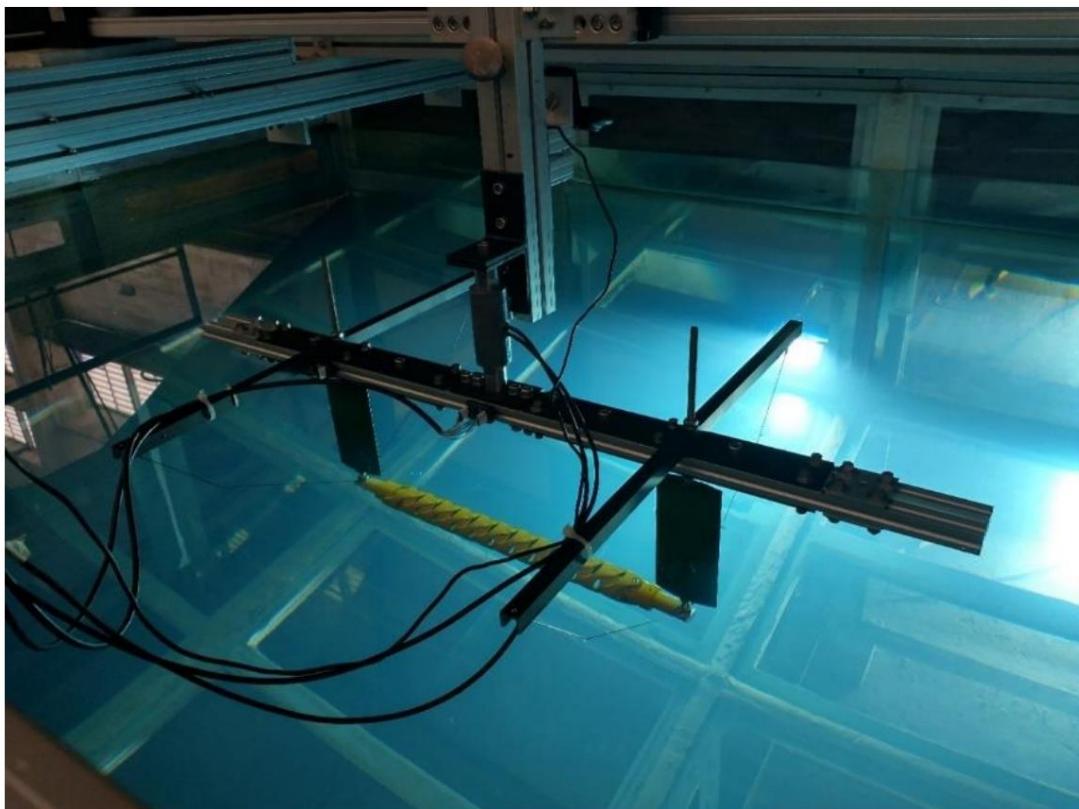


 Laboratório de Ondas e Correntes COPPE/UFRJ	Relatório de Análise Experimental	Emitido por: Daniel Costa
		Aprovado por: Antonio Carlos Fernandes & Joel Sena Sales Junior
	SS7_21_02 - EAR_01_B	Emitido: 2022/08/09

PROJETO	Código	SS7_21_02
	Título	Testes hidrodinâmicos para riser de junta de cardan
	Cliente	Submarino7
	Data efetiva	2021
	Gerente de pesquisa	Daniel Costa
	Coordenadores	Antonio Carlos Fernandes & Joel Sena Sales Junior



RELATÓRIO	Código	EAR_01
	Modelo	Relatório de Análise Experimental
	Autor	Daniel Costa
	Título	Relatório de Teste Modelo de oscilação forçada do Riser da Junta Gimbal
	Revisão	B
	Publicado [aaa/mm/dd]	09/08/2022



Universidade Federal do Rio de Janeiro

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

Laboratório de Ondas e Correntes (LOC)

DOCUMENTO HISTÓRICO

DC = Daniel de Oliveira Costa – LOC

JS = Joel Sena Sales Junior - LOC

ACF = Antonio Carlos Fernandes – LOC

FR = Felipe Ribeiro - SS7



Universidade Federal do Rio de Janeiro

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

Laboratório de Ondas e Correntes (LOC)



Universidade Federal do Rio de Janeiro

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

Laboratório de Ondas e Correntes (LOC)

Informações documentadas	DI – [Iniciais do Documento]
Versão do modelo	0
Autores	Daniel de Oliveira Costa Rafaela Sabrina Carneiro
Aprovado por	Antonio Carlos Fernandes
Questão [aaa/mm/dd]	10/12/2021



Laboratório de
Ondas e Correntes
COPPE|UFRJ

Este documento corresponde a um relatório interno referente a um procedimento realizado no Laboratório de Ondas e Correntes (LOC – COPPE/UFRJ) e todos os direitos são reservados a ele. É proibida qualquer reprodução parcial ou integral do conteúdo deste relatório sem a devida autorização, sob pena de adoção das medidas cabíveis nas esferas cível e criminal se necessário.

ÍNDICE

1.	Introdução.....	7
2.	Resumo da configuração experimental.....	8
2.1.	Oscilações normais na escala 1:30	8
2.2.	Oscilações axiais na escala 1:30	9
2.3.	Oscilações normais e axiais na escala 1:9	11
2.4.	Efeito da rotação do modelo	11
3.	Visão geral dos dados experimentais	13
3.1.	Séries temporais típicas	13
3.2.	Análise de repetibilidade	16
3.3.	Efeito da rotação axial do modelo	18
4.	Procedimento para análise de dados	21
4.1.	Visão geral.....	21
4.2.	Filtragem.....	22
4.3.	Sincronização	23
4.4.	Ajuste de dados para calcular os coeficientes hidrodinâmicos	24
5.	Coeficientes hidrodinâmicos GJR.....	25
5.1.	escala 1:9	25
5.1.1.	Oscilações normais na escala 1:9	25
5.1.2.	Oscilações axiais na escala 1:9	28
5.1.3.	Efeito da rotação do modelo	31
5.1.4.	Efeito da porosidade do modelo	32
5.2.	Escala 1:30	33
5.2.1.	Oscilação normal na escala 1:30	33
5.2.2.	Oscilação axial na escala 1:30	35
5.2.3.	Efeito da porosidade do modelo	37
5.3.	Comentários finais sobre os resultados	38
6.	Referências.....	39
	Apêndice A. Análise de repetibilidade	40
A.1.	Oscilações axiais na escala 1:9	40
A.2.	Oscilações normais na escala 1:9	43
A.3.	Oscilações axiais na escala 1:30 - 1 ^{rua} conjunto de testes	45
A.4.	Oscilações normais na escala 1:30 – 1 ^{rua} conjunto de testes	48
A.5.	Oscilações axiais na escala 1:30 - 2 nd conjunto de testes	51



Universidade Federal do Rio de Janeiro

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

Laboratório de Ondas e Correntes (LOC)

A.6. Oscilações normais na escala 1:30 – 2	nd conjunto de testes	54
--	--	----



Universidade Federal do Rio de Janeiro

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

Laboratório de Ondas e Correntes (LOC)

1. Introdução

Este documento apresenta um relatório sobre a análise experimental correspondente ao conjunto de testes de modelo realizados no Tanque de Visualização em LOC para os testes hidrodinâmicos de oscilações forçadas de modelos rígidos do Gimbal Joint Riser (GJR) em duas escalas diferentes, 1:9 e 1h30. A matriz de teste completa e as condições de teste são apresentadas, conforme projetado, nos Formulários de Solicitação de Teste ([1] e [2]) e no Relatório de Procedimentos de Teste [3]. As montagens para ambas as escalas estão resumidas no Relatório de Configuração Experimental [4]. O Relatório de Teste de Modelo [5] apresenta os detalhes correspondentes aos testes de modelo, registro de dados e análise de repetibilidade. Esses relatórios foram emitidos anteriormente para o cliente.

Este relatório resume brevemente as montagens fornecidas, bem como a matriz de teste, seguida das séries temporais típicas adquiridas por cada sensor. O procedimento para pós-processamento dos dados é discutido e os principais resultados da análise experimental são resumidos no Capítulo 5.

2. Resumo da configuração experimental

Esta seção revisa brevemente a configuração experimental fornecida para os testes em ambas as escalas. Mais detalhes em [4]. Os testes consistiram em oscilações forçadas do modelo GJR em duas direções diferentes, uma alinhada ao seu comprimento (oscilação axial) e outra perpendicular ao seu comprimento (caso normal).

2.1. Oscilações normais na escala 1:30

A Figura 2-1 exibe o desenho esquemático da montagem com as medições tiradas da configuração ilustrada pela Figura 2-2, que exibe imagens da configuração real destacando sensores e componentes importantes. A Tabela 2-1 lista todos os componentes usados nesta montagem com suas massas.

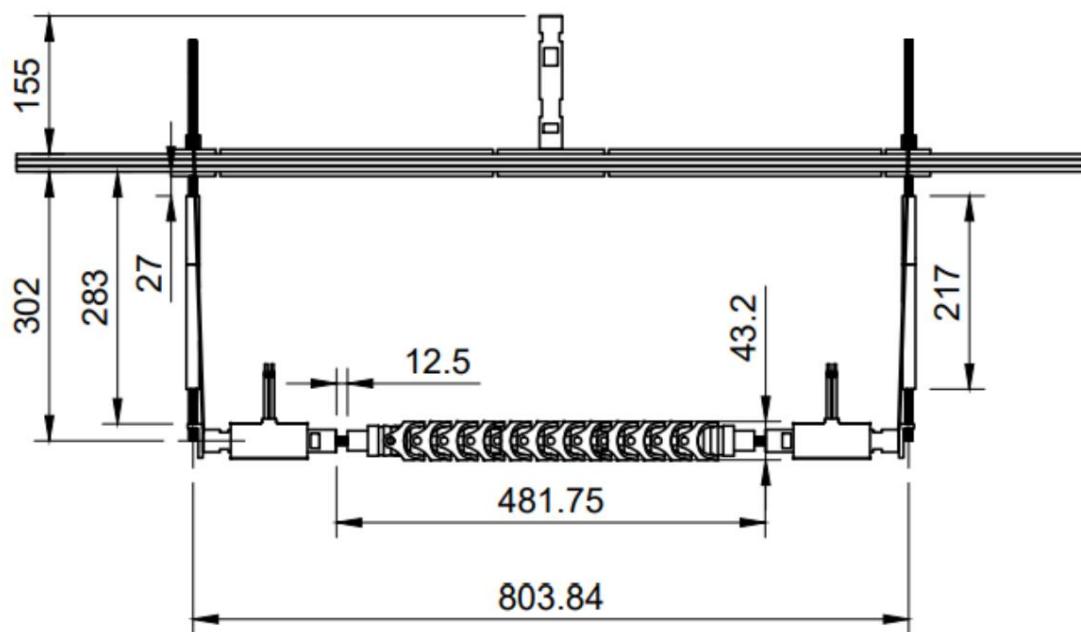


Figura 2-1: Desenho esquemático da configuração 1:30 para as condições normais de oscilação com zoom na estrutura de suporte (dimensões em mm)

Tabela 2-1: Lista de componentes em montagens de oscilação normal na escala 1:30

Componente	Massa (kg)
vigas estruturais 20x20 mm	1.437
NACA0018+haste (cada)	0,299
Sistema de fixação de cabos (cada)	0,576
Célula de carga superior	0,899
Célula de carga submersa (cada)	0,899
Modelo	0,2995
TOTAL	6.184

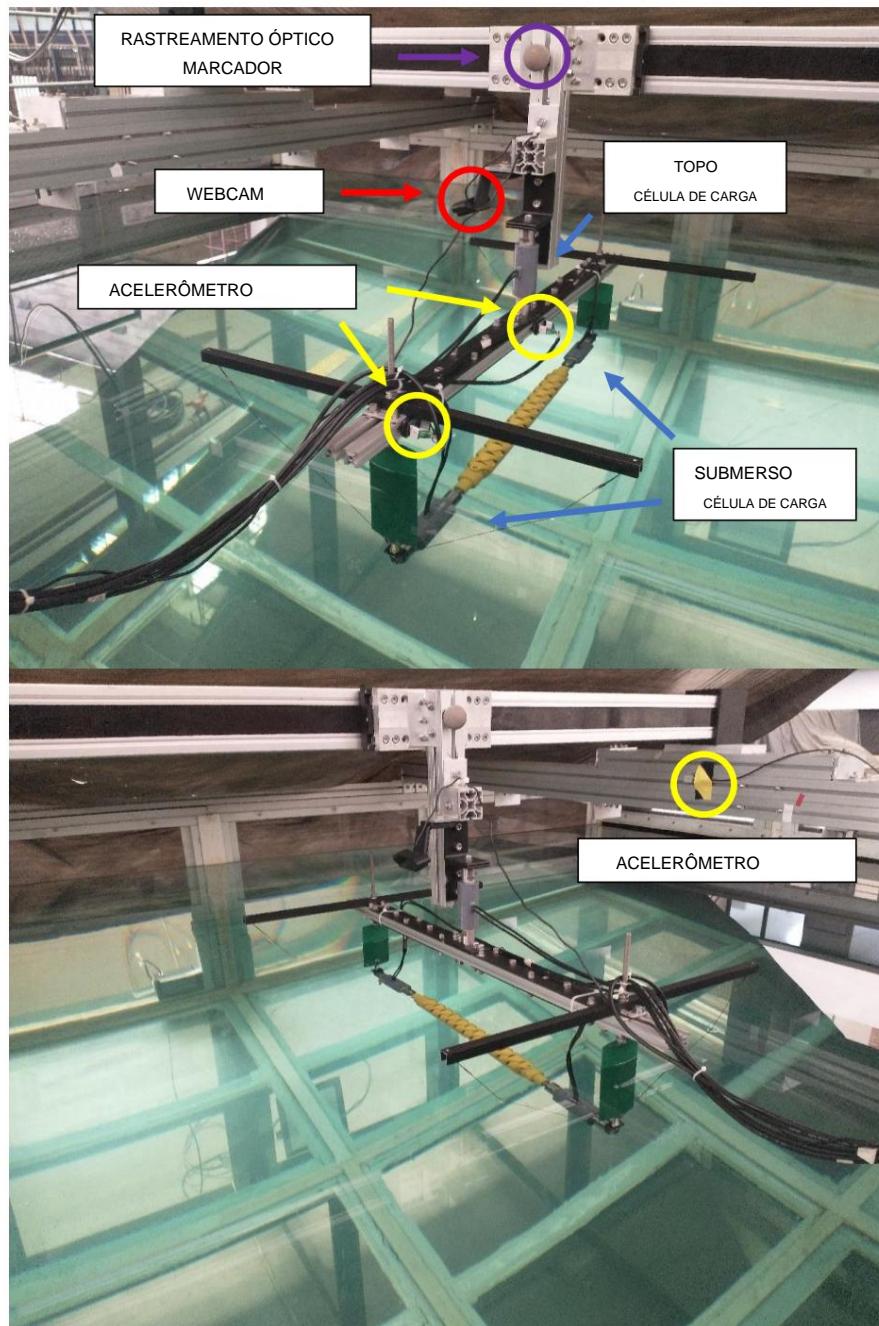


Figura 2-2: Montagem experimental para oscilações normais na escala 1:30 - vista de perto

2.2.Oscilações axiais na escala 1:30

A Figura 2-3 exibe o desenho esquemático da montagem com as medições tiradas da configuração ilustrada pela Figura 2-4, que exibe imagens da configuração real destacando sensores e componentes importantes. A Tabela 2-2 lista todos os componentes usados nesta montagem com suas massas.

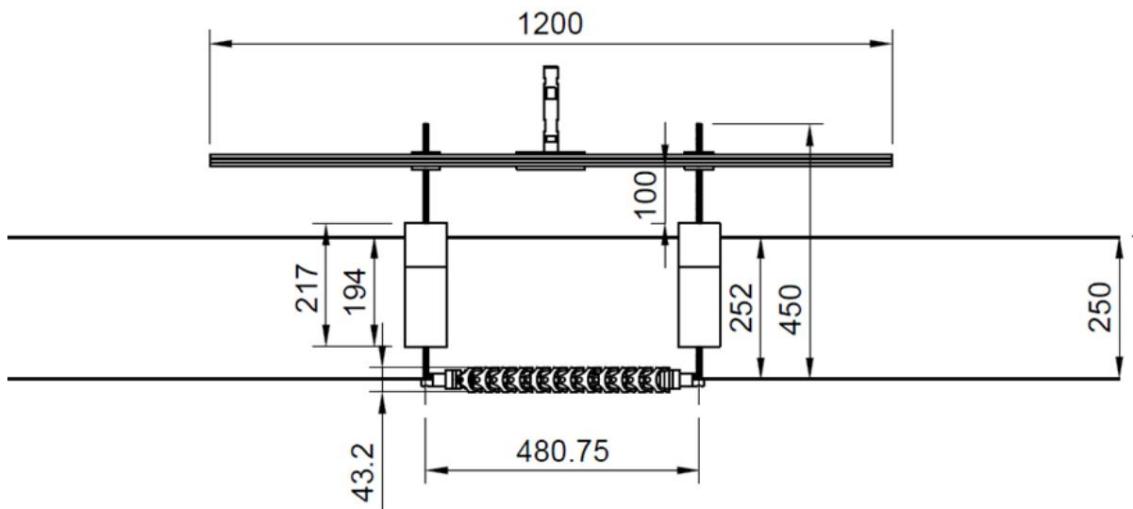


Figura 2-3: Desenho esquemático da configuração 1:30 para as condições de oscilação axial com zoom na estrutura de suporte (dimensões em mm)

Tabela 2-2: Lista de componentes em conjuntos de oscilação axial na escala 1:30

Componente	Massa (kg)
vigas estruturais 20x20 mm	1.437
NACA0018+haste (cada)	0,299
Sistema de fixação de cabos (cada)	0,576
Célula de carga superior	0,899
Modelo	0,2995
TOTAL	4.386

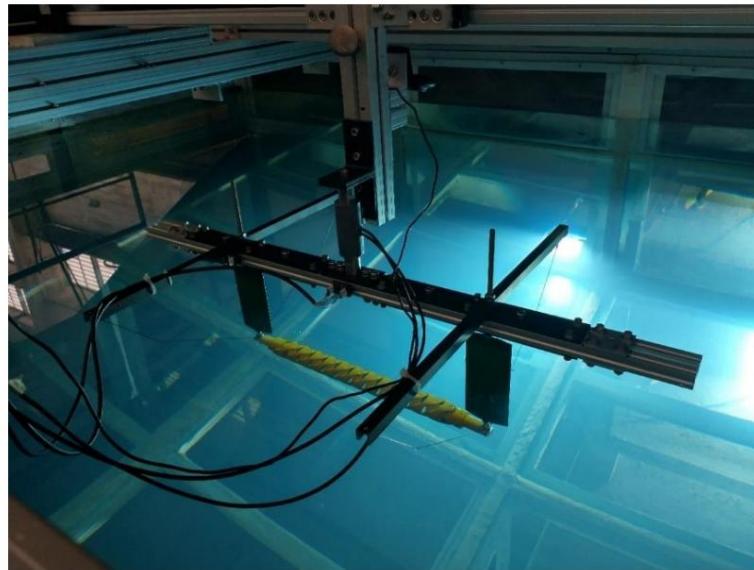


Figura 2-4: Montagem experimental para oscilações axiais na escala 1:30 – vista de perto

2.3. Oscilações normais e axiais na escala 1:9

A montagem na escala 1:9 difere ligeiramente da escala 1:30, alternando de um suporte de ponto único para uma estrutura de suporte duplo, conforme ilustrado na Figura 2-5. Os mesmos componentes foram usados nas condições axiais e normais, ao contrário da escala 1:30 em que as células de carga submersas foram removidas para as oscilações axiais.

