simulações realizadas - caso (b)

A partir da Figura 5.11, é possível perceber que, das 59.5% das configurações inviáveis, mostradas na Figura 5.10, 96% correspondem às configurações que violam a restrição do fator *DNL*. Assim como foi verificado para a minimização do caso (a), o fator *DNL* é a restrição mais violada também neste caso, ou seja, na minimização do comprimento de segmentos de amortecedores.

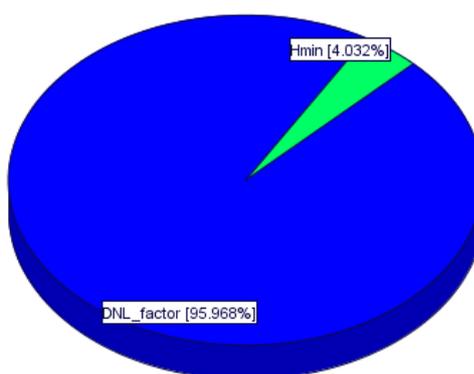


Figura 5.11 - Proporção de violação das restrições - caso (b)

A Figura 5.12 apresenta o gráfico de convergência da função objetivo $f_{obj\ ii}$ ao longo do processo de otimização, referente ao problema estudado no caso (b). É importante destacar a evolução do processo de otimização onde, no início, as configurações viáveis apresentavam um comprimento total de segmentos com amortecedores de 864 m e, no final do processo, foram encontradas configurações viáveis com comprimento total de segmentos com amortecedores de 492 m, o que representa um ganho de aproximadamente 43%.

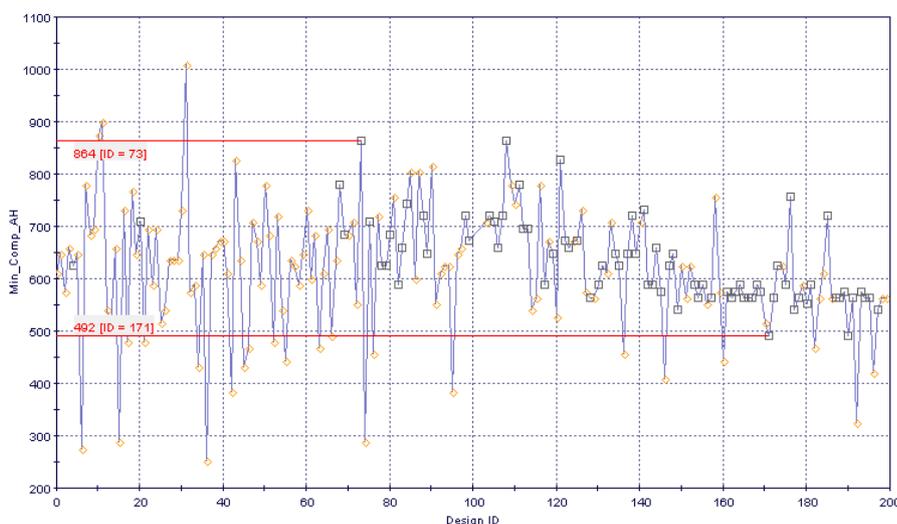
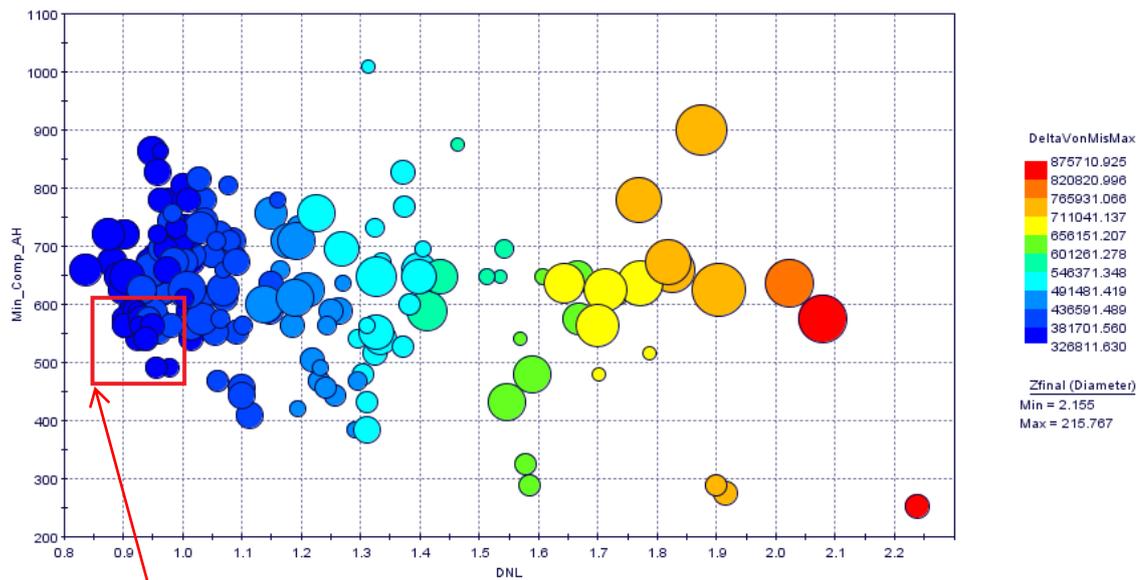


Figura 5.12 - Gráfico dos valores da função objetivo ao longo do processo de otimização do caso (b).