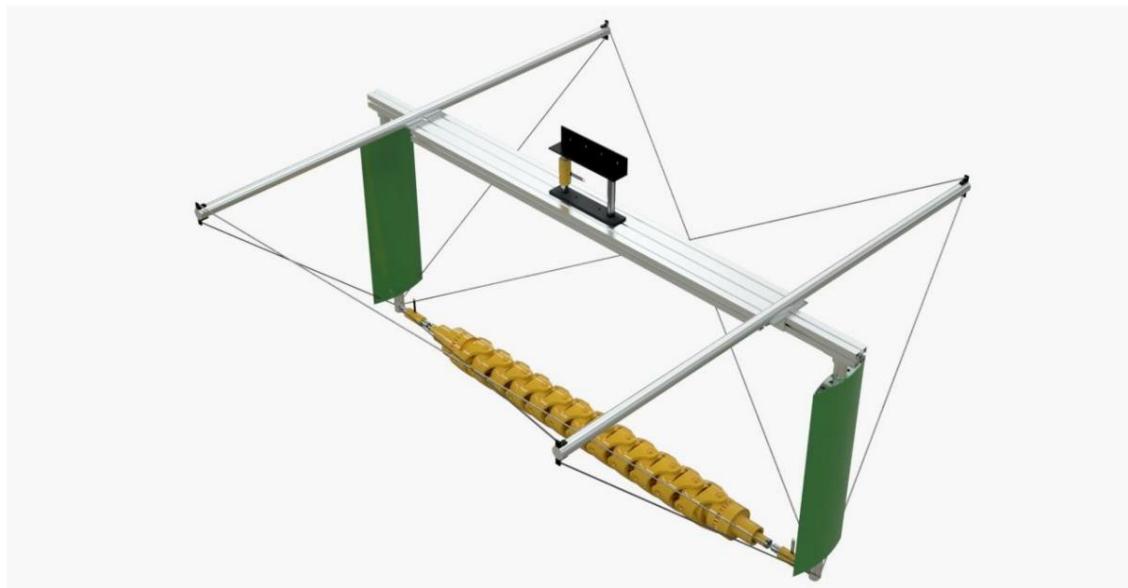


Figura 2-5: Desenho esquemático da configuração 1:9 para as condições normais de oscilação

Tabela 2-3: Lista de componentes em conjuntos de oscilação axial e normal em escala 1:9

Componente	Massa (kg)
Conjunto de 3 vigas estruturais de 50x50 mm (1)	11.340
Suporte duplo com célula de carga superior (2)	4.710
Sistema de suporte de cabos - cada (3)	0,830
NACA0018+tubo – cada (4)	2.450
Célula de carga submersa - cada (5)	0,899
Modelo	5.110
TOTAL	29.518

2.4. Efeito da rotação do modelo

Nas premissas do ensaio [6] dos ensaios hidrodinâmicos, foi definido que o modelo GJR seria testado em duas condições diferentes, uma do modelo a 00DEG e a segunda com o modelo girado 45 graus em torno do seu eixo para verificar qualquer efeito do ângulo dos segmentos do corpo sobre as cargas hidrodinâmicas. A Figura 2-6 ilustra a diferença, que foi testada em ambas as escalas e em ambas as condições de oscilação (axial e normal).



Figura 2-6: Diferentes ângulos em que o modelo GJR foi testado

3. Visão geral dos dados experimentais

Este capítulo apresenta uma visão geral dos dados experimentais adquiridos durante os testes nas escalas 1:9 e 1:30. Séries temporais típicas são exibidas e o estado estacionário é caracterizado. Um resumo da análise de repetibilidade é apresentado neste capítulo e em detalhes no Apêndice A.

3.1. Série temporal típica

A Figura 3-1 ilustra a série temporal típica adquirida durante o primeiro conjunto de excitação axial na escala 1:30, mostrando o movimento imposto no gráfico superior e a carga medida pela célula de carga superior no gráfico inferior. A imagem compara os dados brutos com os filtrados em ambos os gráficos, usando um filtro passa-baixa Butterworth de 4^a ordem com uma frequência de corte de 5 Hz, 6 vezes maior que a maior frequência a ser testada (0,83 Hz ou 1,2 s no período). O gráfico superior mostra que os dados filtrados se sobrepõem à série temporal bruta, enquanto o gráfico inferior mostra o comportamento ruidoso na carga logo após o início do movimento. Este comportamento ruidoso está relacionado à vibração estrutural devido ao solavanco e normalmente desaparece após alguns ciclos, conforme ilustrado pelo gráfico inferior, mostrando a sobreposição das séries temporais filtradas e brutas para a carga após 10 s.

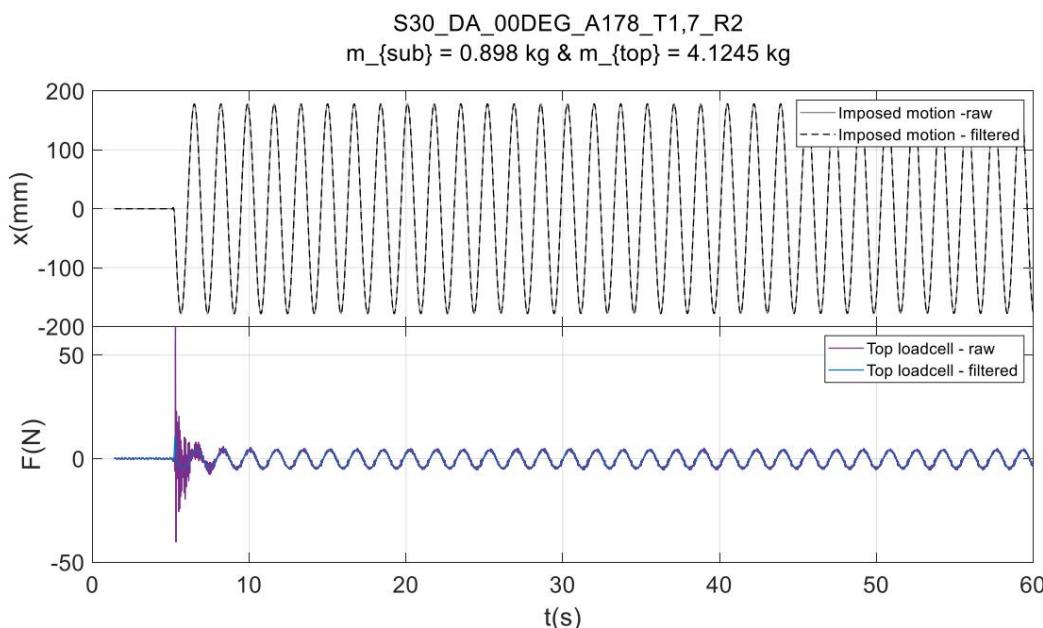


Figura 3-1: Série temporal para movimento (superior) e carga (inferior)

Para melhor visualização desta relação, a Figura 3-2 apresenta o gráfico de densidade espectral correspondente à série temporal de carga, apresentada acima, calculada através de uma FFT simples (Fast Fourier Transform) para os primeiros ciclos após o início do movimento imposto até 10 s. A FFT mostra que a primeira frequência de pico corresponde à oscilação imposta, e picos adicionais são observados para frequências maiores, especialmente dentro da largura de banda de frequências observadas para o PMM e a resposta estrutural durante os testes de martelo [4].

A Figura 3-3 estende a análise mostrando a FFT de carga calculada para diferentes intervalos, começando com o primeiro ciclo de oscilação, que mostra energia significativa em grandes frequências, após o primeiro ciclo e antes de 10 s, mostrando significativamente menos energia, e após 10 s, com quase nenhuma energia em frequências diferentes da imposta. Este efeito é naturalmente mais intenso para

maiores acelerações (maiores frequências e amplitudes), mas foi observada em todos os casos. Esta análise reforça os 5 Hz adotados para a frequência de corte do filtro passa-baixas.

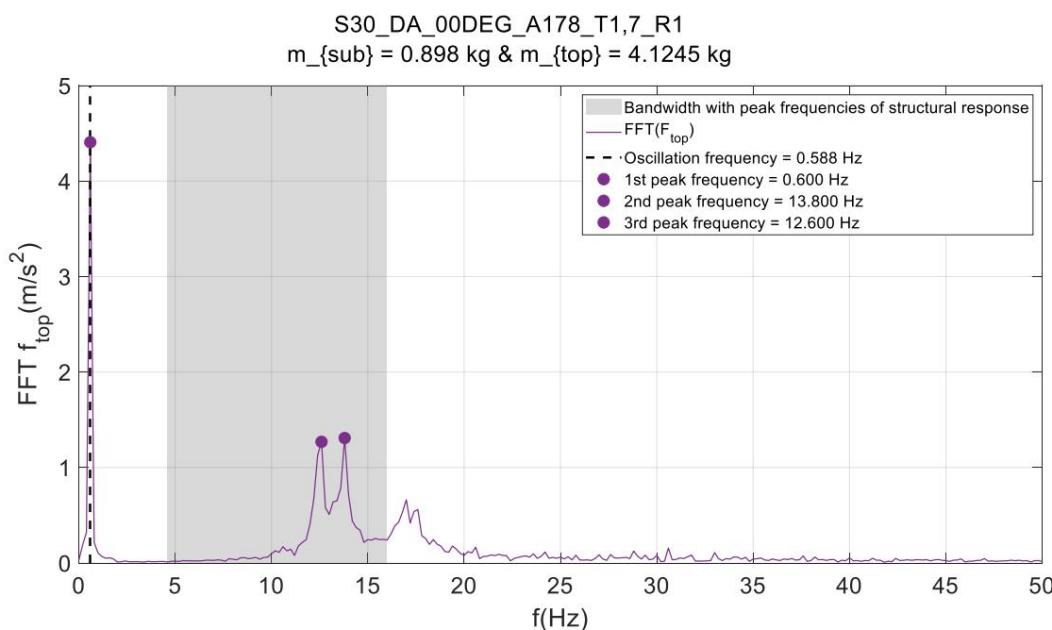


Figura 3-2: Densidade do espectro de potência da carga logo após o início do movimento

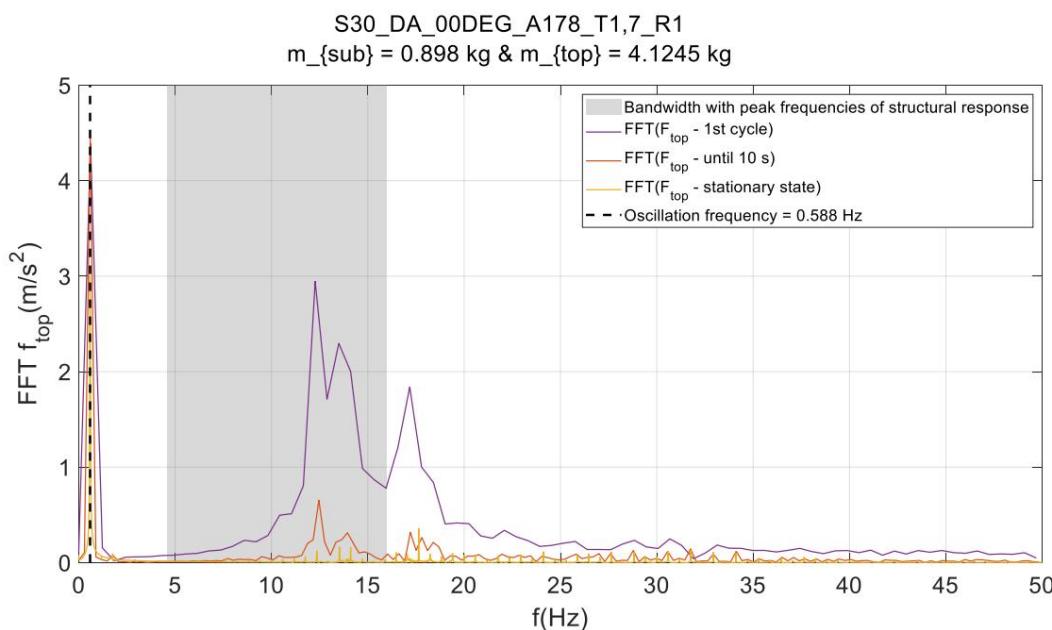


Figura 3-3: Densidade do espectro de potência da carga em momentos diferentes

A Figura 3-4 mostra a série temporal correspondente ao caso com 178 mm de amplitude e 1,7 s no período. Nesta figura, o gráfico superior mostra a série temporal de movimento do lance com o modelo, enquanto o 2º gráfico mostra o movimento do lance com a estrutura sozinha, sem o modelo. O comportamento harmônico no movimento imposto é claro dada a forma senoidal em ambos os gráficos. A comparação de ambos mostra inicialmente uma dessincronização, que é consequência do início manual do movimento durante cada corrida. No entanto, as amplitudes em ambas as corridas são

quase o mesmo, conforme mostrado são as legendas em cada parcela (177,93 mm e 178,17 mm, respectivamente). Isso aponta para a necessidade de um procedimento de sincronização no pós-processamento dos dados, para que a comparação entre os dados com e sem o modelo seja realizada adequadamente.

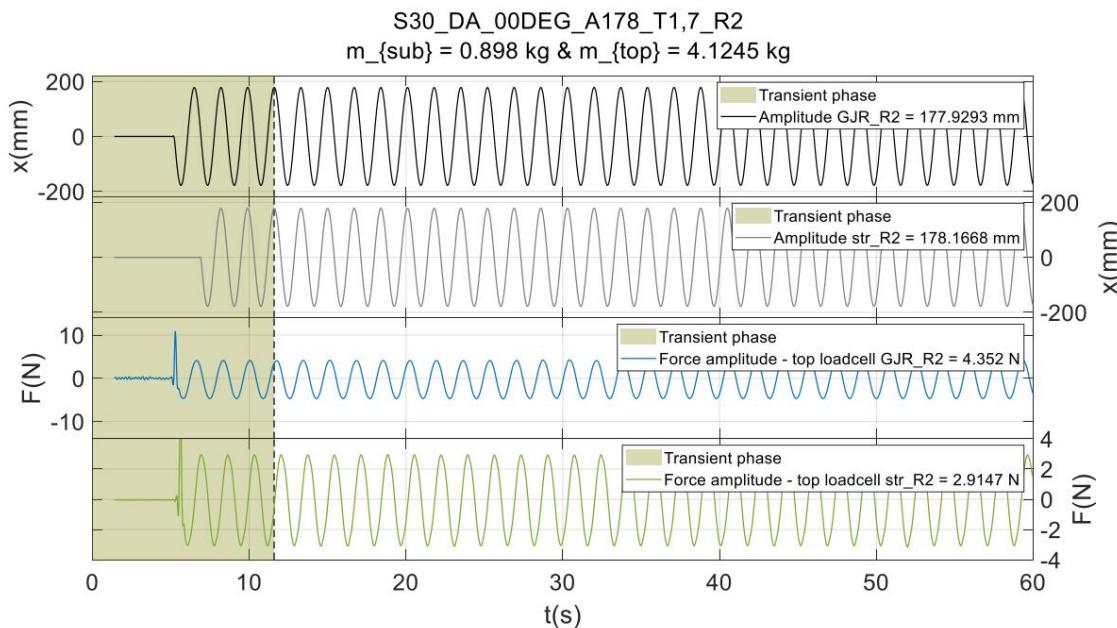


Figura 3-4: Séries temporais de movimento do modelo (1º gráfico), movimento da estrutura sozinha (2º gráfico) e as cargas correspondentes a ambos em oscilação axial na escala 1:30

A imagem acima também apresenta as séries temporais de carga adquiridas pela célula de carga superior em ambos os casos, com e sem o modelo nas 3^a e 4^a parcelas, respectivamente. O primeiro aspecto que se destaca em ambas as parcelas é o aumento abrupto da carga devido ao solavanco no início do movimento. Esse solavanco, por sua vez, fica evidente quando se observa como a série temporal do movimento começa imediatamente como uma função harmônica, sem uma aceleração suave.

Geralmente, o comportamento típico em oscilação normal é muito semelhante ao que foi apresentado para a excitação axial. A principal diferença para o caso anterior é a magnitude da carga, que é significativamente mais intensa que a excitação axial.

A principal diferença observada para os testes em 1:9 em relação ao 1:30 aqui ilustrado é a magnitude das cargas e a escala de tempo. No geral, o comportamento típico apontado neste capítulo é válido para o modelo maior.

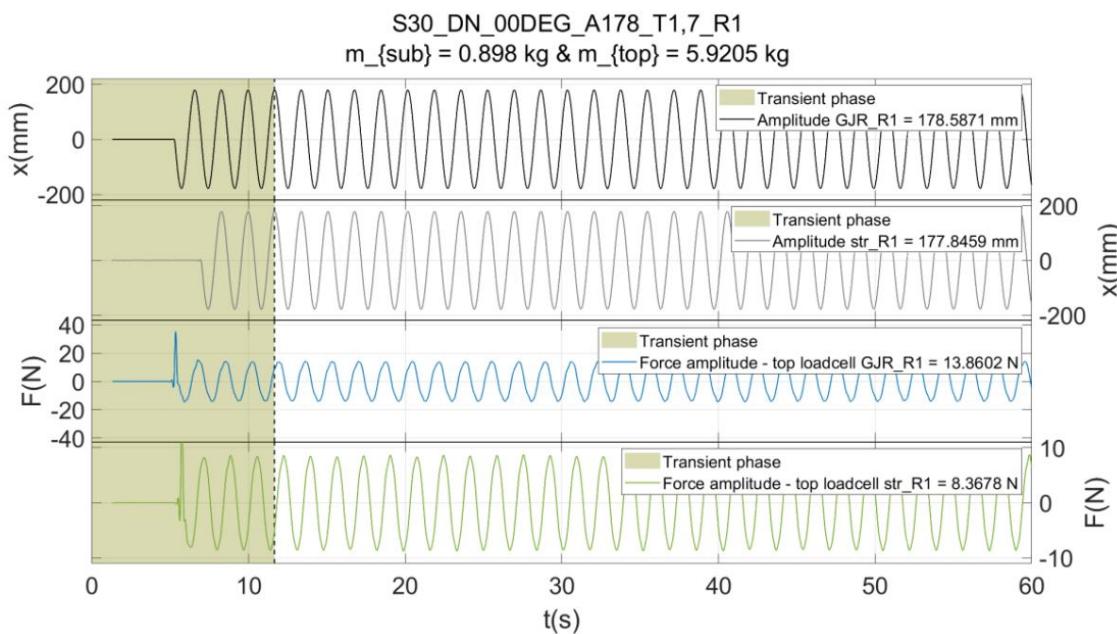


Figura 3-5: Série temporal de movimento do modelo (1º gráfico), movimento da estrutura sozinho (2º gráfico) e as cargas correspondentes a ambos em oscilação normal na escala 1:30

3.2. Análise de repetibilidade

Conforme planejado na matriz de teste, cada caso foi repetido três vezes para verificar a repetibilidade. Neste ponto, o parâmetro mais importante nesta análise é a comparação entre corridas equivalentes. Isso foi verificado calculando a amplitude do movimento e da carga através do equivalente harmônico que, conforme mostrado na Equação (3.1), é proporcional ao desvio padrão da série temporal e pode ser implementado em qualquer sinal (carga ou movimento).

Mesmo sabendo, como mencionado acima, que em muitos casos a série temporal do movimento não foi harmônica – embora fosse cíclica – este parâmetro fornece uma boa indicação da **ergodicidade dos testes**.

$$= \ddot{y}^2 \bar{t} \quad (3.1)$$

A Figura 3-6 exibe gráficos de amplitude de movimento e carga calculados por meio de (3.1), este último usando o sinal filtrado. As amplitudes de movimento são plotadas em barras, enquanto a amplitude de carga em uma curva, para melhor visualização de ambos os parâmetros simultaneamente. Cada 3 pontos consecutivos no gráfico abaixo representam as 3 corridas de cada caso. Nota-se que a amplitude dos movimentos não varia significativamente em cada corrida. As amplitudes de carga apresentam variação um pouco maior quando comparadas ao movimento, mas ainda pequenas o suficiente para indicar repetibilidade do teste.