A Figura 5.13 apresenta um gráfico de “quatro dimensões” que relaciona para cada configuração o valor do comprimento total de segmentos com amortecedores, representados no eixo vertical; o fator de utilização DNL , representado no eixo horizontal; os valores das variações de amplitudes das tensões de *von Mises*, representados pelas cores das bolinhas (a cor azul representa o menor valor e a cor vermelha representa o maior) e o valor da altura mínima H representada pelo diâmetro das bolinhas (o menor diâmetro corresponde ao menor valor de H). Neste caso, a região de interesse na qual se localizam as melhores soluções está compreendida pelos valores de DNL menores que 1, situados na parte esquerda do eixo horizontal; pelos menores valores do comprimento total de segmentos com amortecedores, situados na parte inferior do eixo vertical e pelas bolinhas de cor azul-escura.



Região de interesse

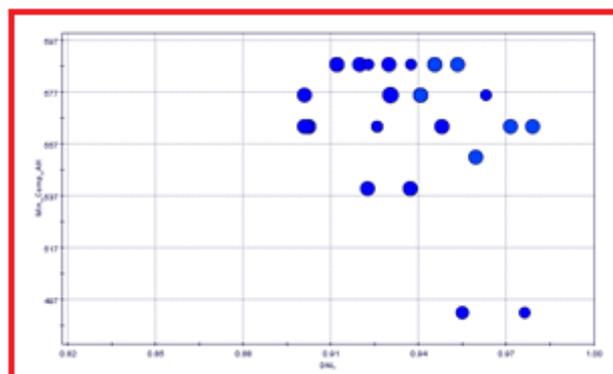


Figura 5.13 - Gráfico 4D para a escolha da solução ótima - caso (b).

Os resultados da busca de melhores configurações a partir do gráfico da Figura 5.13 estão apresentados na Tabela 5.7 com os seus respectivos valores numéricos:

Tabela 5.7 - Melhores configurações do problema referente ao caso (b).

Configuração do riser	Comprimento AH (m)	$\Delta VonMises$ (kN/m²)	DNL	Altura H (m)
1	492	366710	0.9763	32.496
2	492	354880	0.95482	57.888
3	540	352610	0.93718	60.335
4	540	346270	0.9225	61.119
5	564	347870	0.9022	62.513
6	564	362240	0.92576	35.656

Semelhantemente ao caso anterior, a Figura 5.14 apresenta os intervalos de valores dos parâmetros de otimização mais significativos que ajudam na escolha das melhores configurações. Assim, são traçados os intervalos de variação do ângulo de topo; do comprimento total dos trechos com amortecedores hidrodinâmicos; das variações de amplitudes das tensões de *von Mises*; do fator *DNL*; e da altura *H* para os quais as soluções resultam em configurações viáveis. Dessa maneira é possível concluir que as configurações viáveis resultantes do processo de otimização do comprimento total de trechos com amortecedores são aquelas cujo ângulo de topo pode estar compreendido entre 11 e 15 graus; o comprimento total de trechos com amortecedores está compreendido entre 490 m e 720 m; as variações de amplitudes das tensões de *von Mises* estão compreendidas entre 320000 kN/m² e 415000 kN/m²; e cuja altura *H* está compreendida entre 55 m e 120 m. Tal como no caso anterior, é possível ainda refinar esses intervalos com valores específicos desejados e identificar a configuração mais apropriada para o projeto.

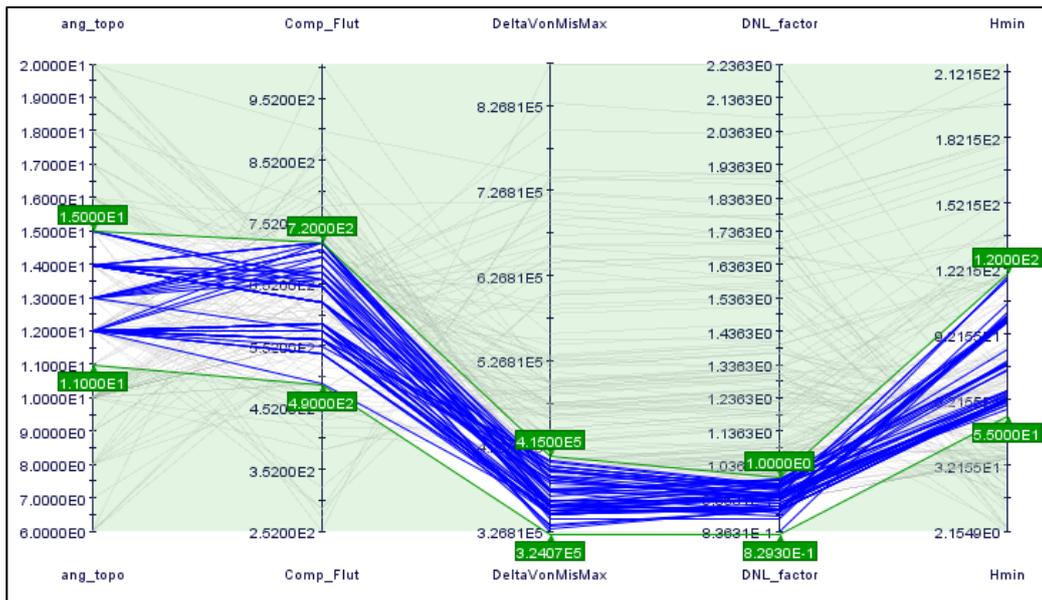


Figura 5.14 - Gráfico de coordenadas paralelas de parâmetros de otimização - caso (b).

Finalmente, baseado no critério de escolha da configuração com o valor mínimo do comprimento total de segmentos com amortecedores hidrodinâmicos, a Tabela 5.8 reapresenta os valores numéricos correspondentes à configuração ótima de número 1 (vide Tabela 5.7):

Tabela 5.8 - Parâmetros da configuração ótima – caso (b).

Configuração	Comprimento AH (m)	$\Delta VonMises (kN/m^2)$	DNL	Altura H (m)
1	492	366710	0.9763	32.496

A Figura 5.15 apresenta a configuração ótima do *riser* RCHA modelada pelo programa Anflex.

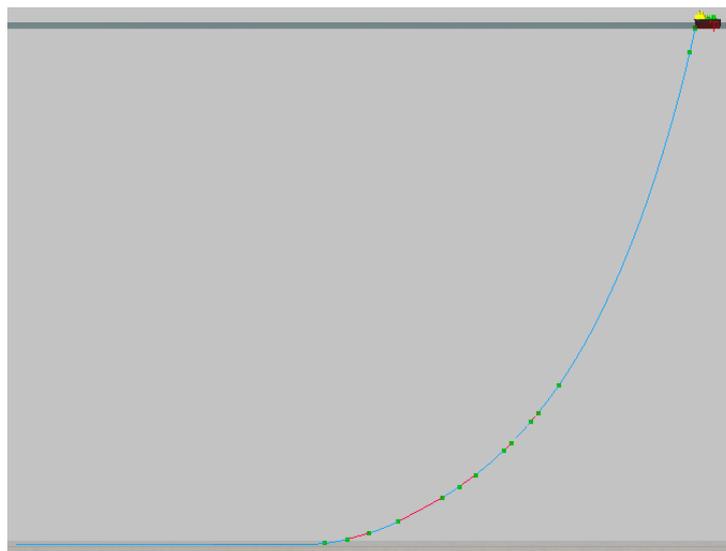


Figura 5.15 - Configuração ótima encontrada na abordagem 2 – caso (b).

(c) Minimização simultânea das variações de amplitudes das tensões de *von Mises* e do comprimento total dos trechos com amortecedores

Nesta terceira abordagem, consideram-se como objetivos a minimização das variações de amplitudes das tensões de *von Mises* e a minimização do comprimento total dos segmentos que apresentam amortecedores hidrodinâmicos. Tal como nos casos anteriores, foi considerado um intervalo de busca de 0 (âncora) até $L/2$, onde L é o comprimento total do riser. O problema de otimização pode ser expresso como:

$$\text{Encontrar } \arg \min (f_{obj\ iii} = [f_{obj\ i}, f_{obj\ ii}])$$

tal que:

$$H > 10.0 \text{ m}$$

$$DNL < 1.0$$

$$\text{Espaço de busca: } [0, \frac{L}{2}]$$

onde $f_{obj i}$ é a função objetivo associada às variações de amplitudes das tensões de *von Mises*, $f_{obj ii}$ é a função objetivo associada ao comprimento total dos segmentos com amortecedores hidrodinâmicos, H é a distância vertical entre o início do primeiro trecho de amortecedores e o fundo do mar, L é o comprimento total do *riser* e DNL é o fator de utilização da norma *offshore DNV-OS-F201*.

A Figura 5.16 apresenta o resumo das configurações simuladas.

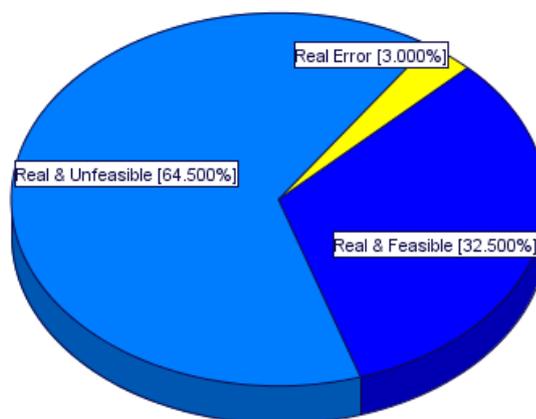


Figura 5.16 - Resumo das simulações realizadas - caso (c).