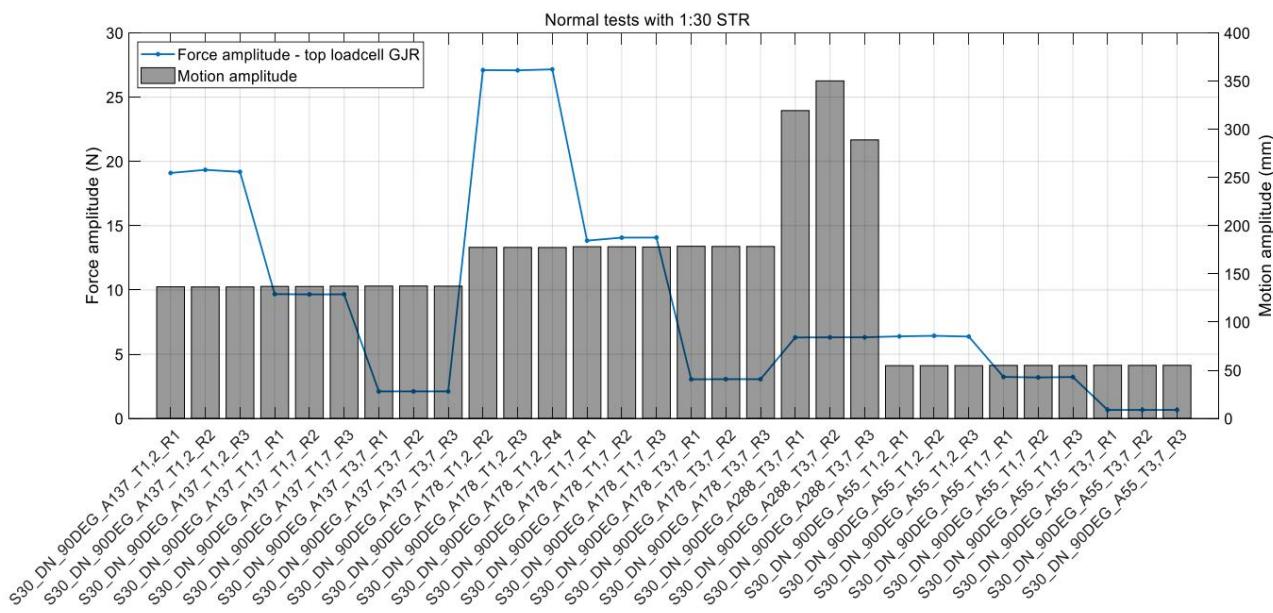


Figura 3-6: Amplitudes de movimento (barras) e carga (curva azul) em cada execução - verificação de repetibilidade para oscilações normais a 90° na escala 1:30

A Tabela 3-1 apresenta as amplitudes de movimento e carga para cada caso, e o erro RMS sobre a média para cada conjunto de 3 corridas. O erro RMS sobre o valor médio indica uma variação inferior a 1% em todos os casos para o movimento de amplitude, enquanto a variação na carga chega a 5% em relação ao valor médio em alguns casos. O maior percentual, comparado ao observado para o movimento, deve-se ao pequeno valor médio para a carga, como visto a seguir.

Tabela 3-1: Verificação de repetibilidade para oscilações normais de 1:30 a 90°

CASO	AMPLITUDE DE MOVIMENTO					AMPLITUDE DE CARGA				
	R1 (milímetros)	R2 (milímetros)	R3 (milímetros)	SIGNIFICA	ERRO % RMS	R1 (N)	R2 (N)	R3 (N)	SIGNIFICA	ERRO % RMS
S30_DN_90DEG_A55_T1,2	54,83	54,82	54,83	54,83 0,01%		6,39	6,43	6,37	6,40 0,40%	
S30_DN_90DEG_A82_T1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S30_DN_90DEG_A137_T1,2	136,59	136,44	136,46	136,50 0,05%	19,10 19,35 19,19 19,21 0,52%					
S30_DN_90DEG_A178_T1,2	177,54	177,48	177,41	177,47 0,03%	27,11 27,09 27,17 27,12 0,12%					
S30_DN_90DEG_A288_T1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S30_DN_90DEG_A55_T1,7	55,04	55,06	54,99	55,03 0,05%		3,24	3,19	3,23	3,22 0,58%	
S30_DN_90DEG_A82_T1,7	82,20	82,04	82,01	82,08 0,10%		5,03	5,04	5,03	5,04 0,09%	
S30_DN_90DEG_A137_T1,7	137,07	136,93	137,27	137,07 0,10%	S30_DN_90DEG_A178_T1,7	9,68	9,66	9,66	9,67 0,10%	
178,20 178,15 177,88 178,08 0,08%	13,84	14,07	14,08	14,00 0,80%						
S30_DN_90DEG_A288_T1,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S30_DN_90DEG_A55_T3,7	55,18	55,09	55,15	55,14 0,07%		0,67	0,67	0,67	0,67 0,21%	
S30_DN_90DEG_A82_T3,7	82,33	82,23	82,18	82,25 0,07%		1,07	1,07	1,07	1,07 0,03%	
S30_DN_90DEG_A137_T3,7	137,35	137,41	137,28	137,35 0,04%	S30_DN_90DEG_A178_T3,7	2,11	2,11	2,11	2,11 0,05%	
178,65 178,46 178,44 178,52 0,05%	S30_DN_90DEG_A288_T3,7	319,43	350,24	289,06		3,05	3,06	3,06	3,06 0,17%	
319,58 7,82%						6h30	6,31	6,32	6,31 0,09%	

Essa análise foi realizada para ambas as escalas e todas as condições, com o modelo GJR e sem ele. O Apêndice A apresenta os gráficos e tabelas correspondentes a cada caso em detalhes.

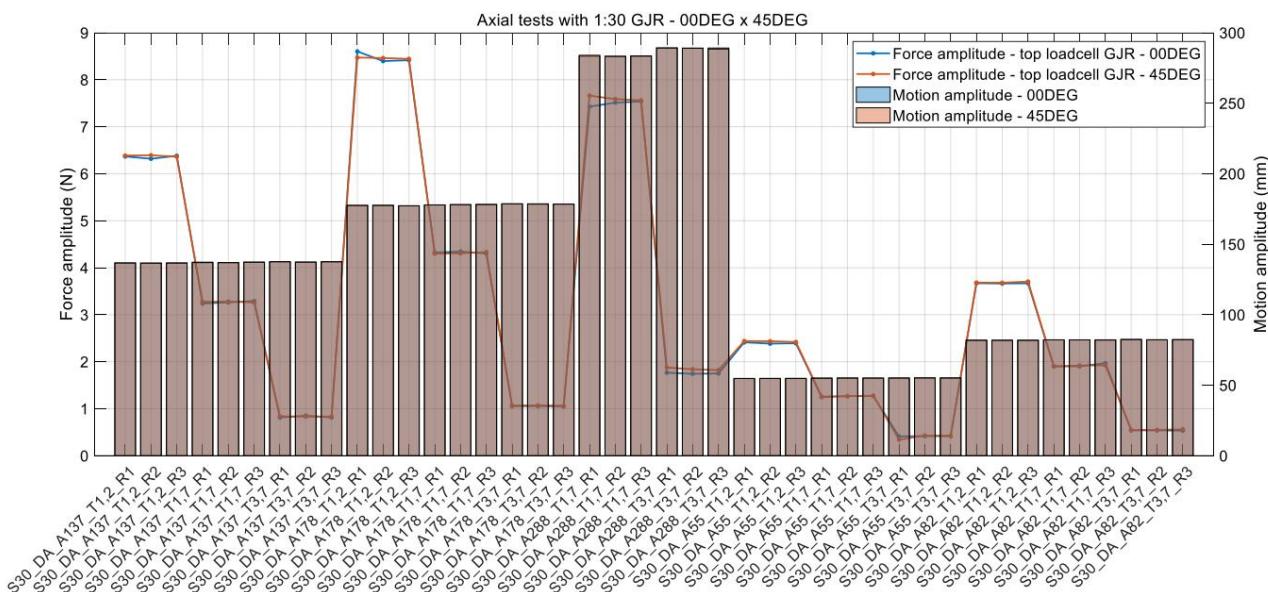
3.3. Efeito da rotação axial do modelo

De modo geral, ao comparar os valores médios das amplitudes de movimento e carga para o modelo em diferentes ângulos nota-se pequenas variações para ambos, indicando que a orientação em que o modelo é excitado não afeta as cargas hidrodinâmicas. A Figura 2-6 mostra a diferença entre as duas condições.

A Figura 3-7 compara as amplitudes de movimento e carga através do mesmo tipo de gráfico apresentado acima, mas sobrepondo os casos a 0 graus após girado em 45 graus para a oscilação normal, mostrando claramente a semelhança em ambas as curvas, e indicando que o ângulo em que o gimbal é oscilado não afeta a carga hidrodinâmica que atua sobre ele. Figura 3-8

mostra que a rotação do modelo também não afeta a magnitude da carga no modelo.

Finalmente, um caso adicional do modelo girado em 90 graus foi testado, como na Figura 3-9, levando à mesma conclusão de que a rotação do modelo não parece afetar a carga hidrodinâmica no modelo GJR. Comportamento semelhante foi observado nos casos 1:9, conforme ilustrado pela Figura 3-10.



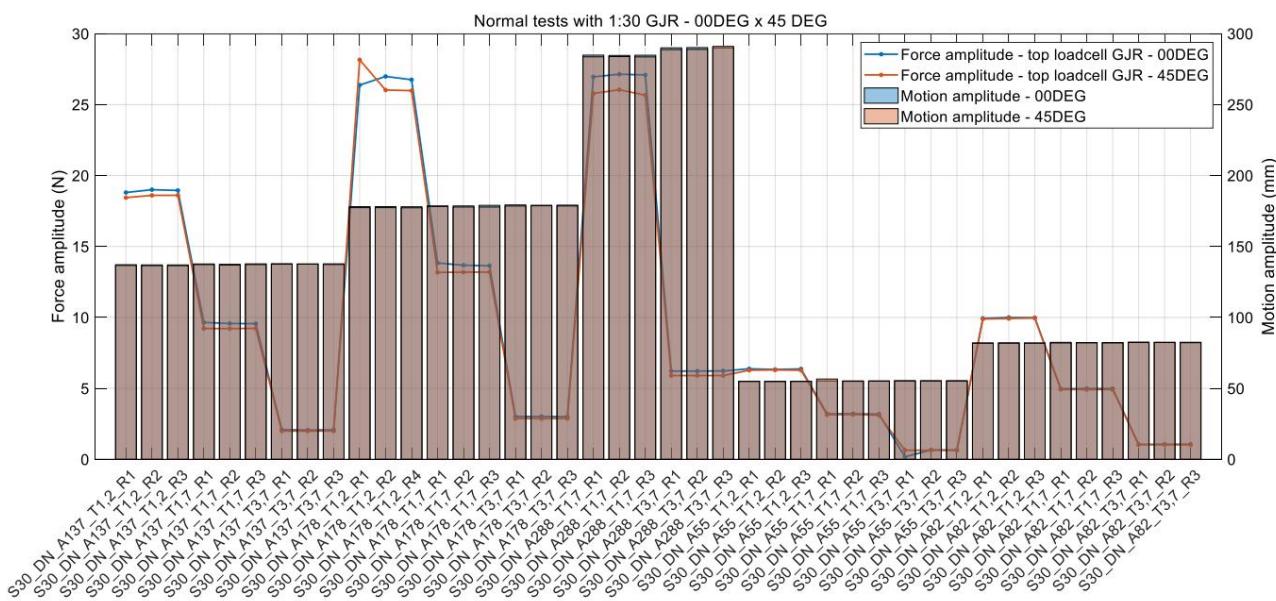


Figura 3-8: Verificação de repetibilidade para oscilações normais em 00DEG x 45DEG na escala 1:30

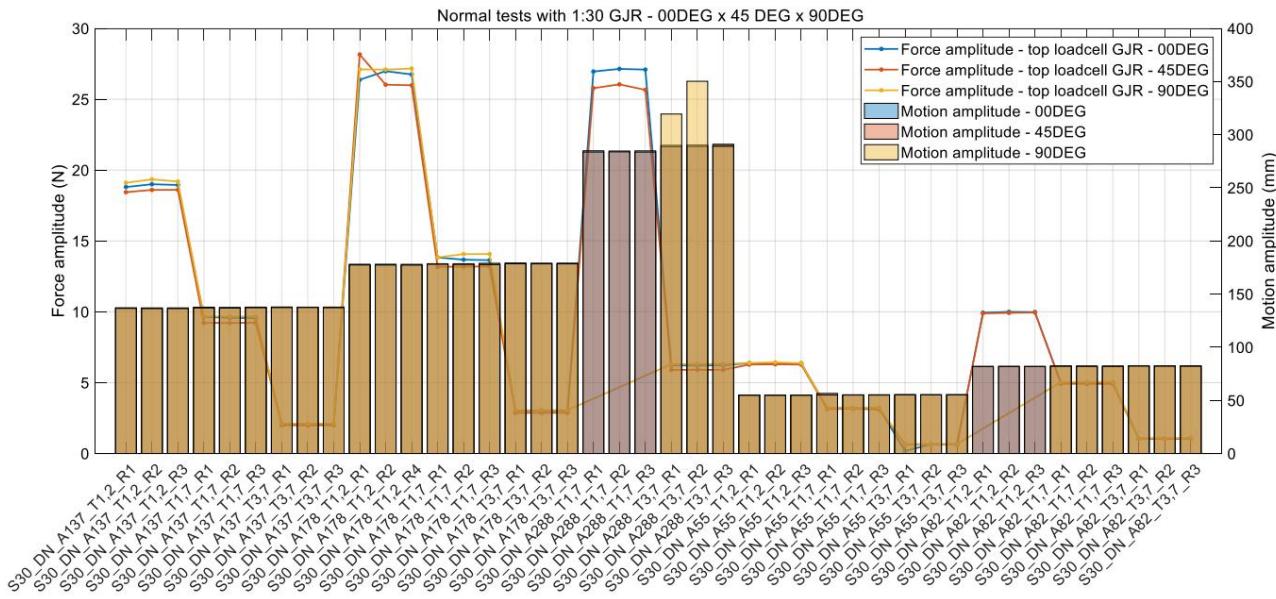


Figura 3-9: Verificação de repetibilidade para oscilações normais em $00^\circ \times 45^\circ \times 90^\circ$ na escala 1:30

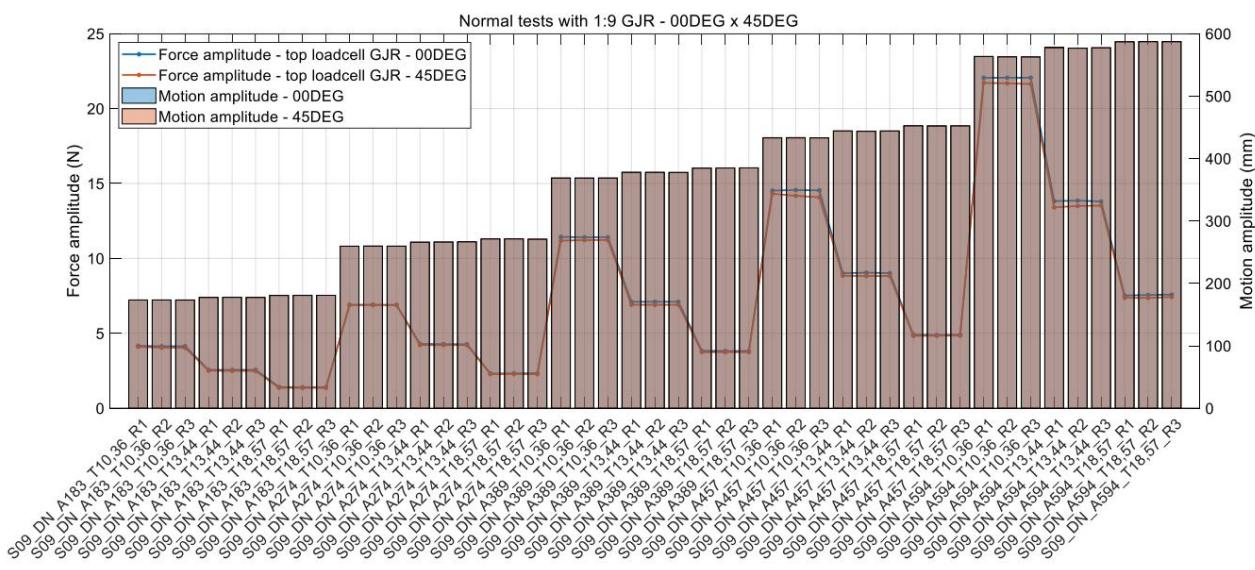


Figura 3-10: Verificação de repetibilidade para oscilações normais em 00DEG x 45DEG em escala 1:9

4. Procedimento para análise de dados

Este capítulo aborda os procedimentos para o pós-processamento dos dados experimentais para calcular os coeficientes hidrodinâmicos para o GJR. Os procedimentos aqui discutidos foram adotados para ambas as escalas. As sessões abaixo descrevem cada sessão individualmente, após apresentar uma visão geral de todo o procedimento.

4.1. Visão geral

O objetivo dos testes é estimar os coeficientes hidrodinâmicos do GJR com base em oscilações forçadas de modelos escalonados rígidos. Conforme ilustrado no capítulo 2, o conjunto experimental projetado para este teste consiste em um suporte que sustenta o modelo, que por sua vez é fixado ao oscilador. Consequentemente, conforme ilustrado na Figura 4-1, durante a oscilação forçada, diferentes componentes de carga atuam no conjunto modelo-suporte. No GJR, as cargas podem ser divididas em hidrodinâmicas () e iniciais (). Analogamente, as cargas que atuam na estrutura também são divididas entre hidrodinâmicas e iniciais. Portanto, a soma das cargas hidrodinâmicas e iniciais da estrutura () também deve ser considerada.

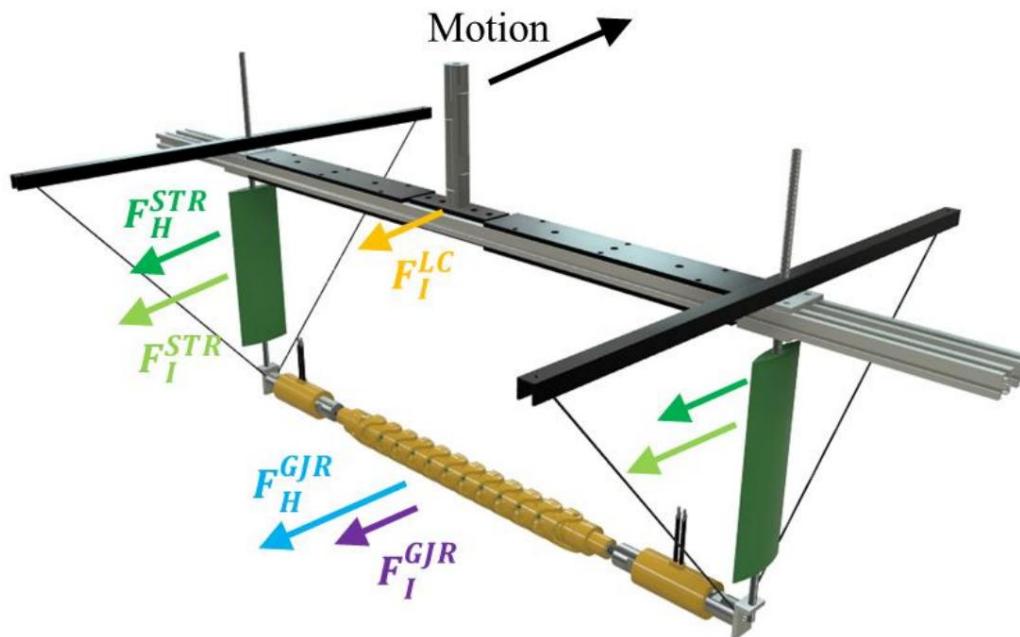


Figura 4-1: Diagrama de corpo livre do modelo durante a oscilação forçada

Consequentemente, a carga total adquirida durante o teste pela célula de carga superior pode ser considerada a soma de todos os componentes acima mencionados, como em (4.1).

$$= + + + \quad (4.1)$$

Conforme mencionado no capítulo 2, para cada condição diferente os testes foram realizados com e sem o modelo GJR. Assim, como nos diagramas de corpo livre da Figura 4-2, é possível subtrair as cargas iniciais e hidrodinâmicas sobre a estrutura, bem como os efeitos iniciais sobre a estrutura.

a célula de carga, relacionando as séries temporais de ambas as medições. É então possível calcular as cargas hidrodinâmicas que atuam no GJR como em (4.2).

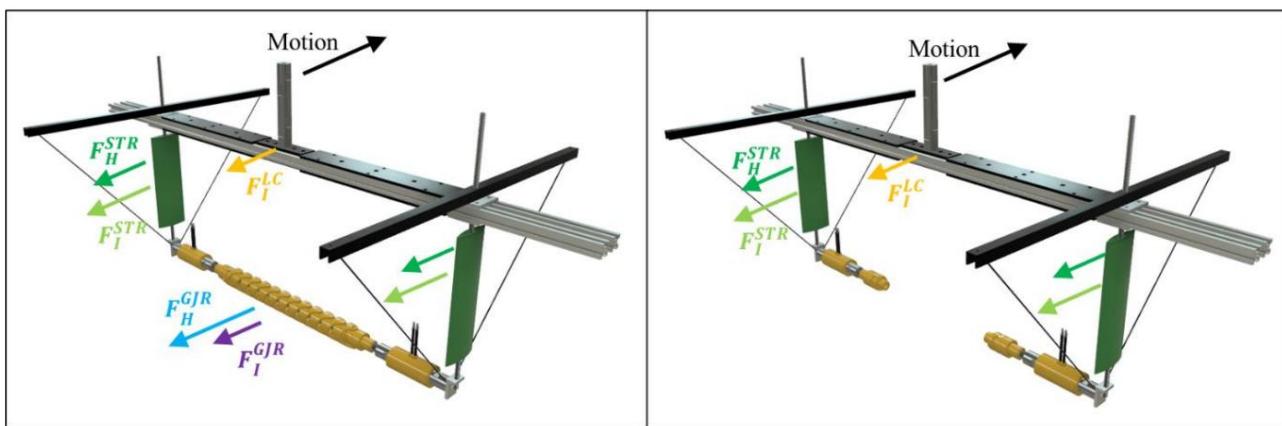


Figura 4-2: Diagrama de corpo livre de testes com (esquerda) e sem (direita) GJR

$$= \quad \text{99} \quad = \quad \text{99} \quad (4.2)$$

Onde:

Carga hidrodinâmica atuando no modelo GJR conforme medido, a ser decomposto em componentes de arrasto e inércia (ver (4.3))

Série temporal de carga adquirida durante os testes com o modelo GJR

Série temporal de carga adquirida durante os testes sem modelo GJR

Cargas iniciais atuando no modelo GJR

massa GJR

Aceleração GJR

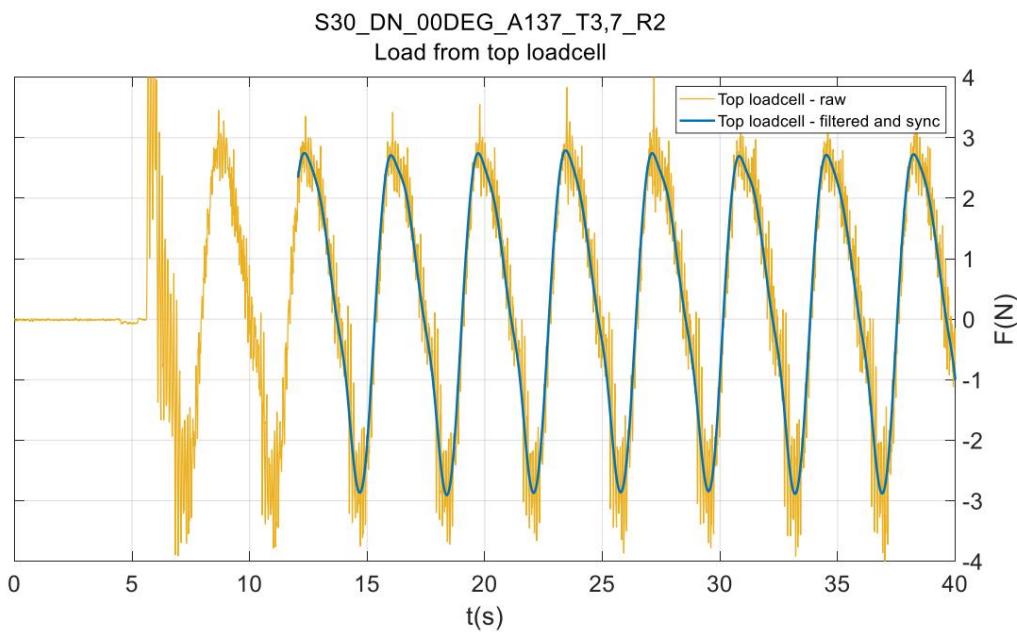
4.2. Filtragem

Conforme discutido no capítulo 3, os testes foram realizados a uma taxa de amostragem de 100 Hz. O ruído pode então ser notado na série temporal, por exemplo na Figura 3-1. No pós-processamento dos dados foi implementado um filtro digital passa-baixa para remover tais efeitos, mais especificamente, um filtro Butterworth de 4ª ordem, que normalmente é selecionado devido aos efeitos atenuantes de forma eficiente na banda de parada.

sem ondulações na banda de passagem ou na banda de parada. No entanto, quando comparado a outros tipos de filtros como o elíptico, este tipo de filtro apresenta uma banda de transição um pouco ampla, ou seja, a largura de banda das frequências após a frequência de corte que não são totalmente atenuadas. Isso significa que a frequência de corte deve ser selecionada adequadamente para filtrar totalmente os recursos de alta frequência na série temporal sem que nenhum efeito reminiscente passe por ela.

Foi selecionada uma frequência de corte 5 vezes maior que a frequência de excitação. A Figura 3-2 e a Figura 3-3 ilustram a validade da frequência de corte selecionada, já na faixa de resposta estrutural do conjunto modelo-suporte e significativamente acima da frequência de excitação.

A Figura 4-3 mostra a comparação entre dados brutos e de filtro para a carga adquirida pela célula de carga superior para um caso de 1:30 como exemplo da eficácia do tipo de filtro adotado.

Figura 4-3: Eficácia do filtro Butterworth passa-baixa de 4^a ordem

4.3. Sincronizando

Dada a equação (4.2), fica clara a importância de sincronizar séries temporais de medidas diferentes e independentes. Isso pode ser feito na fase de pós-processamento, selecionando eventos facilmente identificáveis como gatilhos de sincronização. O movimento imposto, dado seu claro comportamento harmônico, é o melhor candidato para tal, por utilizar o primeiro pico do sinal após atingir o estado estacionário como evento de disparo. Para fins de visualização, todas as 3 corridas foram definidas para a mesma base de tempo usando a mesma técnica. A Figura 4-4 mostra o processo de sincronização para todas as execuções do mesmo caso, mostrando o movimento imposto para o teste com o modelo GJR no gráfico superior e o movimento da estrutura sozinha, sem o modelo, no gráfico inferior. As linhas tracejadas representam os sinais não sincronizados originais e os gráficos completos representam as séries temporais sincronizadas, que são todas sobrepostas.

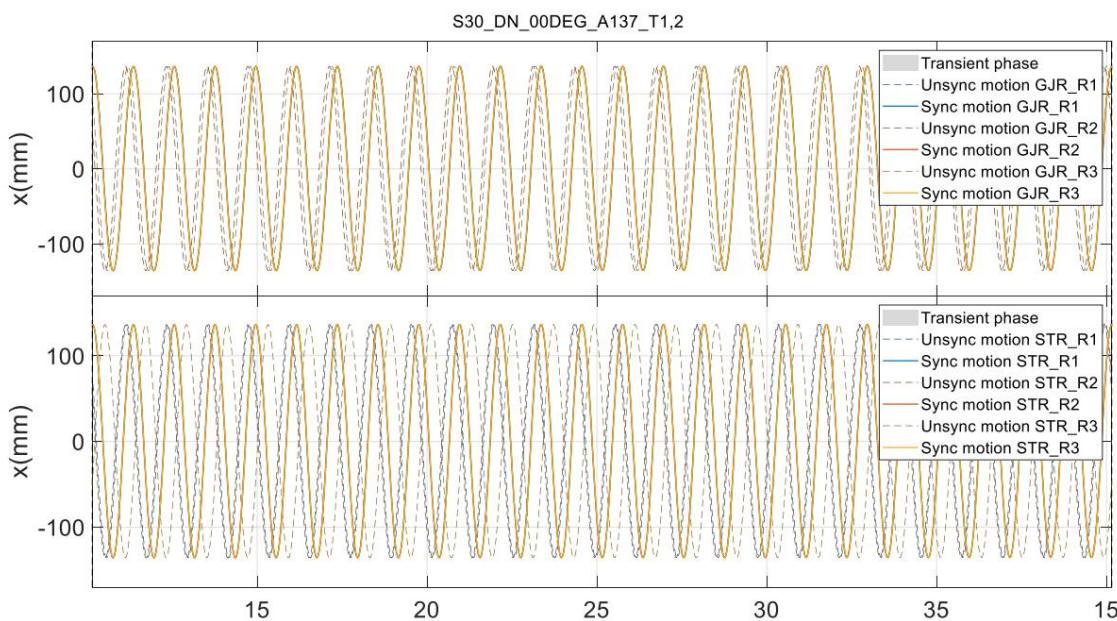


Figura 4-4: Exemplo de sincronização de diferentes séries temporais

4.4. Ajuste de dados para calcular coeficientes hidrodinâmicos

Uma vez que a carga hidrodinâmica é definida como na equação (4.2), devidamente sincronizada e filtrada, os coeficientes hidrodinâmicos podem ser estimados através de um simples ajuste a uma expressão genérica seguindo a equação de Morison, como em (4.3) para um corpo oscilante em água parada.

$$() = \dot{y} (,) - \dot{y}(t) \dot{y} CD(,) - \dot{y} S \dot{y}() | \dot{y}() |^2 \quad (4.3)$$

Onde:

Carga hidrodinâmica atuando no modelo GJR medido, a ser decomposto em componentes de arrasto e inércia (ver (4.2))

Coeficiente de massa adicional, $= \dot{y}$ 1. Depende dos números KC e Re.

Coeficiente de arrasto adimensional. Depende dos números KC e Re

Densidade da água

\dot{y} Volume submerso do modelo GJR

Área de referência. Área projetada para oscilações normais e área de superfície para oscilações axiais

Aceleração imposta

Velocidade imposta

Número Keulegan-Carpenter, $= 2 /$

número de Reynolds, $= /$

Amplitude de movimento

Diâmetro do modelo GJR

Frequência de oscilação, $= 2 /$

A velocidade ($\dot{y}()$) e a aceleração ($\ddot{y}()$) podem ser diferenciadas do movimento imposta ($()$). De acordo com as recomendações do ITTC [7], a densidade da água é de 998,20 kg/m³, que é aproximadamente o mesmo valor normalmente medido em laboratório.

A primeira componente de carga em (4.3) representa as reações hidrodinâmicas à aceleração imposta, daí o nome de carga inercial. O coeficiente é a massa adicional (\dot{y} 1). Relacionada ao coeficiente de arrasto (\dot{y} CD) é a força de arrasto proporcional a uma área característica (\dot{y} S). Para as oscilações normais, esta área é a mesma como a área da superfície do cilindro circundante ($=$

$).$

Um simples ajuste de mínimos quadrados pode ser usado para estimar os coeficientes hidrodinâmicos da série temporal de carga, velocidade e aceleração, como em [8].

5. Coeficientes hidrodinâmicos GJR

Este capítulo aborda os resultados dos experimentos do GJR em ambas as escalas em termos dos coeficientes hidrodinâmicos. Para casos com oscilação normal os valores são comparados com dados clássicos da literatura [8].

escala 5.1.1:9

5.1.1. Oscilações normais na escala 1:9

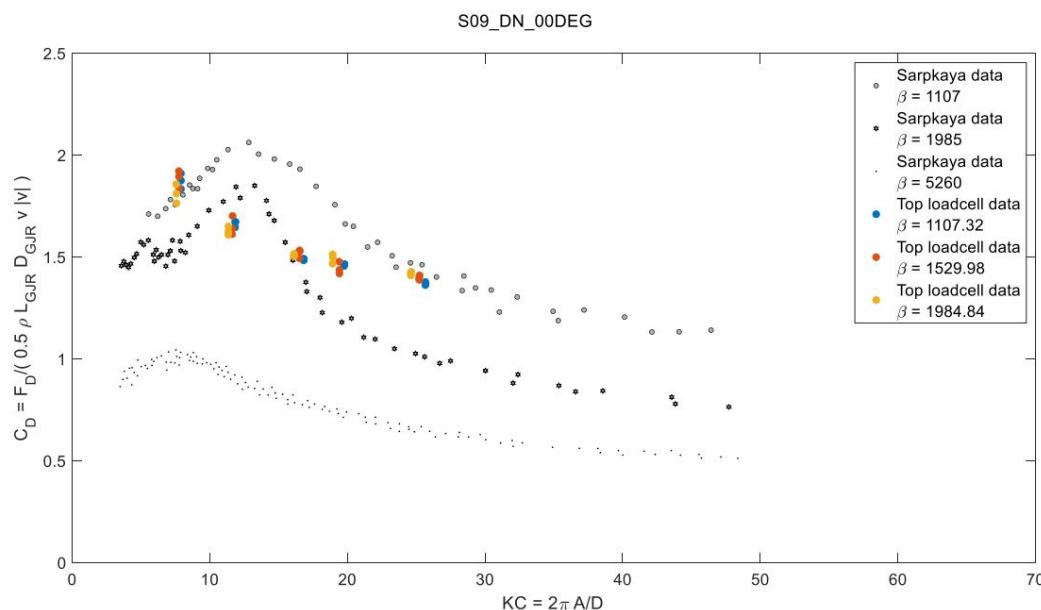


Figura 5-1: Coeficiente de arrasto x número KC para a oscilação normal na escala 1:9 a 00DEG

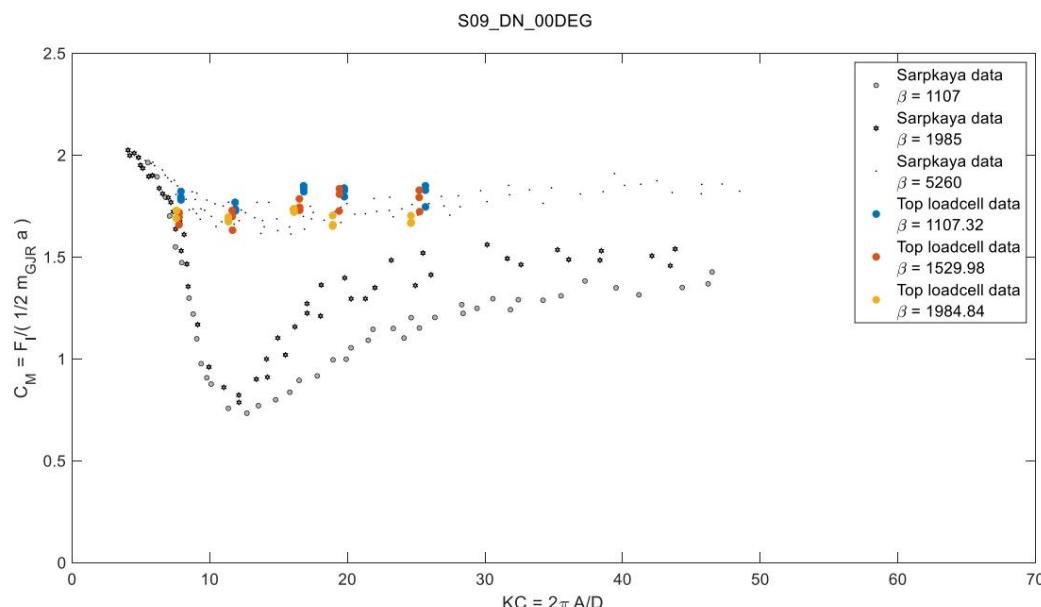


Figura 5-2: Coeficiente de inércia x número KC para a oscilação normal na escala 1:9 a 00DEG

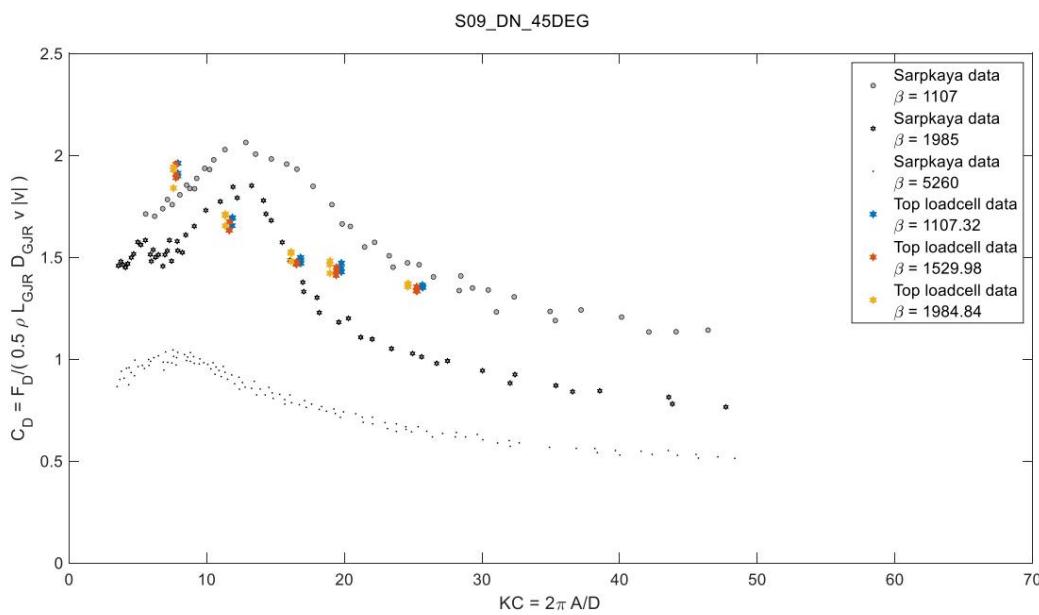


Figura 5-3: Coeficiente de arrasto x número KC para a oscilação normal na escala 1:9 a 45°

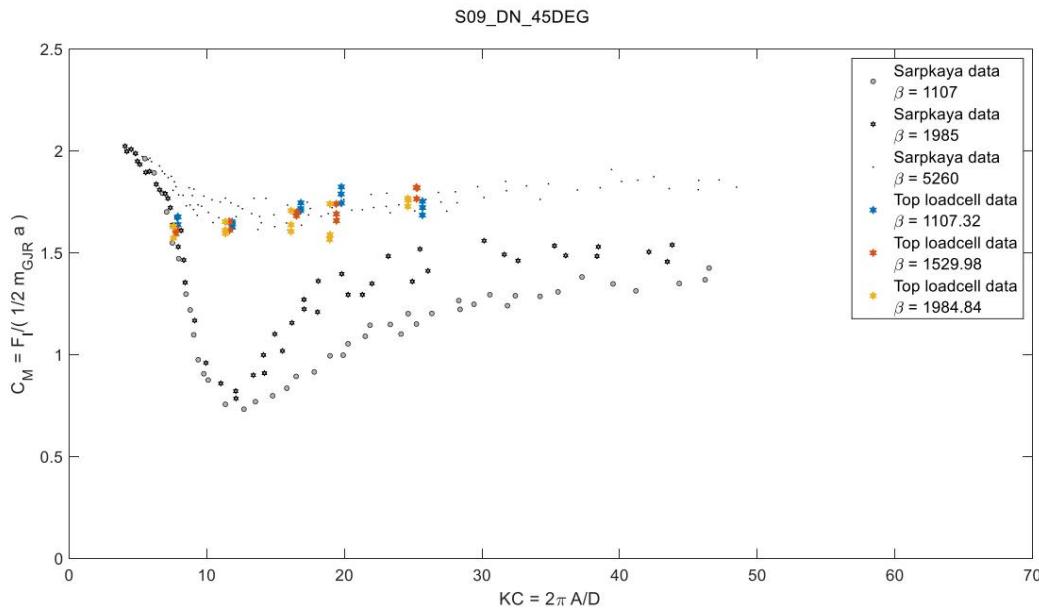


Figura 5-4: Coeficiente de inércia x número KC para a oscilação normal na escala 1:9 a 45°

Esses gráficos mostram a independência de ambos os coeficientes de arrasto e inércia para o número de Reynolds oscilatório, representados pelo KC .

e C para o número de Reynolds oscilatório,

Tabela 5-1: Coeficiente de arrasto x número KC para a oscilação normal na escala 1:9 a 00DEG e 45°