A partir da Figura 5.17, é possível perceber que, das 64.5% das configurações inviáveis, mostradas na Figura 5.16, 96.27% correspondem às configurações que violam a restrição do fator DNL . Assim como foi verificado para as minimizações dos casos (a) e (b), o fator DNL é a restrição mais violada também neste caso, ou seja, na minimização do problema multiobjetivo.

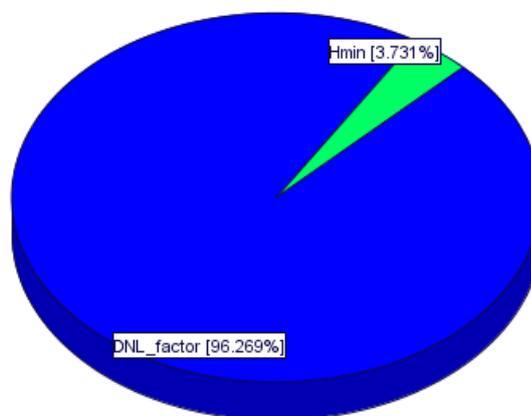


Figura 5.17 - Proporção de violação das restrições - caso (c).

As Figuras 5.18 e 5.19 apresentam os gráficos de convergência das funções objetivas $f_{obj\ i}$ e $f_{obj\ ii}$, respectivamente, ao longo do processo de otimização, referentes ao problema estudado no caso (c). Para ambos os gráficos é possível concluir que a convergência das soluções não é tão clara como nos casos mono-objetivo (a) e (b) analisados anteriormente. Estima-se que esse comportamento seja devido ao fato de que, em um problema multiobjetivo de funções conflitantes – ou seja, quanto menor é o valor de uma função, maior é o valor da outra função –, é mais difícil encontrar uma solução que satisfaça às duas funções objetivo. É importante destacar a evolução do processo de otimização, onde, no início, as configurações viáveis apresentavam um comprimento total de segmentos com amortecedores de $792\ m$ e, no final do processo, foram encontradas configurações viáveis com comprimento total de segmentos com amortecedores de $528\ m$, o que representa um ganho de aproximadamente 33%. Da mesma forma, foi obtido um ganho máximo do valor das variações de amplitudes das tensões de *von Mises* da ordem de 20,23%.

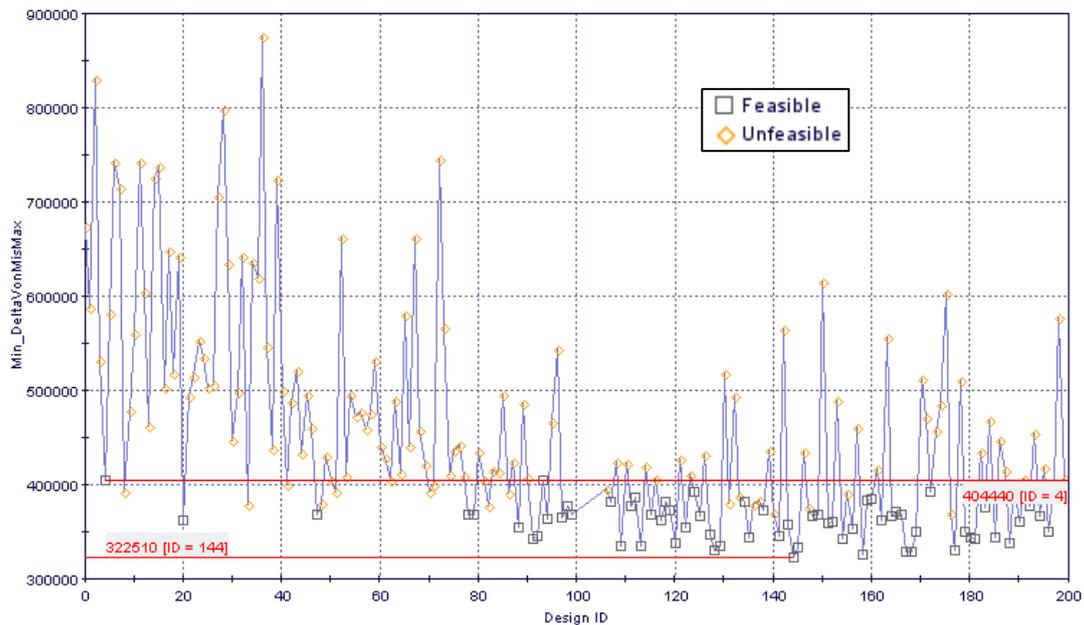


Figura 5.18 – Gráfico dos valores da função objetivo ao longo do processo de otimização das variações de amplitudes das tensões de *von Mises* - caso (c).

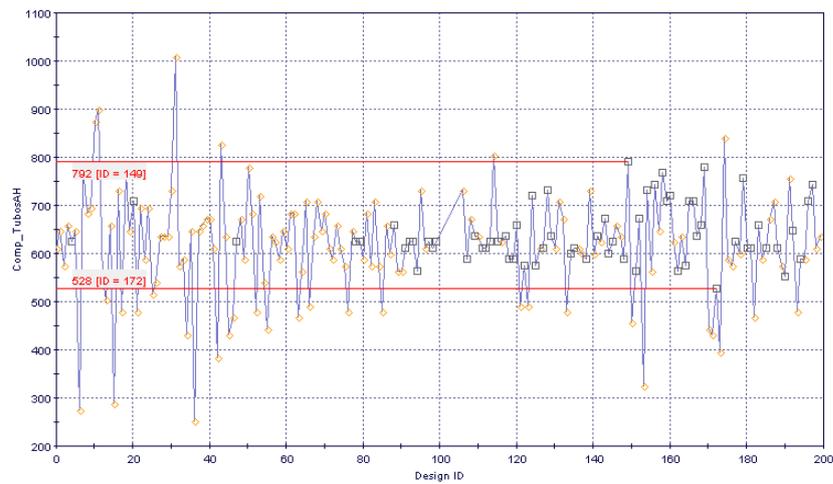


Figura 5.19 - Gráfico dos valores da função objetivo ao longo do processo de otimização dos comprimentos de trechos com amortecedores - caso (c).

É importante salientar que esses ganhos são independentes, ou seja, não acontecem na mesma configuração ou solução, pois em um problema de otimização multiobjetivo não existe uma única solução ótima senão um conjunto de boas soluções chamadas soluções não dominadas (vide Capítulo 3) situadas no espaço objetivo e pertencentes à Fronteira de Pareto.

A Figura 5.20 ilustra o espaço objetivo do problema abordado, no qual estão identificadas as soluções ou configurações viáveis e não viáveis encontradas durante o processo de otimização.

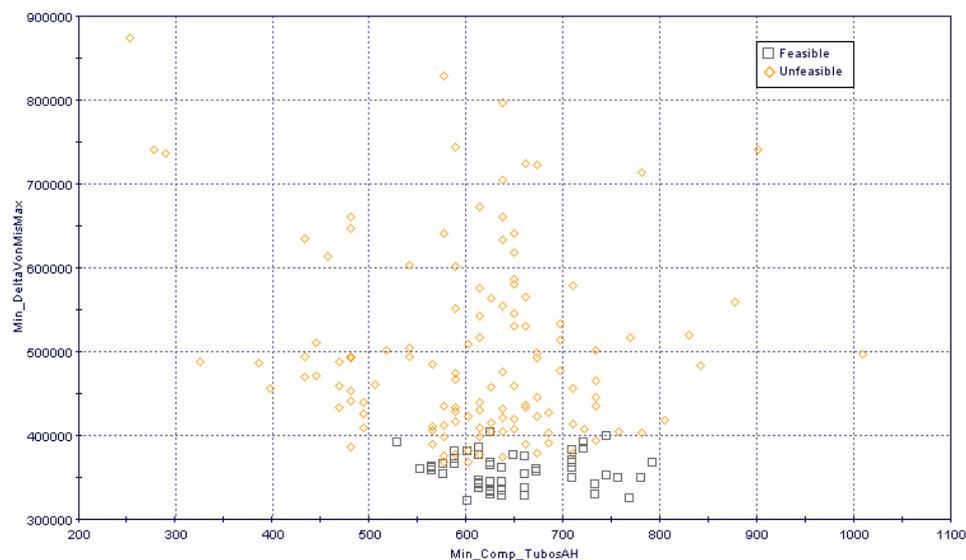


Figura 5.20 – Espaço objetivo do problema multiobjetivo.

Na busca de soluções não dominadas pertencentes à Fronteira de Pareto, a Figura 5.21 apresenta um detalhamento do espaço objetivo, permitindo identificar 5 soluções que têm igual intervalo de dominância e que, por sua vez, dominam as outras soluções, conforme explicado na teoria de otimização apresentada no Capítulo 3. Estas soluções apresentam melhores valores de variações das amplitudes das tensões de *von Mises* e do comprimento total de segmentos com amortecedores, do que as soluções dominadas.