CASO	CD a 00 DEG					CD a 45°				
	R1 (-)	R2 (-)	R3 (-)	SIGNIFICA (-)	ERRO % RMS	R1 (-)	R2 (-)	R3 (-)	SIGNIFICA (-)	ERRO % RMS
1984,84 7,58	1,81	1,76	1,86	1,81 2,09%	1,93		1,84	1,94	1,90 2,41%	
1529,98 7,76	1,92	1,84	1,90	1,88	1,91%	1,96	1,91	1,89	1,92 1,47%	
1107,32 7,90	1,91	1,88	1,83	1,87	1,67%	1,91	1,90	1,96	1,92 1,40%	
1984,84 11,35 1,61		1,65	1,63	1,63	1,02%	1,65	1,70	1,71	1,69 1,51%	
1529,98 11,63	1,61	1,64	1,70	1,65 2,26%	1,63		1,63	1,67	1,65 1,18%	
1107,32 11,86 1,67		1,67	1,65	1,66	0,76%	1,69	1,69	1,65	1,68 1,07%	
1984,84 16,12 1,52		1,50	1,51	1,51	0,36%	1,53	1,52	1,48	1,51 1,34%	
1529,98 16,53 1,53		1,53	1,49	1,52	1,12%	1,47	1,48	1,46	1,47 0,34%	
1107,32 16,82 1,49		1,48	1,49	1,49	0,23%	1,50	1,49	1,47	1,49 0,77%	
1984,84 18,93 1,47		1,51	1,50	1,49	1,27%	1,42	1,48	1,46	1,46 1,72%	
1529,98 19,42 1,42		1,48	1,44	1,45	1,68%	1,45	1,41	1,43	1,43 1,12%	
1107,32 19,78 1,47		1,47	1,46	1,46	0,27%	1,43	1,45	1,47	1,45 1,23%	
1984,84 24,64 1,43		1,41	1,42	1,42	0,53%	1,37	1,35	1,37	1,36 0,48%	
1529,98 25,23 1,39		1,40	1,41	1,40	0,65%	1,33	1,33	1,36	1,34 0,73%	
1107,32 25,67 1,36		1,38	1,37	1,37	0,45%	1,36	1,35	1,35	1,36 0,37%	

Tabela 5-2: Coeficiente de inércia x número KC para a oscilação normal na escala 1:9 a 00DEG e 45DEG

CASO	CM a 00°					CM a 45°				
	R1 (-)	R2 (-)	R3 (-)	SIGNIFICA (-)	ERRO % RMS	R1 (-)	R2 (-)	R3 (-)	SIGNIFICA (-)	ERRO % RMS
1984,84 7,58	1,73	1,73	1,69	1,71	1,03%	1,63	1,63	1,57	1,61 1,65%	
1529,98 7,76	1,66	1,72	1,70	1,69	1,46%	1,59	1,61	1,62	1,61 0,64%	
1107,32 7,90	1,79	1,78	1,82	1,80	0,96%	1,68	1,68	1,64	1,66 1,10%	
1984,84 11,35 1,70		1,67	1,68	1,68	0,55%	1,65	1,61	1,60	1,62 1,50%	
1529,98 11,63	1,73	1,70	1,63	1,69 2,39%	1,65		1,66	1,61	1,64 1,19%	
1107,32 11,86 1,73		1,73	1,77	1,74	1,03%	1,64	1,63	1,65	1,64 0,66%	
1984,84 16,12 1,72		1,74	1,73	1,73	0,41%	1,61	1,64	1,71	1,65 2,58%	
1529,98 16,53 1,73		1,74	1,79	1,75	1,36%	1,70	1,68	1,70	1,69 0,43%	
1107,32 16,82 1,85		1,84	1,82	1,84	0,66%	1,71	1,72	1,75	1,72 0,94%	
1984,84 18,93 1,70		1,65	1,66	1,67	1,37%	1,74	1,59	1,57	1,63 4,74%	
1529,98 19,42 1,84		1,73	1,81	1,79 2,61%	1,66		1,74	1,69	1,70 1,99%	
1107,32 19,78 1,83		1,80	1,84	1,82	0,97%	1,82	1,79	1,74	1,79 1,82%	
1984,84 24,64 1,67		1,70	1,67	1,68	0,98%	1,76	1,77	1,73	1,75 0,95%	
1529,98 25,23 1,83		1,79	1,72	1,78 2,46%	1,82		1,82	1,77	1,80 1,43%	
1107,32 25,67 1,85		1,83	1,75	1,81 2,48%	1,69		1,72	1,75	1,72 1,62%	

5.1.2. Oscilações axiais na escala 1:9

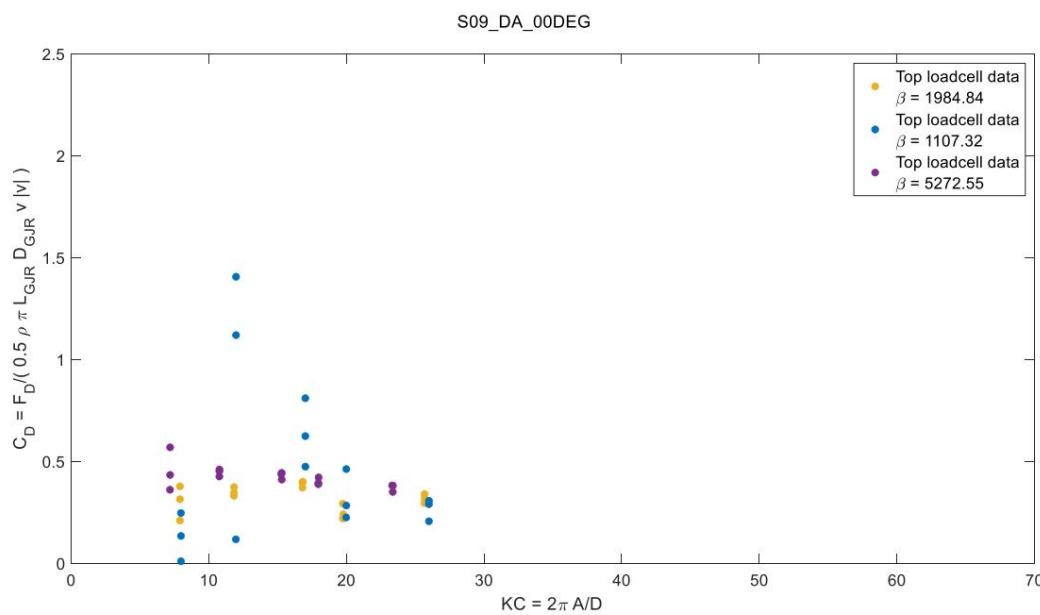


Figura 5-5: Coeficiente de arrasto x número KC para a oscilação axial na escala 1:9 a 00DEG

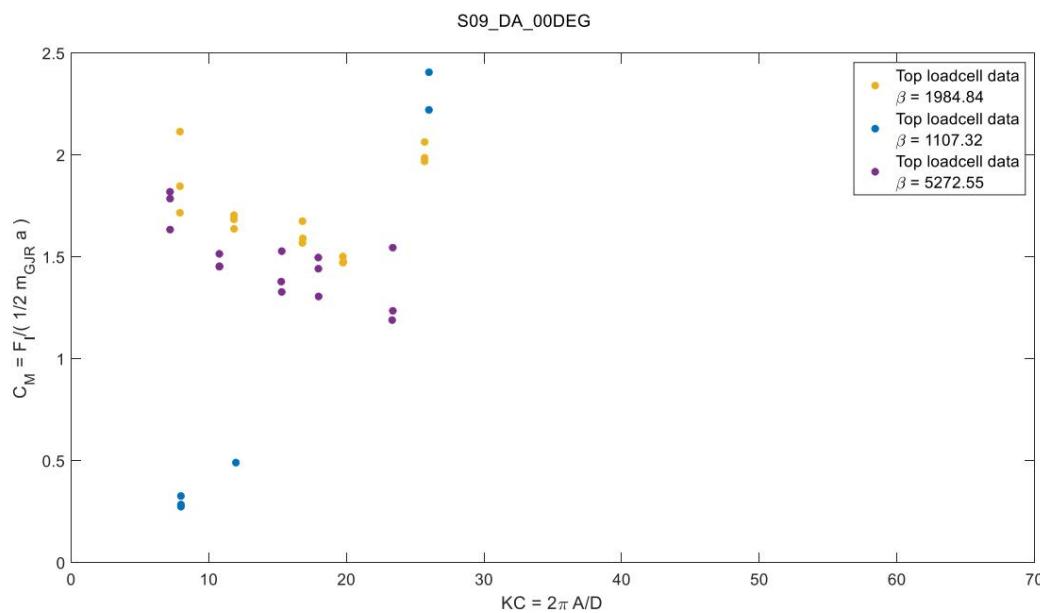


Figura 5-6: Coeficiente de inércia x número KC para a oscilação axial na escala 1:9 a 00DEG

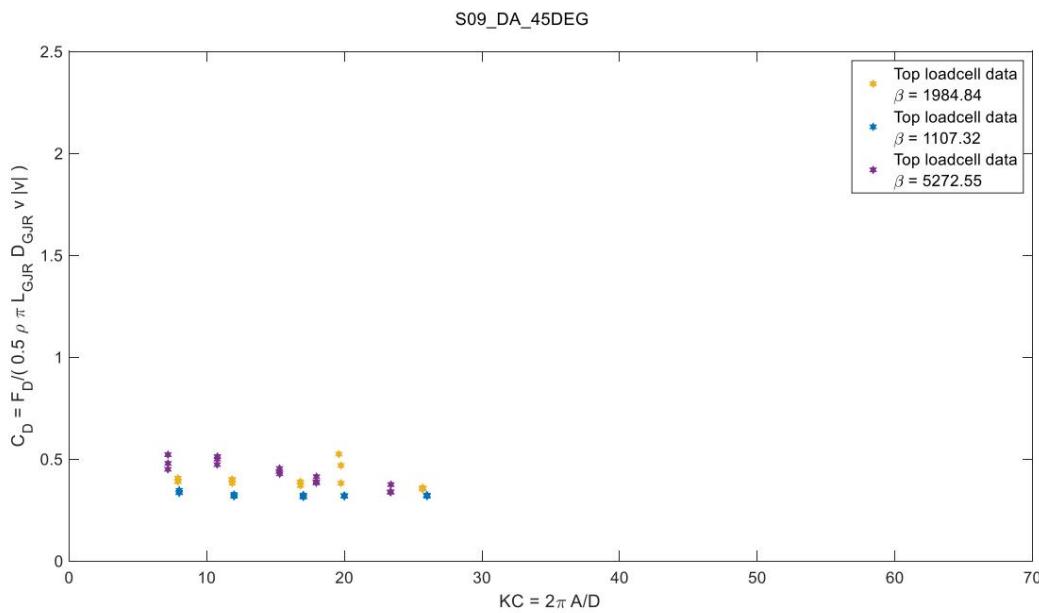


Figura 5-7: Coeficiente de arrasto x número KC para a oscilação axial na escala 1:9 a 45°

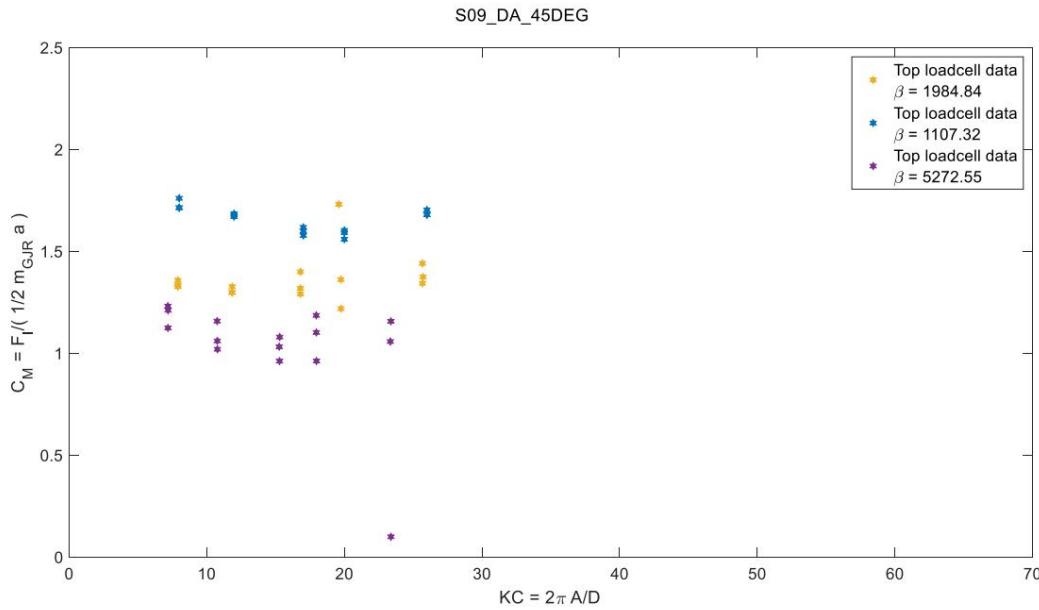


Figura 5-8: Coeficiente de inércia x número KC para a oscilação axial na escala 1:9 a 45°

Os coeficientes hidrodinâmicos na oscilação axial apresentam grande dispersão em relação ao observado para a oscilação normal. É difícil encontrar uma razão para explicar por que a dispersão nesta configuração é maior do que a da oscilação normal dada a repetibilidade observada (ver Apêndice A.1). Pode estar relacionado a efeitos hidrodinâmicos devido às bordas de ataque e de fuga do modelo não deformadas, o que torna o teste muito sensível às condições iniciais do fluido.

Tabela 5-3: Coeficiente de arrasto x número KC para a oscilação axial na escala 1:9 a 00DEG e 45°

CASO	CD a 00 DEG					CD a 45°				
	R1 (-)	R2 (-)	R3 (-)	SIGNIFICA (-)	ERRO % RMS	R1 (-)	R2 (-)	R3 (-)	SIGNIFICA (-)	ERRO % RMS
1984,84 7,91	0,41	0,39	0,39	0,40	1,83%	0,21	0,32	0,38	0,30 22,86%	
1107,32 8,00	0,34	0,33	0,35	0,34	1,57%	0,25	0,14	0,01	0,13 73,40%	
5272,55 7,18	0,45	0,52	0,48	0,48	6,12%	0,36	0,44	0,57	0,46 18,91%	
1984,84 11,85 0,40		0,38	0,40	0,39	1,95%	0,38	0,35	0,33	0,35 5,03%	
1107,32 11,99 0,32		0,33	0,32	0,32	1,23%	0,12	1.12	1,41	0,88 62,57%	
5272,55 10,76 0,47		0,51	0,50	0,50	3,35%	0,45	0,46	0,43	0,45 3,30%	
1984,84 16,81 0,39		0,39	0,37	0,38 2,07%		0,40	0,40	0,37	0,39 3,38%	
1107,32 17,02 0,31		0,32	0,32	0,32	1,27%	0,48	0,81	0,63	0,64 21,54%	
5272,55 15,29 0,45		0,44	0,43	0,44 2,44%		0,41	0,44	0,45	0,43 3,33%	
1984,84 19,60 0,52		0,38	0,47	0,46 12,83%	0,24		0,22	0,29	0,25 12,09%	
1107,32 20,00 0,32		0,32	0,32	0,32	0,46%	0,46	0,23	0,28	0,33 31,03%	
5272,55 17,96 0,39		0,41	0,38	0,40	3,32%	0,39	0,42	0,39	0,40 3,64%	
1984,84 25,68 0,36		0,36	0,35	0,36	0,81%	0,30	0,34	0,32	0,32 5,71%	
1107,32 26,00 0,32		0,32	0,32	0,32	0,67%	0,21	0,31	0,29	0,27 16,32%	
5272,55 23,38 0,34		0,34	0,37	0,35 4,93%		0,38	0,35	0,38	0,37 3,95%	

Tabela 5-4: Coeficiente de inércia x número KC para a oscilação axial na escala 1:9 a 00DEG e 45°

CASO	CM a 00°					CM a 45°				
	R1 (-)	R2 (-)	R3 (-)	SIGNIFICA (-)	ERRO % RMS	R1 (-)	R2 (-)	R3 (-)	SIGNIFICA (-)	ERRO % RMS
1984,84 7,91	1,33	1,34	1,36	1,34	0,99%	2,12	1,85	1,72	1,89 8,75%	
1107,32 8,00	1,76	1,71	1,72	1,73	1,26%	0,33	0,28	0,29	0,30 7,61%	
5272,55 7,18	1,23	1,12	1,21	1,19	3,90%	1,82	1,79	1,63	1,75 4,62%	
1984,84 11,85 1,30		1,33	1,30	1,31	1,02%	1,64	1,71	1,69	1,68 1,67%	
1107,32 11,99 1,69		1,67	1,68	1,68	0,35%	0,49	5,00	5,00	3,50 60,77%	
5272,55 10,76 1,16		1,02	1,06	1,08	5,37%	1,45	1,46	1,52	1,47 1,97%	
1984,84 16,81 1,32		1,29	1,40	1,34	3,43%	1,59	1,57	1,68	1,61 2,86%	
1107,32 17,02 1,62		1,60	1,58	1,60	1,02%	4,83	5,00	5,00	4,94 1,59%	
5272,55 15,29 0,96		1,03	1,08	1,02 4,73%		1,53	1,38	1,33	1,41 6,01%	
1984,84 19,60 1,73		1,36	1,22	1,44 15,02%	1,48		1,47	1,50	1,48 0,89%	
1107,32 20,00 1,56		1,60	1,59	1,59	1,17%	3,73	4,01	4h30	4,01 5,76%	
5272,55 17,96 1,10		0,96	1,19	1,08	8,53%	1,44	1,31	1,50	1,42 5,66%	
1984,84 25,68 1,34		1,37	1,44	1,39 2,94%		1,99	2,06	1,97	2,01 2,06%	
1107,32 26,00 1,70		1,68	1,68	1,69	0,66%	3,02	2,41	2,22	2,55 13,42%	
5272,55 23,38 1,16		1,06	0,10	0,77 61,78%	1,24		1,55	1,19	1,32 11,92%	

5.1.3. Efeito da rotação do modelo

Esta seção compara o coeficiente hidrodinâmico em cada condição para 00DEG e 45DEG simplesmente sobrepondo os gráficos.