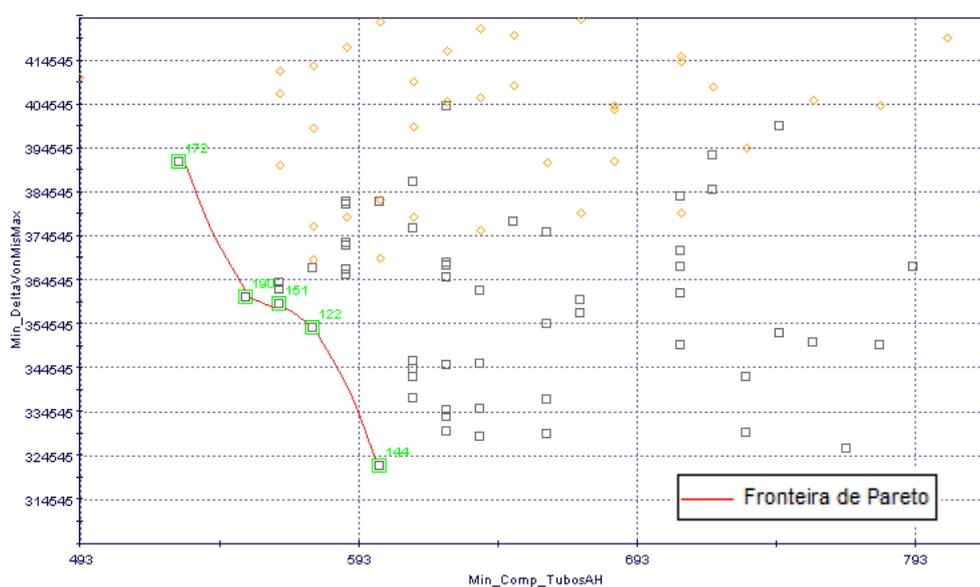


Figura 5.21 – Fronteira de Pareto do problema multiobjetivo – caso (c).

A Tabela 5.9 apresenta os parâmetros das cinco soluções não dominadas pertencentes à Fronteira de Pareto as quais correspondem às melhores configurações resultantes do processo de otimização multiobjetivo:

Tabela 5.9 – Parâmetros das configurações da Fronteira de Pareto – caso (c).

Configuração do riser	$\Delta VonMises$ (kN/m^2)	Comprimento AH (m)	DNL	Altura H (m)
1	322510	600	0.81754	100
2	353860	576	0.94362	79.6
3	359370	564	0.95703	38.2
4	360690	552	0.9433	37.1
5	391730	528	0.98918	77.7

Contudo, na prática, é necessário escolher uma única solução, definida por critérios adicionais e específicos do projeto. Para efeitos comparativos, a melhor configuração do problema multi-objetivo aqui abordado se encontra na configuração 3.

Finalmente, a Figura 5.22 apresenta os intervalos dos parâmetros de todas as configurações viáveis como resultado do processo de otimização. O ângulo de topo varia entre 9 e 14 graus; o comprimento total dos segmentos com amortecedores está compreendido entre 525 m e 800 m; as variações de amplitudes das tensões de *von Mises* estão entre 320000 kN/m² e 400000 kN/m²; e a altura *H* está compreendida entre 25 m e 110 m.

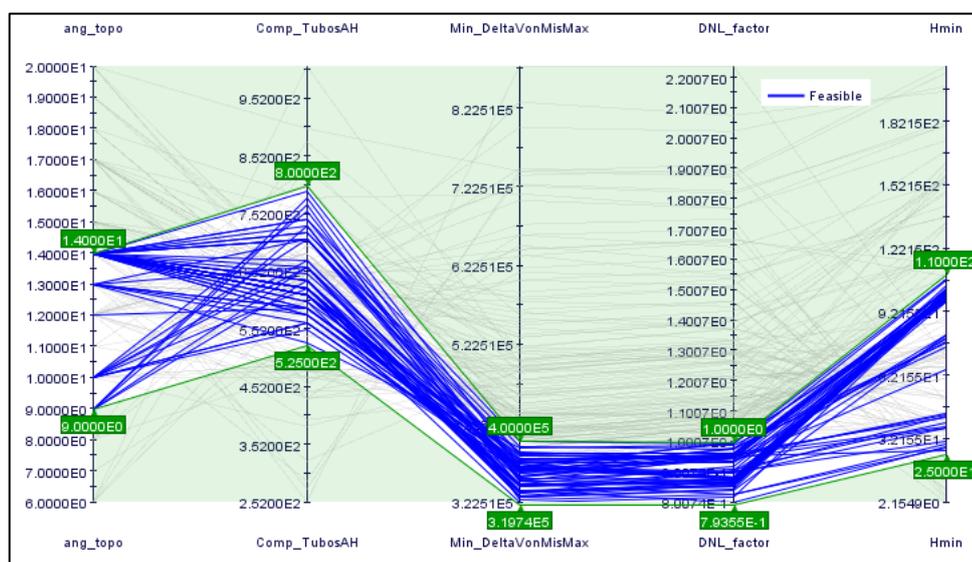


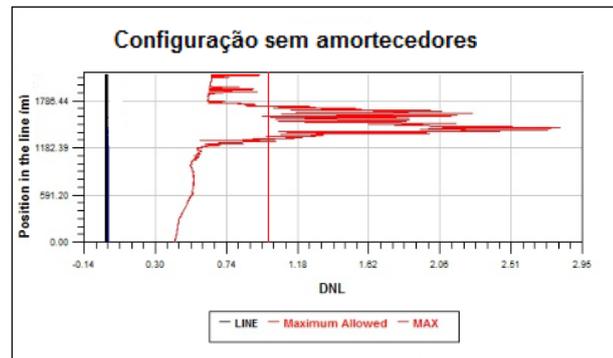
Figura 5.22 - Gráfico de coordenadas paralelas de parâmetros de otimização - caso (c).

5.4.1

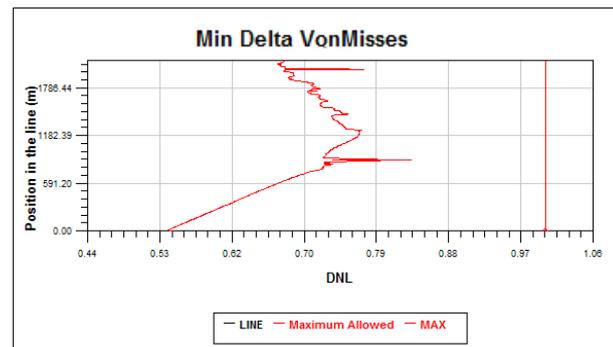
Comparação entre as abordagens avaliadas

Antes de realizar uma comparação de resultados entre as abordagens avaliadas, é importante comparar os valores de *DNL* da configuração ótima com amortecedores em cada abordagem com os valores de *DNL* de uma configuração sem amortecedores. Desta maneira, será possível analisar a viabilidade do uso de *risers* em catenária com amortecedores hidrodinâmicos.

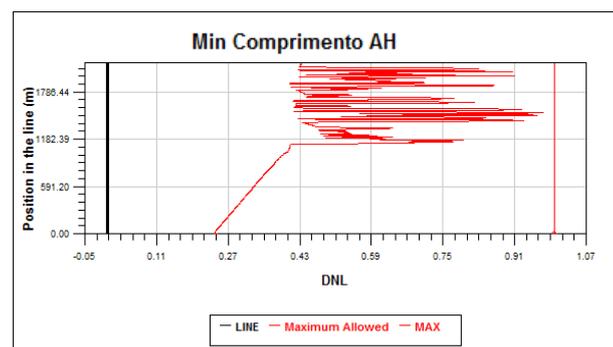
Assim, na Figura 5.23 são apresentados os valores de *DNL* de um *riser* em catenária sem amortecedores (Figura 5.23a) e os valores de *DNL* das configurações ótimas obtidas: na primeira abordagem de otimização (Figura 5.23b); na segunda abordagem de otimização (Figura 5.23c) e na terceira abordagem de otimização (Figura 5.23d).



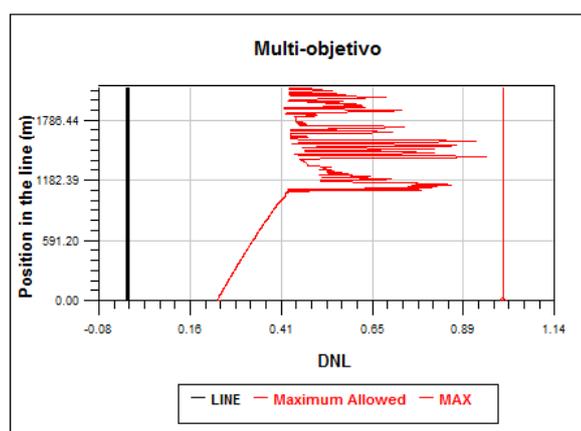
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.23 – Envoltórias dos fatores *DNL* da configuração original sem amortecedores e das configurações ótimas referentes à cada abordagem de otimização analisada.

Observa-se que os valores de *DNL* das configurações ótimas em cada uma das três abordagens são bem melhores do que os obtidos com a configuração original do *riser* sem amortecedores hidrodinâmicos. Esses resultados confirmam a viabilidade técnica do uso de *risers* em catenária com amortecedores hidrodinâmicos (RCHA).

As Tabelas 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14 apresentam os resultados obtidos em cada abordagem de otimização.

Na Tabela 5.10 são mostradas as percentagens das simulações realizadas que são viáveis, não viáveis ou que apresentaram erro. Para os três casos, a percentagem de configurações não viáveis é superior a 50%, sendo a abordagem do problema multiobjetivo (o terceiro caso analisado), aquela que apresenta um maior número de restrições violadas, devido à dificuldade de otimizar duas funções objetivo conflitantes, simultaneamente.

Tabela 5.10 – Resumo dos resultados das simulações por abordagem.

<i>Simulações</i>	<i>Abordagens da otimização</i>		
	<i>Minimizar ΔVonMises</i>	<i>Minimizar Comprimento AH</i>	<i>Multiobjetivo</i>
Viáveis (<i>Feasible</i>)	41.50%	39.00%	32.50%
Não viáveis (<i>Unfeasible</i>)	57.50%	59.50%	64.50%
Error	1.00%	1.50%	3.00%

A Tabela 5.11 apresenta a proporção de violações das restrições. Para os três casos, a restrição mais violada é a referente ao fator de utilização *DNL*.