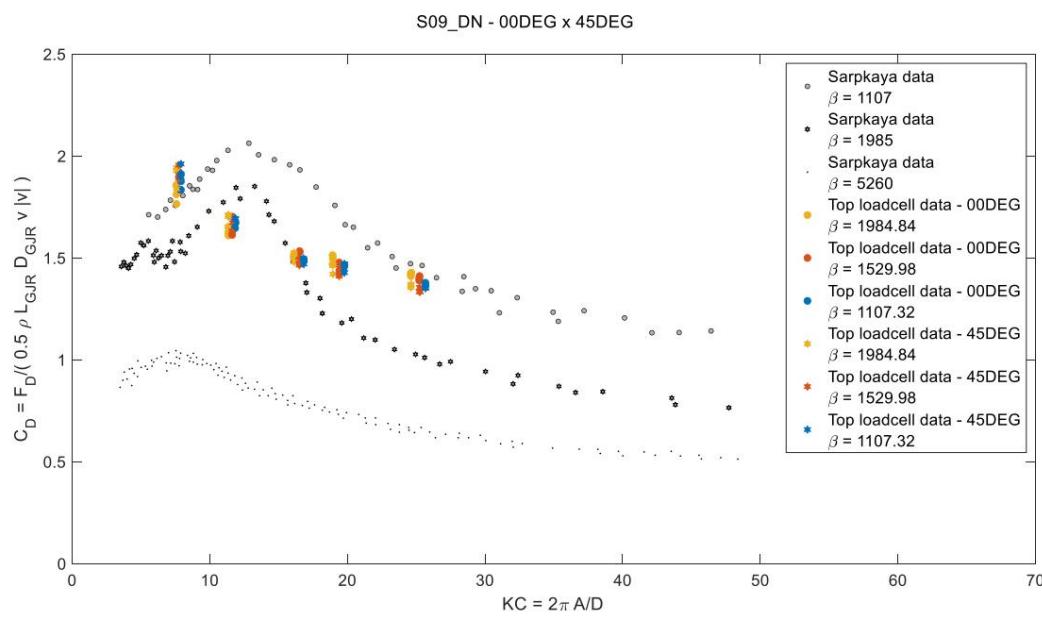


Figura 5-9: Coeficiente de arrasto x número KC para a oscilação normal na escala 1:9 – 00DEG x 45°

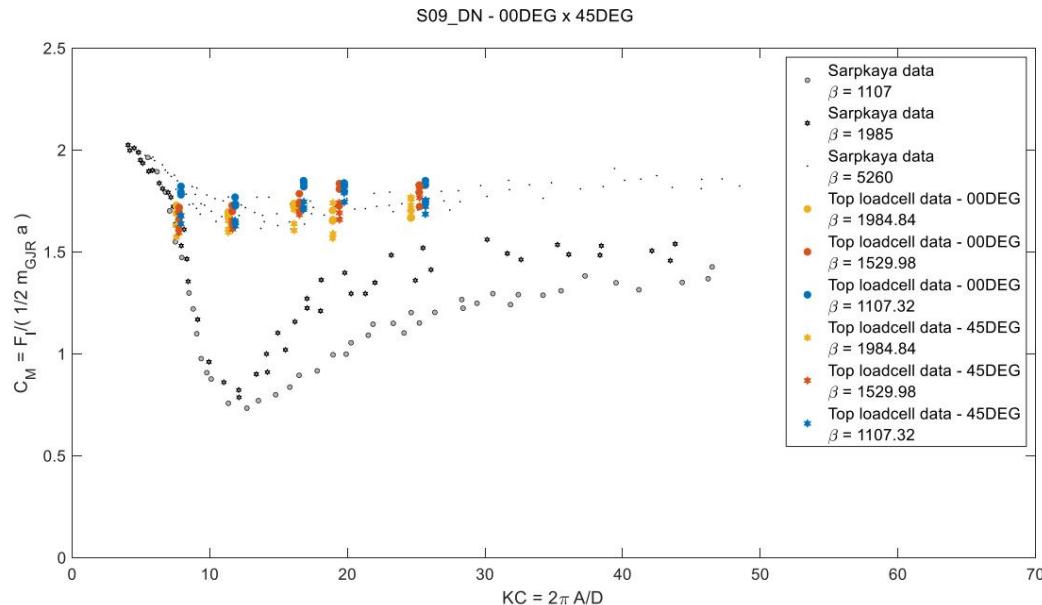


Figura 5-10: Coeficiente de inércia x número KC para a oscilação normal na escala 1:9 – 00DEG x 45°

5.1.4. Efeito da porosidade do modelo

O seguinte discutido é após o pedido do cliente [9]. Em equipamentos submarinos é comum avaliar os coeficientes hidrodinâmicos para estruturas ventiladas. Em tais situações, é comum referir-se à relação entre o vazio e o volume do material dentro da estrutura como *porosidade*, apesar de não ser semanticamente adequada, e a amplitude de oscilação é geralmente referida como um 'número KC poroso', como em (5.1), onde A é a amplitude do movimento, é ~~desperdício de energia~~ é a eficiência de descarga adimensional [10].

$$= \frac{(-)}{(-)} \quad (5.1)$$

As diretrizes em [10] tratam de slamming, portanto, a porosidade na referência é definida em termos da razão da área de superfície sobre a área projetada da estrutura submarina. No entanto, na presente análise, a porosidade é definida como a razão de volume entre o corpo sobre o cilindro correspondente com as mesmas dimensões. Com base na geometria, a porosidade para o modelo 1:9 é = 0,341. O coeficiente de descarga é tomado como 0,9 [9].

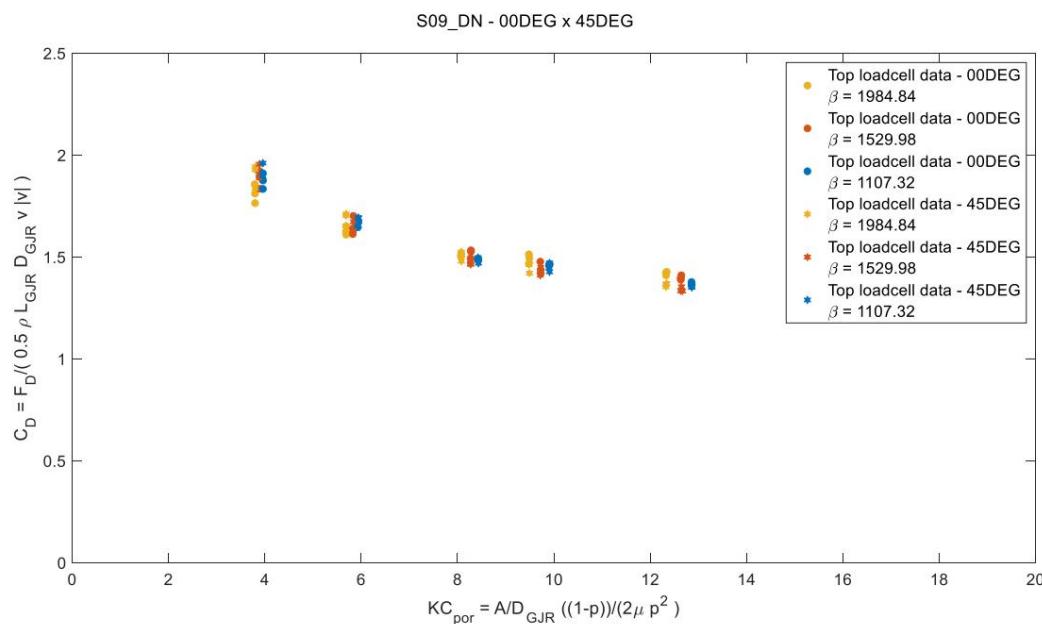


Figura 5-11: Coeficiente de arrasto x número para a oscilação axial na escala 1:9 – 00DEG x 45°

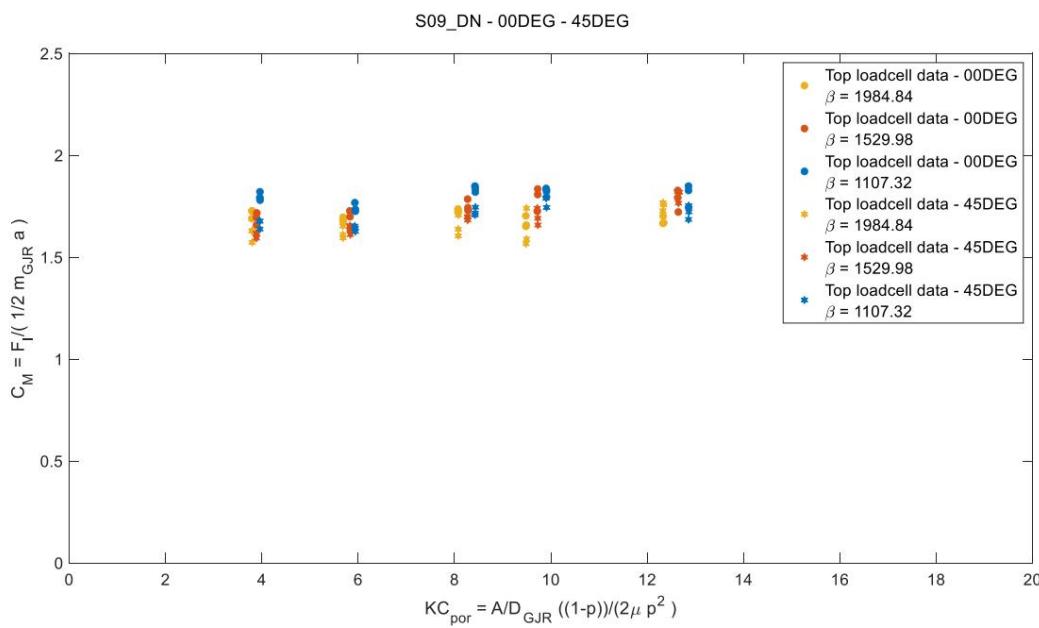


Figura 5-12: Coeficiente de inércia x número para a oscilação axial na escala 1:9 – 00DEG x 45°

5.2.1:30 escala

5.2.1. Oscilação normal na escala 1:30

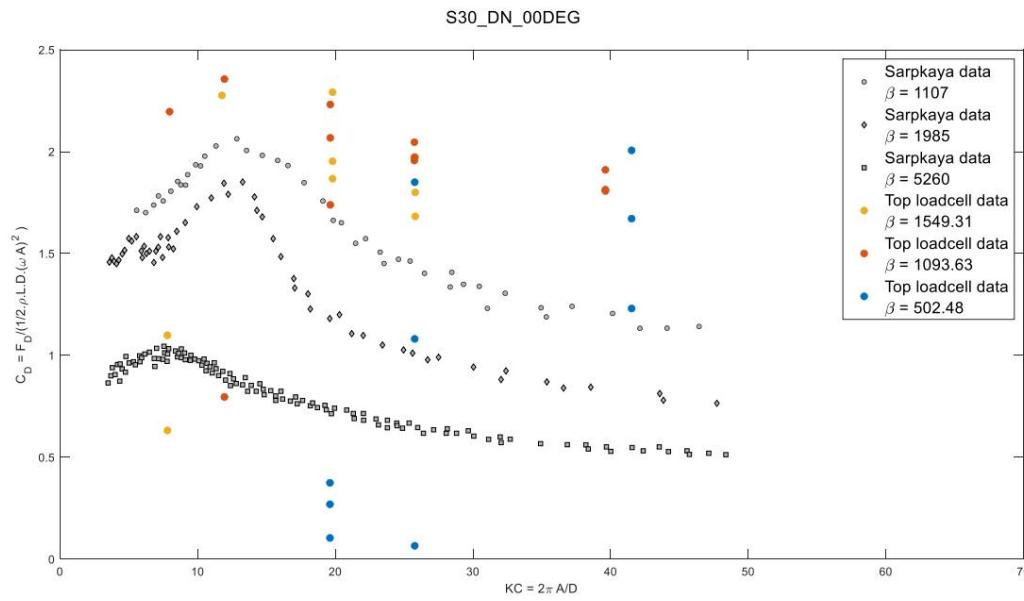


Figura 5-13: Coeficiente de arrasto x número KC para a oscilação normal na escala 1:30 a 00DEG na segunda execução

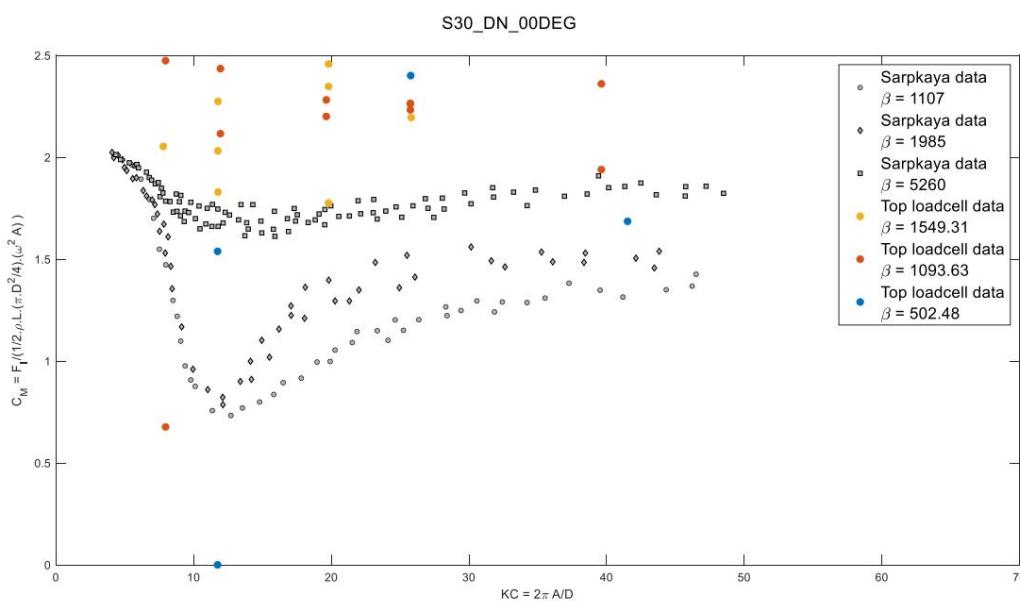


Figura 5-14: Coeficiente de inércia x número KC para a oscilação normal na escala 1:30 a 00DEG na segunda execução

Ao contrário do que foi observado para a escala 1:9, os gráficos acima mostram uma grande dispersão dos dados e nenhuma tendência clara e identificável. A razão para isso ainda não está clara, uma vez que a série temporal mostrou uma boa repetibilidade, conforme mostrado no Apêndice A.

Tabela 5-5: Coeficiente de arrasto x número KC para a oscilação normal na escala 1:30 a 00DEG e 45°

CASO	CD a 00 DEG					CD a 45°				
	R1 (-)	R2 (-)	R3 (-)	SIGNIFICA (-)	ERRO % RMS	R1 (-)	R2 (-)	R3 (-)	SIGNIFICA (-)	ERRO % RMS
1549,31 19,80 1,95	1,87	2,29	2,04 8,99%			1,33	1,97	1,81	1,70 16,00%	
1093,63 19,63 2,23	2,07	1,74	2,01 10,18%	2,00			1,55	1,83	1,79 10,37%	
502,48 19,61 0,27	0,37	0,10	0,25 44,64%	1,12			2,12	2,05	1,76 25,93%	
1549,31 25,80 1,68	1,97	1,80	1,82 6,58%			1,79	1,62	1,61	1,67 4,92%	
1093,63 25,74 2,05	1,97	1,96	1,99 1,97%			1,33	1,43	1,08	1,28 11,40%	
502,48 25,77 1,85	1,08	0,07	1,00 73,14%	1,20			1,47	0,96	1,21 17,27%	
- - -	- - -	- - -	- - -	- - -		- - -	- - -	- - -	- - -	- - -
1093,63 39,62 1,91	1,81	1,81	1,84 2,56%	0,89			0,87	0,82	0,86 3,19%	
502,48 41,53 1,23	2,01	1,67	1,64 19,42%	1,51			1,39	1,54	1,48 4,26%	
1549,31 7,80	3,37	1,10	0,63	1,70 70,37%	2,78		4,22	2,61	3,20 22,50%	
1093,63 7,96	-2,00	5,00	2,20	1,73 166,07%	-1,48		-2,00	-0,39	-1,29 -51,82%	
502,48 7,87 -2,00	4,85	5,00	2,62 124,76%	2,39			1,28	3,93	2,53 42,93%	
1549,31 11,76 2,53	2,67	2,28	2,49 6,56%			1,15	1,60	2,18	1,65 25,56%	
1093,63 11,94 2,55	0,80	2,36	1,90 41,33%	1,56			1,56	1,79	1,64 6,56%	
502,48 11,73 4,96	5,00	5,00	4,99 0,40%	0,11			4,28	1,85	2,08 82,39%	

Tabela 5-6: Coeficiente de inércia x número KC para a oscilação normal na escala 1:30 a 00° e 45°

CASO	CM a 00°					CM a 45°				
	R1 (-)	R2 (-)	R3 (-)	SIGNIFICA (-)	ERRO % RMS	R1 (-)	R2 (-)	R3 (-)	SIGNIFICA (-)	ERRO % RMS
1549,31 19,80 2,35		2,46	1,78	2,19 13,63%	2,07		1,42	1,64	1,71 16,02%	
1093,63 19,63 2,20		2,28	2,59	2,36	7,17%	1,12	1,80	1,57	1,49 18,91%	
502,48 19,61 4,87		4,85	4,26	4,66	6,05%	2,59	0,79	1,67	1,69 43,61%	
1549,31 25,80 2,79		2,20	2,53	2,50	9,67%	1,85	1,53	1,40	1,60 11,81%	
1093,63 25,74 2,23		2,26	2,26	2,25	0,64%	2,03	1,97	2,48	2,16 10,63%	
502,48 25,77 2,40		4,06	5,00	3,82 28,12%	2,59		1,44	2,99	2,34 28,08%	
- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -
1093,63 39,62 1,94		2,56	2,36	2,29 11,29%	0,00		0,00	0,00	0,00 1,64%	
502,48 41,53 5,00		1,69	3,06	3,25 41,84%	1,14		1,60	1,62	1,45 15,24%	
1549,31 7,80		2,05	2,58	2,44 11,49%	1,66		1,18	1,80	1,55 17,08%	
1093,63 7,96		3,84	0,68	2,33 55,55%	2,42		3,50	2,92	2,95 14,97%	
502,48 7,87		5,00	3,11	4,05 19,08%	1,31		2,32	1,05	1,56 34,99%	
1549,31 11,76 2,03		1,83	2,27	2,05	8,89%	2,18	1,91	1,69	1,93 10,35%	
1093,63 11,94 2,12		2,95	2,44	2,50 13,71%	1,85		1,96	1,77	1,86 4,17%	
502,48 11,73 1,54		5,00	0,00	2,18 95,94%	2,75		0,00	1,73	1,49 76,07%	

5.2.2. Oscilação axial na escala 1:30

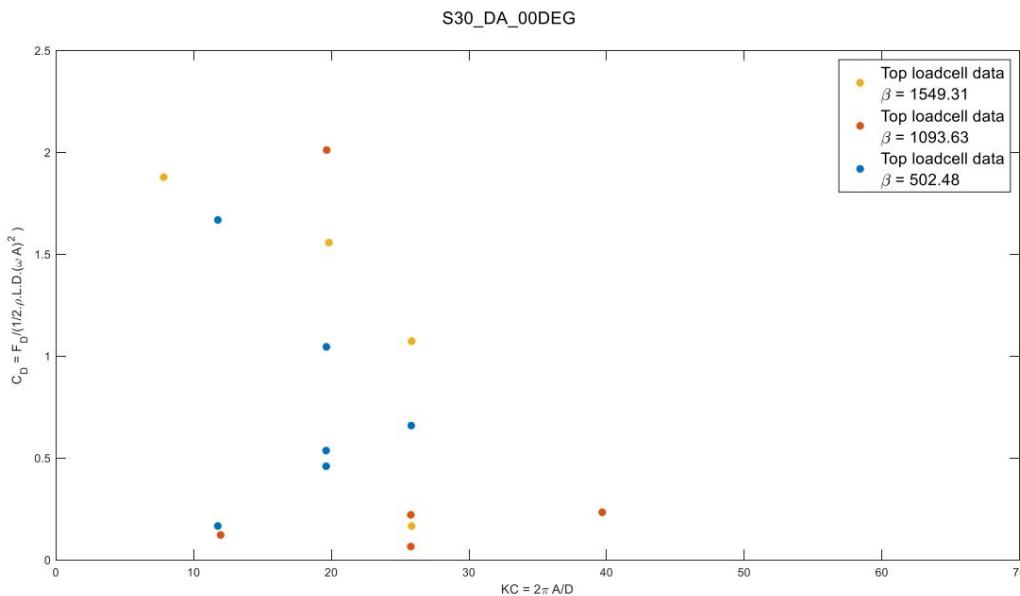


Figura 5-15: Coeficiente de arrasto x número KC para a oscilação axial na escala 1:30 a 00DEG na segunda execução

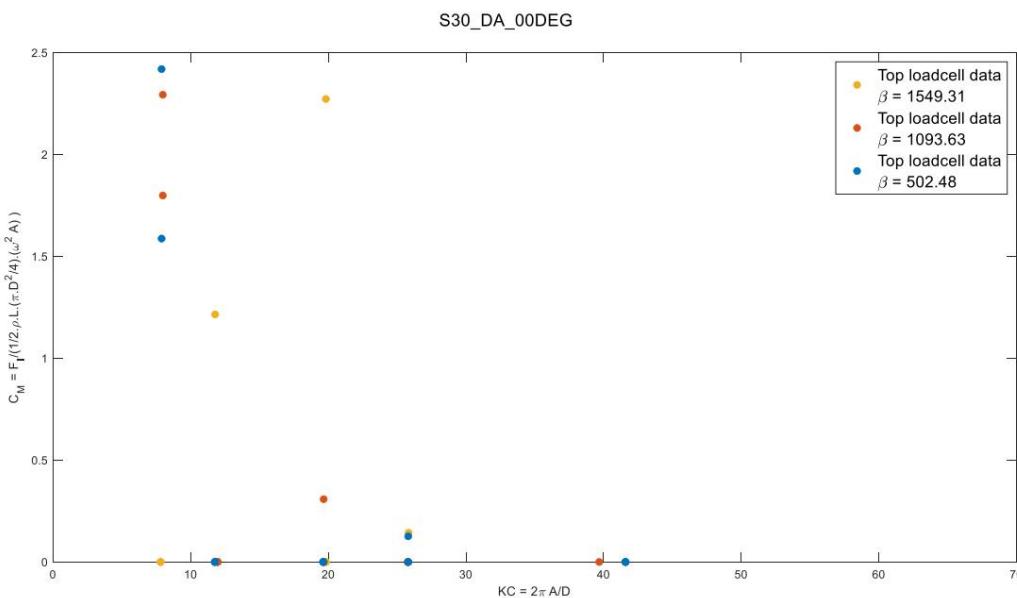


Figura 5-16: Coeficiente de inércia x número KC para a oscilação axial na escala 1:30 a 00DEG na segunda execução

Na oscilação axial em 1:30 os dados também mostram grande dispersão observada para a excitação normal. Os casos em que um dos coeficientes é nulo ocorreu devido aos limites estabelecidos para o ajuste por mínimos quadrados.

Tabela 5-7: Coeficiente de arrasto x número KC para a oscilação axial na escala 1:30 a 00DEG e 45°

CASO	CD a 00 DEG					CD a 45°				
	R1 (-)	R2 (-)	R3 (-)	SIGNIFICA (-)	ERRO % RMS	R1 (-)	R2 (-)	R3 (-)	SIGNIFICA (-)	ERRO % RMS
1549,31 19,82 -2,00	1,56	-2,00	-0,81	-205,94 %	-0,57	-0,83	1,43	0,01	12476,34%	
1093,63 19,66 -1,59	-1,32	2,01	-0,30	-544,75%	0,71	0,40	-0,04	0,36		86,43%
502,48 19,62 0,54	0,46	1,05	0,68 38,19%	-1,57		0,71	-0,09	-0,32		-299,98%
1549,31 25,84 1,07	-1,42	0,17	-0,06 1718,73%			0,75	0,05	0,73	0,51	64,25%
1093,63 25,78 0,22	-0,19	0,07	0,03 546,92%	-0,07		-0,22	0,50	0,07		435,39%
502,48 25,81 -1,06	0,66	-0,50	-0,30 -237,59%	-0,05		-0,56	0,62	0,00		11840,98%
- - -	- - -	- - -	- - -	- - -		- - -	- - -	- - -	- - -	- - -
1093,63 39,69 -0,31	-0,22	0,23	-0,10 -243,57%	0,06		-1,32	0,02	-0,41		-155,44%
502,48 41,60 -0,07	-0,25	-0,35	-0,22 -52,33%			0,32	0,51	-0,82	0,00	16950,88%
1549,31 7,32	-2,00	1,88	-2,00	-0,71 -258,50%	1,52	-2,00	1,02	0,18		856,53%
1093,63 7,97 -2,00	-2,00	-2,00	-2,00 0,00%			0,28	1,30	-0,17	0,47	132,00%
502,48 7,89	-2,00	-2,00	-1,47 -1,82 -13,60%			0,20	3,04	-0,68	0,85	185,74%
1549,31 11,78 3,60	-1,14	-1,44	0,34 677,04%	-1,03		1,95	3,03	1,32		130,48%
1093,63 11,96 -0,67	-0,02	0,12	-0,19 -180,64%	0,01		0,62	0,87	0,50		72,30%
502,48 11,75 1,67	0,17	2,90	1,58 70,86%			2,61	0,84	1,00	1,48	53,86%

Tabela 5-8: Coeficiente de inércia x número KC para a oscilação axial na escala 1:30 a 00DEG e 45°

CASO	CM a 00°					CM a 45°					
	R1 (-)	R2 (-)	R3 (-)	SIGNIFICA (-)	ERRO % RMS	R1 (-)	R2 (-)	R3 (-)	SIGNIFICA (-)	ERRO % RMS	
1549,31 19,82 2,27	0,00	0,00	0,76	141,42%	0,00	0,00	0,87	0,29	141,42%		
1093,63 19,66 0,00	0,00	0,31	0,10	141,42%	0,00	0,00	0,00	0,00	75,77%		
502,48 19,62 0,00	0,00	0,00	0,00	99,89%	0,00	0,50	0,00	0,17	141,42%		
1549,31 25,84 3,94	0,14	5,00	3,03	68,86%	0,12	0,00	0,42	0,18	99,03%		
1093,63 25,78 0,00	0,00	0,00	0,00	141,39%	0,00	0,00	1,85	0,62	141,42%		
502,48 25,81 0,00	0,13	0,00	0,04	141,42%	0,00	0,00	0,39	0,13	141,42%		
- - - - -	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1093,63 39,69 5,00	5,00	0,00	3,33	70,71%	2,69	1,28	3,16	2,38	33,63%		
502,48 41,60 0,00	0,00	0,00	0,00	77,42%	0,00	0,36	0,00	0,12	141,42%		
1549,31 7,32	0,00	0,00	3,73	1,24	141,42%	0,71	0,00	0,09	0,27	117,82%	
1093,63 7,97 2,29	1,80	2,62	2,24	15,13%	0,00	0,15	0,00	0,05	141,42%		
502,48 7,89	2,42	1,59	5,00	3,00	48,39%	1,76	1,18	0,00	0,98	74,69%	
1549,31 11,78 1,22	0,00	0,00	0,41	141,42%	0,00	0,00	1,01	0,34	141,42%		
1093,63 11,96 0,00	0,00	0,00	0,00	89,70%	0,00	0,00	0,00	0,00	59,29%		
502,48 11,75 0,00	0,00	3,33	1,11	141,42%	3,64	1,12	1,03	1,93	62,69%		

5.2.3. Efeito da porosidade do modelo

Como na seção 5.1.4, os coeficientes hidrodinâmicos foram plotados em relação ao número KC poroso (5.1).

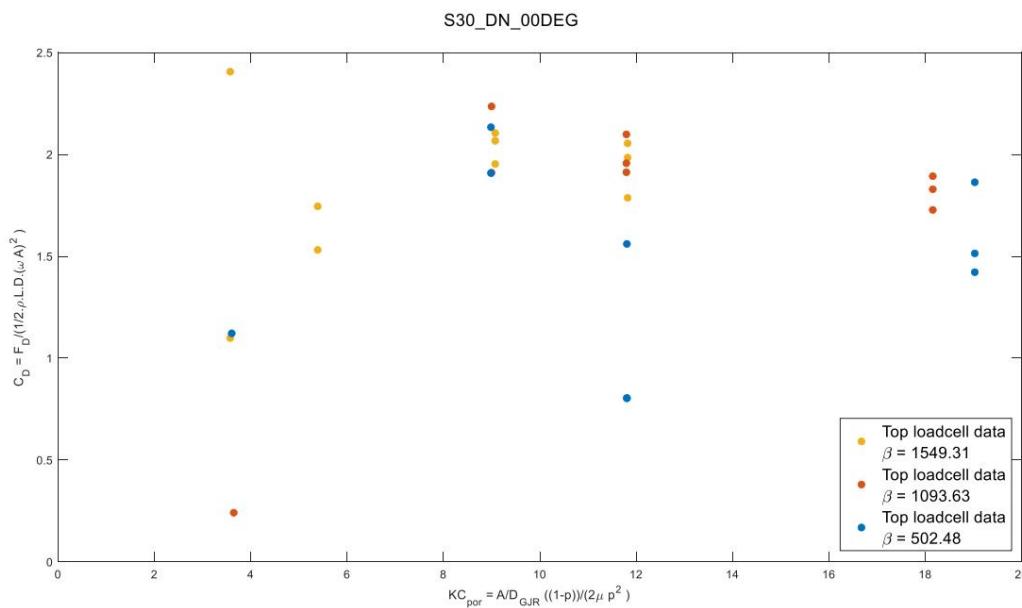


Figura 5-17: Coeficiente de arrasto x número para a oscilação axial na escala 1:30 – 00DEG

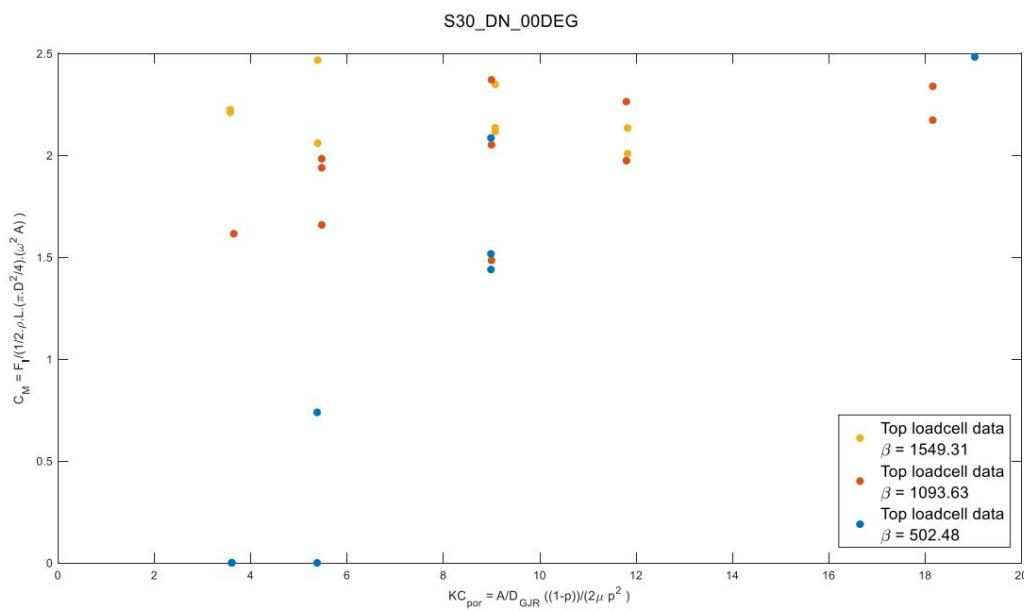


Figura 5-18: Coeficiente de inércia x

número para a oscilação axial na escala 1:30 – 00DEG

5.3. Comentários finais sobre os resultados

As seções acima apresentam os coeficientes hidrodinâmicos do modelo GJR em duas escalas diferentes em diferentes configurações e submetidos a ampla gama de oscilações (períodos e amplitudes).

Os dados dos coeficientes de arrasto e inércia para a oscilação normal na escala 1:9 apresentam um comportamento claro, aparentemente independente do número de Reynolds. A excitação axial apresentou maior dispersão em relação à oscilação normal. Os coeficientes de arrasto e inércia parecem depender do número de Reynolds e, além de alguns contornos, os pontos se espalham em tendências claras.

Nos testes na escala 1:30, porém, a dispersão dos pontos é ainda maior, apesar da boa repetibilidade observada para o movimento e cargas no Anexo A. O motivo dessa dispersão ainda não é claro a ponto de não ser aconselhável fazer qualquer conjectura sobre os efeitos de escala. Isso leva a sugestões para pesquisas futuras.

Apesar de não estar claro nos testes de 1:30, parece apropriado esperar coeficientes hidrodinâmicos na mesma ordem de grandeza de um cilindro liso. Outros efeitos, que não foram investigados neste estudo, poderiam ser mais explorados em pesquisas futuras, como o comportamento do fluxo dentro do GJR e seus efeitos no TCP, o que poderia ser feito usando ferramentas de visualização de fluxo como um PIV (*Particle Image Velocimeter*) ou mesmo estudos numéricos com CFD (*Computational Fluid Dynamics*). A independência de CD e CM para o número de Reynolds também pode ser investigada usando ferramentas semelhantes para visualizar o padrão de desprendimento de vórtices.



6. Referências

- [1] LOC, "SS7_21_02-TRF_01_D - Formulário de solicitação de teste para testes de modelo hidrodinâmico de 1:9 Gimbal Joint Riser (GJR)".
- [2] LOC, "SS7_21_02-TRF_02_D - Formulário de solicitação de teste para testes de modelo hidrodinâmico de 1:30 Gimbal Joint Riser (GJR)" 2022.
- [3] LOC, "SS7_21_02-TPR_001_B - Procedimentos de teste de oscilação forçada da junta do cardan Elevador".
- [4] LOC, SS7_21_02-ESR_001_D - Relatório de Configuração Experimental para Testes Hidrodinâmicos de GJR em LOC, 2022.
- [5] LOC, SS7_21_02-MTR_001_B - Relatório de Teste Modelo para Testes Hidrodinâmicos de GJR em LOC, 2022.
- [6] LOC, "PMS_GIH_002_21_001.1 - Teste hidrodinâmico de instalações LOC".
- [7] ITTC: Quality System Group of the 28th International Towing Tank, "7.5-02-01-03: Fresh water and seawater properties", em *ITTC Recommended Procedures and Guidelines*, 2011.
- [8] T. Sarpkaya, "Forças em Cilindros e Esferas em um Fluido Oscilante Sinusoidal", *Revista de Mecânica Aplicada*, 1975.
- [9] Representante Subsea7, "Encontro online", 25/07/2022.
- [10] DNVGL-RP-N103, "Modelagem e análise de operações marítimas", 2017.
- [11] D. Costa, "Especificação de teste de modelo em escala para Riser de Junta Gimbal - hidrodinâmica testes_v1," 2021.
- [12] OEC ot 2. ITTC ITTC, "7.5-01-03-01: Análise de incerteza, instrumento calibração", em *Procedimentos e Diretrizes Recomendados da ITTC*, 2017.

Apêndice A.**Análise de repetibilidade****A.1. Oscilações axiais na escala 1:9**

A verificação de repetibilidade foi realizada calculando a amplitude harmônica equivalente (3.1)

para cada corrida, conforme compilado e exibido para a amplitude do movimento (barras verticais cinzas) e para a amplitude das cargas (curva azul). Cada 3 pontos consecutivos representam as 3 repetições para cada caso, e a figura abaixo uma boa correspondência das amplitudes de cada caso. Os dados correspondentes à Figura A-1 são apresentados na Tabela A-1. É perceptível como alguns casos apresentam maior variação na amplitude de carga, conforme destacado na Tabela A-2, o que não é observado para a amplitude de movimento.

A mesma análise foi realizada para o modelo girado 45 graus em torno de si mesmo, conforme resumido na Figura A-2 e Tabela A-2.

A verificação de repetibilidade para a oscilação da estrutura sozinha é ilustrada pela Figura A-3.

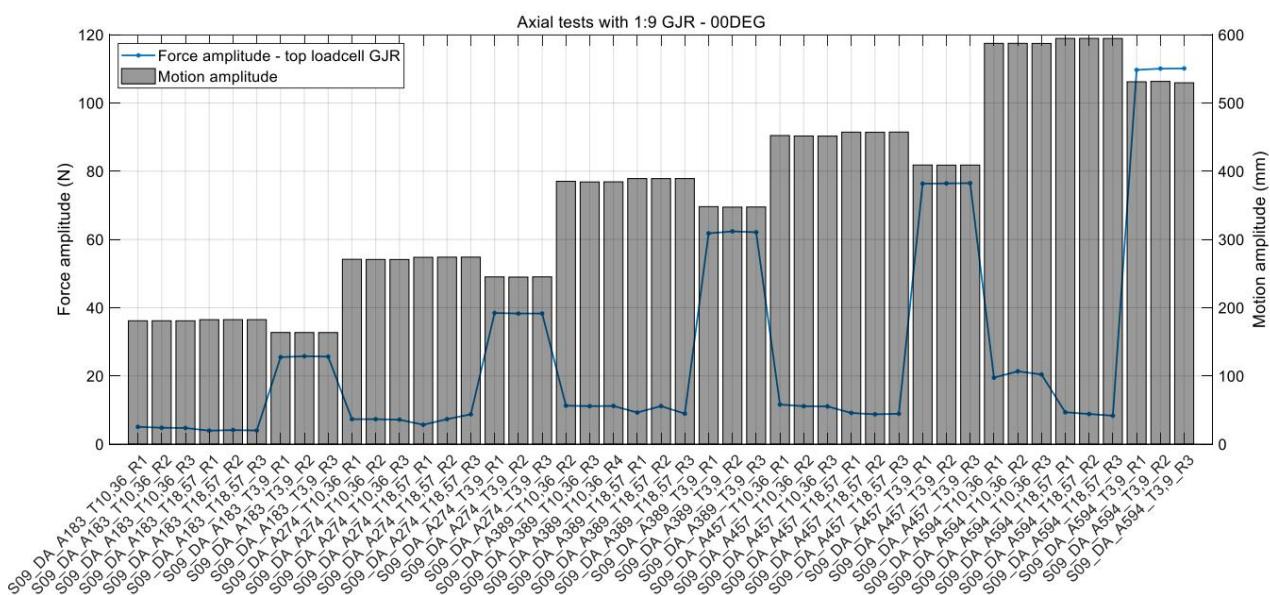


Figura A-1: Amplitudes de movimento (barras) e carga (curva azul) em cada corrida - verificação de repetibilidade para oscilações axiais em 00DEG em escala 1:9

Tabela A-1: Verificação de repetibilidade para oscilações axiais 1:9 a 00DEG

CASO	AMPLITUDE DE MOVIMENTO					AMPLITUDE DE CARGA				
	R1 (milímetros)	R2 (milímetros)	R3 (milímetros)	SIGNIFICA (milímetros)	ERRO % RMS	R1 (N)	R2 (N)	R3 (N)	SIGNIFICA (N)	ERRO % RMS
S09_DA_00DEG_A183_T18,57 182.42 182.46 182.46 182.45 0,01% 3.96 S09_DA_00DEG_A274_T18,57 4.12 4.01 4,03 1,74%										
273.82 274.04 274.08 273.98 0,04% 5.69 S09_DA_00DEG_A389_T18,57 389.21 389.16 389.21 389.19 7,33 8,75 7,25 17,26%										
0,01% 9.27 S09_DA_00DEG_A457_T18,57 457.24 457.05 457.35 457.21 0,03% 9.14 11.15 8,95 9,79 9,94%										
S09_DA_00DEG_A594_T18,57 594.55 594.57 594.49 594.54 0,01% 9.35 S09_DA_00DEG_A183_T10,36 8,75 8,90 8,93 1,81%										
180.81 180.84 180.77 180.81 0,02% 5.07 S09_DA_00DEG_A274_T10,36 270.90 270.68 270.61 270.73 8,85 8,34 8,84 4,68%										
0,05% 7.32 S09_DA_00DEG_A389_T10,36 385.18 384.24 384.45 384.63 0,11% 11.28 11.14 11.19 4,81 4.73 4,87 2,96%										
11.20 0.53% 7,33 7,18 7,28 0,92%										
S09_DA_00DEG_A457_T10,36 452.27 451.62 451.47 451,79 0,08% 11.62 11.12 11.07 11.27 2,20%										
S09_DA_00DEG_A594_T10,36 587,31 587,36 587,20 587,29 0,01% 19.49 21.36 20.42 20,42 3,74%										
S09_DA_00DEG_A183_T3,9 163,68 163,59 163,56 163,61 0,03% 25,49 25,76 25,66 25,64 0,44%										
S09_DA_00DEG_A274_T3,9 245,11 244,86 245,15 245,04 0,05% 38,44 38,29 38,30 38,34 0,18%										
S09_DA_00DEG_A389_T3,9 348,04 347,33 347,54 347,64 0,09% 61,79 62,37 62,11 62,09 0,38%										
S09_DA_00DEG_A457_T3,9 409,08 408,89 408,99 408,99 0,02% 76,36 76,42 76,50 76,43 0,08%										
S09_DA_00DEG_A594_T3,9 531,06 531,63 529,61 530,77 0,16% 109,69 110,06 110,13 109,96 0,18%										