Tabela 5.11 – Proporção de violações das restrições por abordagem.

Restrições	Abordagens da otimização		
	Minimizar $\Delta VonMises$	Minimizar Comprimento AH	Multiobjetivo
DNL	96.64%	95.97%	96.27%
Altura mínima H	3.36%	4.03%	3.73%

A Tabela 5.12 apresenta um resumo dos intervalos de variação dos parâmetros de otimização que correspondem a configurações viáveis depois do processo de otimização. Desta maneira, pode-se concluir que qualquer dado fora desses intervalos, vai resultar em uma violação de restrição e, portanto, em uma configuração não viável. Esses dados são importantes para a definição de faixas de variáveis de entrada mais adequadas e assim ter um espaço de busca que permita encontrar soluções ótimas de forma mais rápida.

Nota-se que os resultados para as três abordagens são muito similares. O ângulo de topo varia entre 9 e 15 graus, as variações de amplitudes das tensões de *von Mises* estão entre 320000 kN/m^2 e 400000 kN/m^2 , o comprimento total de segmentos com amortecedores hidrodinâmicos varia entre 500 m e 800 m e a altura *H* varia entre 25 m e 120 m. É importante salientar que, quanto maior for o comprimento total de segmentos com amortecedores, maior será a altura *H* resultante, devido ao maior alívio do peso total submerso do *riser*.

Tabela 5.12 – Intervalos de variação dos parâmetros de otimização das configurações viáveis em cada abordagem.

Intervalos dos parâmetros de otimiz.	Abordagens da otimização		
	Minimizar $\Delta VonMises$	Minimizar Comprimento AH	Multiobjetivo
Intervalo Ângulo de topo	[9 , 14]	[11 , 15]	[9 , 14]
Intervalo $\Delta VonMisses$	[330000 , 400000]	[320000 , 415000]	[320000 , 400000]
Intervalo Comp. AH	[620 , 800]	[490 , 720]	[520 , 800]
Intervalo Altura H	[30 , 100]	[55 , 120]	[25 , 110]

A Tabela 5.13 apresenta os valores das variáveis de entrada das configurações ótimas referentes a cada abordagem de otimização estudada anteriormente.

Tabela 5.13 – Variáveis de entrada das configurações ótimas referentes a cada abordagem.

Variáveis de entrada da configuração ótima	Abordagens da otimização		
	Minimizar $\Delta VonMises$	Minimizar Comprimento AH	Multiobjetivo
Ângulo de topo (<i>Ang_top</i>)	14.0	10.0	10.0
Comprimento do segmento três (<i>L3</i>)	96.0	96.0	108.0
Comprimento do segmento quatro (<i>L4</i>)	72.0	132.0	132.0
Comprimento do segmento cinco (<i>L5</i>)	96.0	216.0	216.0
Comprimento do segmento seis (<i>L6</i>)	60.0	84.0	84.0
Comprimento do segmento sete (<i>L7</i>)	216.0	84.0	168.0
Comprimento do segmento oito (<i>L8</i>)	60.0	156.0	60.0
Comprimento do segmento nove (<i>L9</i>)	240.0	48.0	36.0
Comprimento do segmento dez (<i>L10</i>)	36.0	120.0	12.0
Comprimento do segmento onze (<i>L11</i>)	120.0	48.0	36.0
Comprimento do segmento treze (<i>L13</i>)	1484.0	1496.0	1628.0

Finalmente, a Tabela 5.14 apresenta o ganho percentual do valor da função objetivo ao final do processo de otimização comparado com o valor desta função na configuração inicial (ou semente), ou seja, antes de iniciar o processo de otimização. Na primeira abordagem, referente à minimização das variações de amplitudes das tensões de *von Mises*, os valores da função objetivo da configuração inicial e da configuração ótima são, respectivamente, 404440 kN/m^2 e 332640 kN/m^2 , resultando em um ganho de 18%. Na segunda abordagem, ou seja, referente à minimização do comprimento total dos segmentos amortecidos, os valores da função objetivo avaliados nas configurações inicial e ótima são, respectivamente, 864 m e 492 m, resultando em um ganho de 43%. Finalmente, na terceira abordagem, a multiobjetivo, o valor da primeira função objetivo, correspondente às variações de amplitudes das tensões de *von Mises* é de 359370 kN/m^2 , resultando em um ganho de 11% enquanto que o ganho referente à segunda função objetivo (associada à minimização do comprimento total de segmentos amortecidos) é da ordem de 35%.

Tabela 5.14 – Ganho percentual do valor da função objetivo durante o processo de otimização.

	Minimizar $\Delta VonMises$	Minimizar Comprimento AH	Multiobjetivo	
			$\Delta VonMises$	Comprimento AH
Configuração inicial	404440	864	404440	864
Configuração ótima	332640	492	359370	564
% Ganho	18%	43%	11%	35%