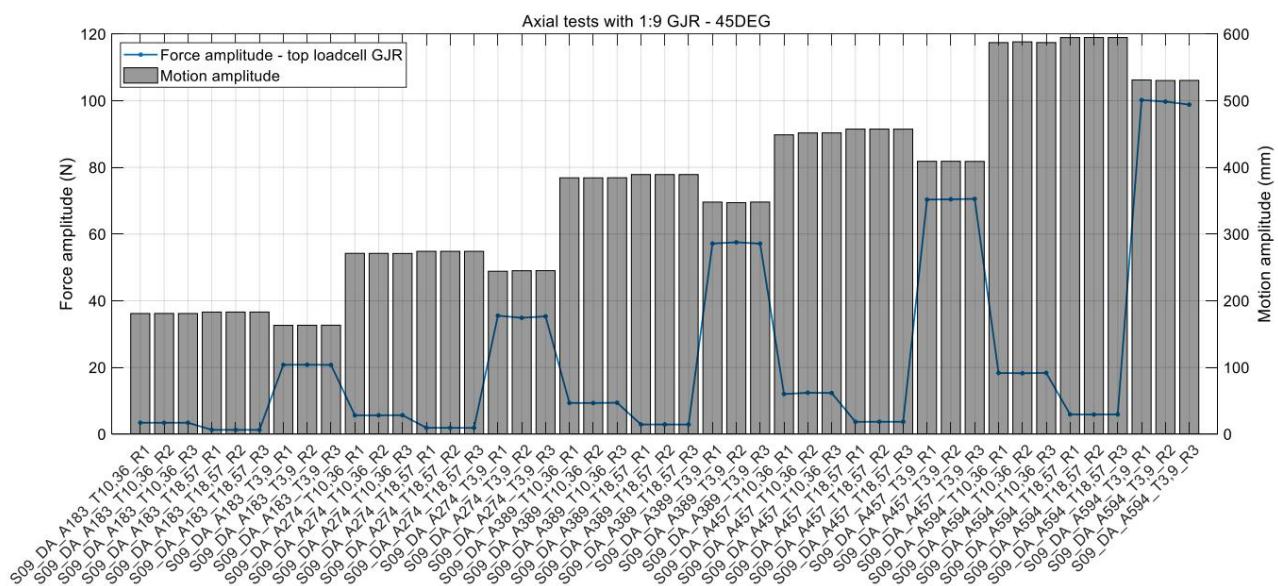


Figura A-2: Amplitudes de movimento (barras) e carga (curva azul) em cada execução - verificação de repetibilidade para oscilações axiais a 45° na escala 1:9

Tabela A-2: Verificação de repetibilidade para oscilações axiais de 1:9 a 45°

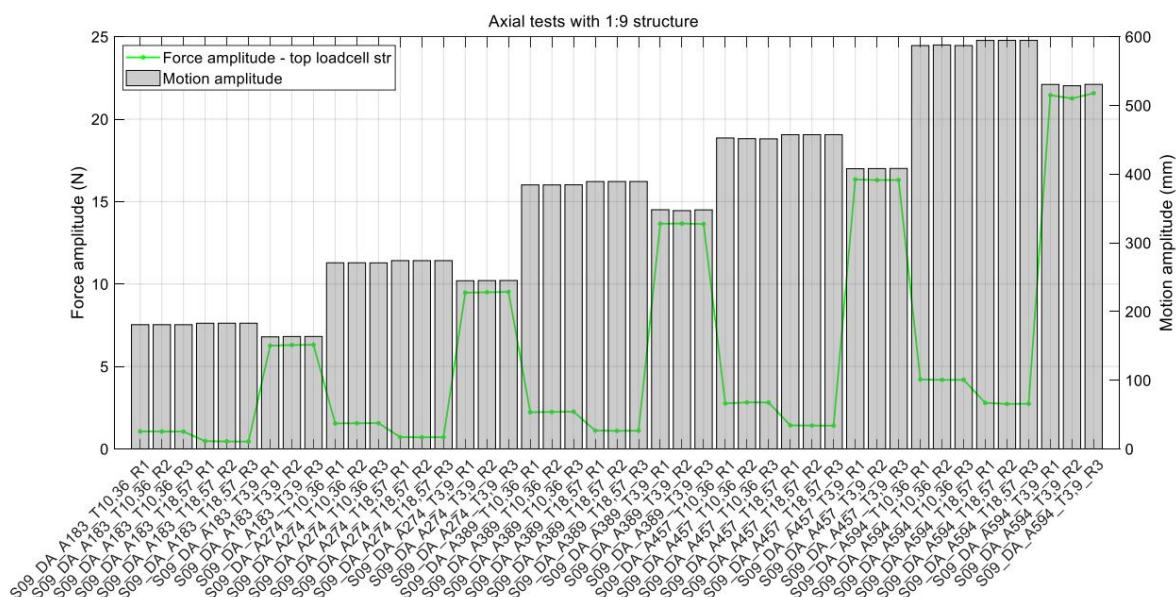


Figura A-3: Amplitudes de movimento (barras) e carga (curva azul) em cada corrida - verificação de repetibilidade para oscilações axiais da estrutura em escala 1:9



A.2. Oscilações normais na escala 1:9

A verificação da repetibilidade é ilustrada pelas figuras abaixo para ambas as amplitudes de movimento (barras cinzas) e carga (curva azul), mostrando a ergodicidade das execuções de teste, correspondendo novamente aos dados exibidos nas tabelas abaixo.

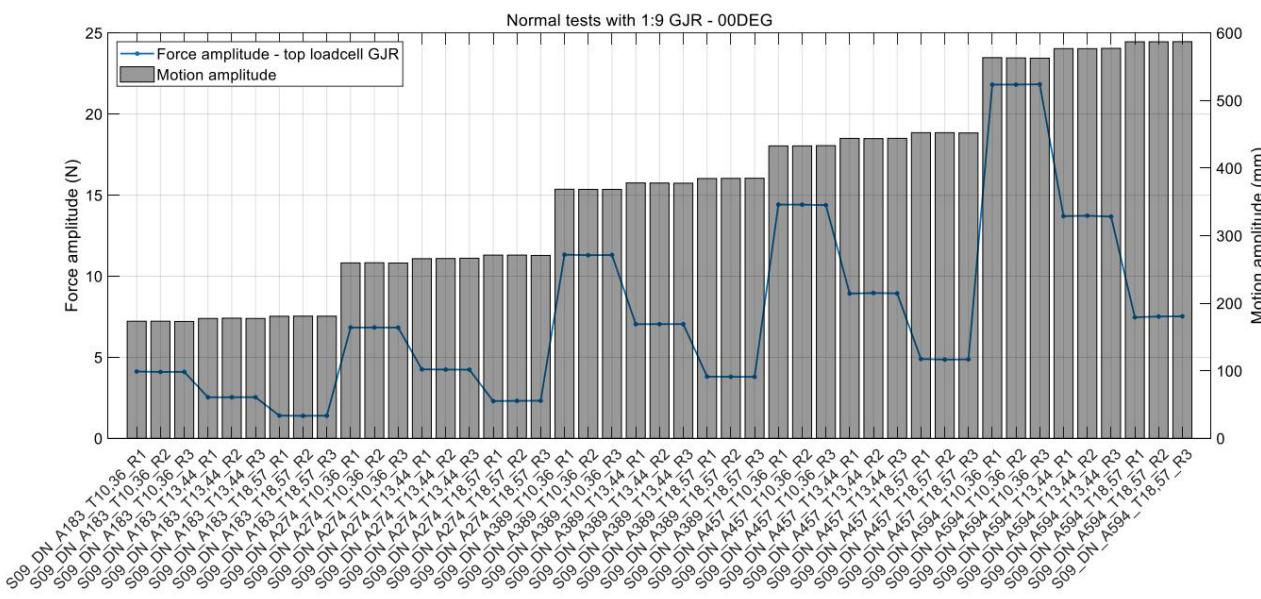


Figura A-4: Amplitudes de movimento (barras) e carga (curva azul) em cada corrida - verificação de repetibilidade para oscilações normais em 00DEG na escala 1:9

Tabela A-3: Verificação de repetibilidade para oscilações normais de 1:9 a 00DEG

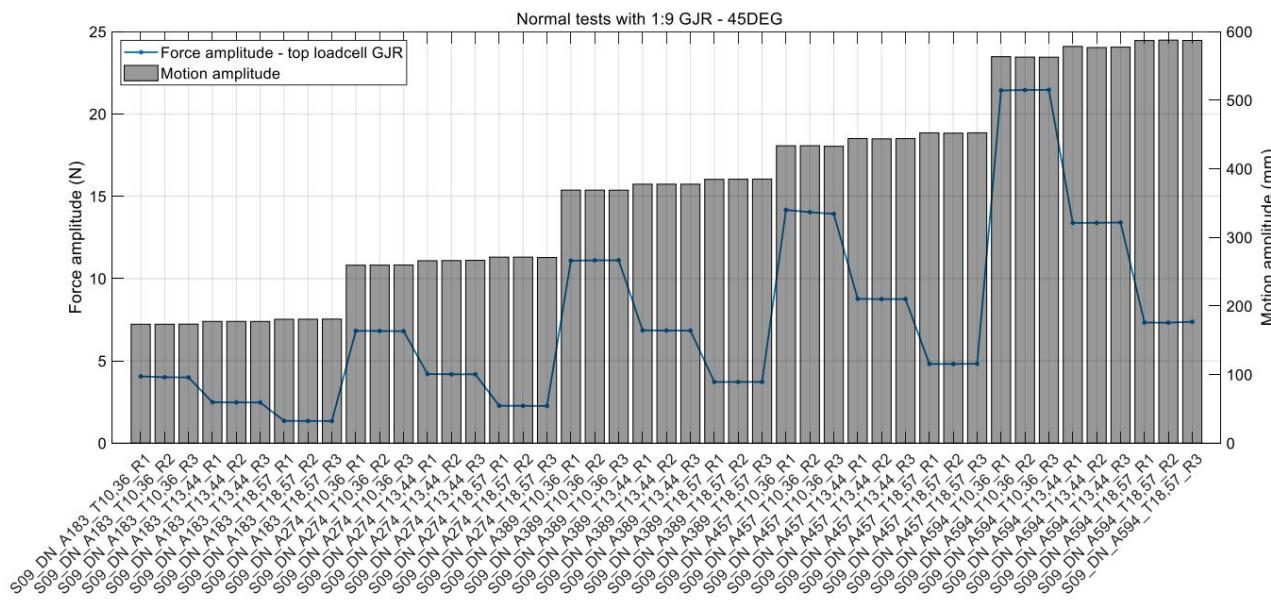


Figura A-5: Amplitudes de movimento (barras) e carga (curva azul) em cada execução - verificação de repetibilidade para oscilações normais a 45° na escala 1:9

Tabela A-4: Verificação de repetibilidade para oscilações normais de 1:9 a 45°

CASO	AMPLITUDE DE MOVIMENTO					AMPLITUDE DE CARGA				
	R1 (milímetros)	R2 (milímetros)	R3 (milímetros)	SIGNIFICA (milímetros)	ERRO % RMS	R1 (N)	R2 (N)	R3 (N)	SIGNIFICA (N)	ERRO % RMS
S09_DN_45DEG_A183_T18,57 180.62 180.70 180.85 180.72 0.05% 1.36 S09_DN_45DEG_A274_T18,57	1,35	1,35	1,35	1,35 0,29%						
271.24 271.27 270.71 271.07 0.10% 2.27 S09_DN_45DEG_A389_T18,57 384.62 384.84 385.02 384.83	2,27	2,26	2,27 0,26%							
0.04% 3.72 S09_DN_45DEG_A457_T18,57 452.42 451.96 452.48 452.29 0.05% 4.82	3,72	3,72	3,72 0,04%							
S09_DN_45DEG_A594_T18,57 587.00 587.62 587.13 587.25 0.05% 7.33 S09_DN_45DEG_A183_T13,44	4,81	4,83	4,82 0,11%							
177.50 177.55 177.46 177.51 0.02% 2.49 S09_DN_45DEG_A274_T13,44 265.98 266.20 266.58 266.25	7,32	7,38	7,34 0,34%							
0.09% 4.20 S09_DN_45DEG_A389_T13,44 377.53 377.59 377.55 377.56 0.01% 6.85	2,48	2,47	2,48 0,33%							
S09_DN_45DEG_A457_T13,44 444.17 443.68 444.04 443.96 0.05% 8.77 S09_DN_45DEG_A594_T13,44	4,18	4,18	4,19 0,19%							
578.35 576.77 577.39 577.50 0.11% 13.38 13,38 13,41 13,39 0,08%	6,85	6,84	6,85 0,08%							
						8,75	8,76	8,76 0,08%		
S09_DN_45DEG_A183_T10,36 173,42 173,42 173,53 173,46 0,03% 4,06 4,01 4,02 0,67%	3,99									
S09_DN_45DEG_A274_T10,36 259,46 259,58 259,79 259,61 0,05% 6.82 S09_DN_45DEG_A389_T10,36	6,81	6,80	6,81 0,12%							
368.93 368.92 368.86 368.90 0.01% 11.09 11.11 S09_DN_45DEG_A457_T10,36 433.58 433.66 432.85 433.36	11,11	11,10	11,10 0,09%							
0.09% 14.17 14.03 13.93 14.04 0.70%										
S09_DN_45DEG_A594_T10,36 563,53 562,90 562,74 563,06 0,06% 21,43 21,45 21,46 21,45 0,07%										

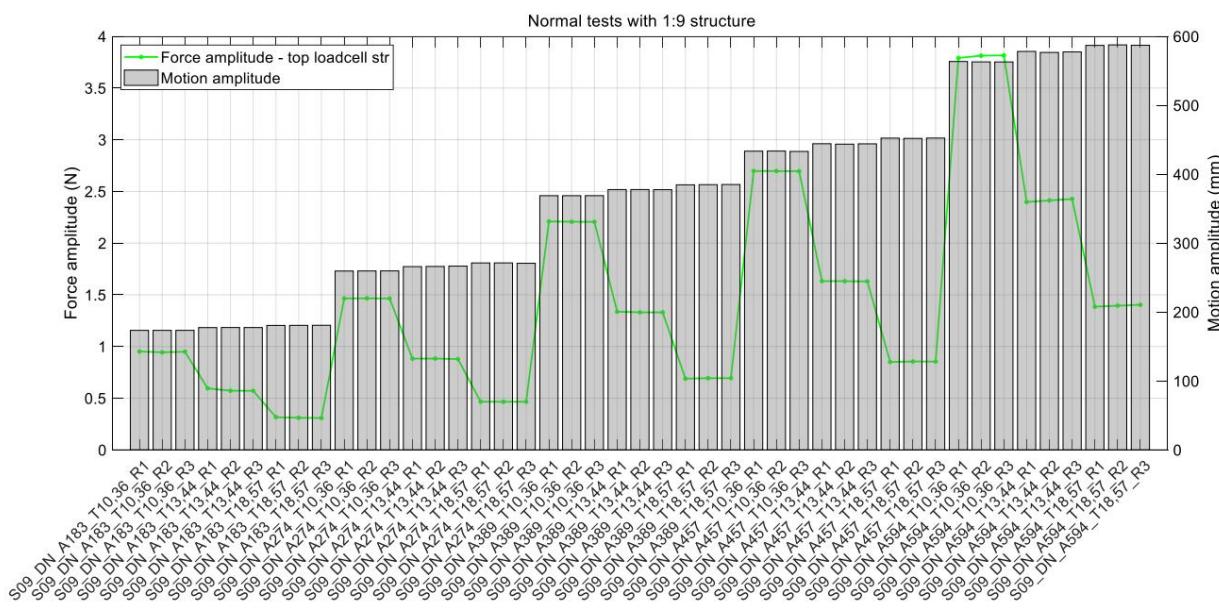


Figura A-6: Amplitudes de movimento (barras) e carga (curva azul) em cada corrida - verificação de repetibilidade para oscilações normais da estrutura na escala 1:9

A.3. Oscilações axiais na escala 1:30 - 1

rua conjunto de testes

A Figura A-7 exibe gráficos de amplitude de movimento e carga calculados por meio de (3.1), este último usando o sinal filtrado. As amplitudes de movimento são plotadas em barras, enquanto a amplitude de carga em uma curva, para melhor visualização de ambos os parâmetros simultaneamente. Cada 3 pontos consecutivos no gráfico abaixo representam as 3 corridas de cada caso. Nota-se que a amplitude dos movimentos não varia significativamente em cada corrida. As amplitudes de carga apresentam variação um pouco maior quando comparadas ao movimento, mas ainda pequenas o suficiente para indicar repetibilidade do teste.

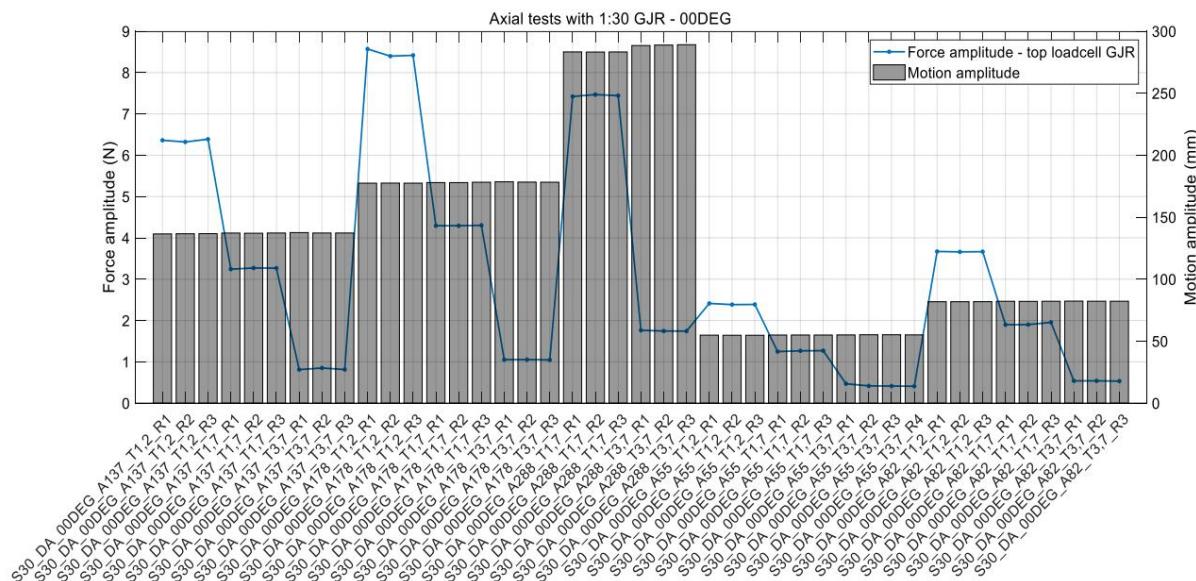


Figura A-7: Amplitudes de movimento (barras) e carga (curva azul) em cada corrida - verificação de repetibilidade para oscilações axiais em 00DEG na escala 1:30

A Tabela A-5 apresenta as amplitudes de movimento e carga para cada caso, e o erro RMS sobre a média para cada conjunto de 3 corridas. O erro RMS sobre o valor médio indica uma variação inferior a 1% em todos os casos para o movimento de amplitude, enquanto a variação na carga chega a 5% em relação ao valor médio em alguns casos. O maior percentual, comparado ao observado para o movimento, deve-se ao pequeno valor médio para a carga, como visto a seguir.

Tabela A-5: Verificação de repetibilidade para oscilações axiais de 1:30 a 00DEG

CASO	AMPLITUDE DE MOVIMENTO					AMPLITUDE DE CARGA					
	R1 (milímetros)	R2 (milímetros)	R3 (milímetros)	SIGNIFICA (milímetros)	ERRO % RMS	R1 (N)	R2 (N)	R3 (N)	SIGNIFICA (N)	ERRO % RMS	
S30_DA_00DEG_A55_T1,2	54,78	54,80	54,78	54,79	0,02%	2,41	2,39	2,39	2,40 0,49%		
S30_DA_00DEG_A82_T1,2	81,89	81,88	81,83	81,87	0,03%	3,67	3,66	3,67	3,67 0,08%		
S30_DA_00DEG_A137_T1,2	136,51	136,66	136,75	136,64	0,07%	S30_DA_00DEG_A178_T1,2	6,36	6,32	6,39	6,36 0,43%	
177,47	177,57	177,28	177,44	0,07%	S30_DA_00DEG_A288_T1,2	S30_DA_00DEG_A55_T1,7	8,60	8,40	8,42	8,47 1,10%	
S30_DA_00DEG_A82_T1,7	S30_DA_00DEG_A137_T1,7	137,27	136,93	137,27	137,16	-	-	-	-	-	
0,12%	S30_DA_00DEG_A178_T1,7	175,04	175,04	175,04	175,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
S30_DA_00DEG_A288_T1,7	283,35	283,28	283,33	283,30	0,02%	S30_DA_00DEG_A55_T3,7	1,90	1,90	1,97	1,92 1,66%	
S30_DA_00DEG_A82_T3,7	S30_DA_00DEG_A137_T3,7	137,60	137,30	137,56	137,49	3,24	3,26	3,29	3,26 0,63%		
0,10%	S30_DA_00DEG_A178_T3,7	178,57	178,37	178,46	178,47	0,05%	4,32	4,34	4h30	4,32 0,40%	
S30_DA_00DEG_A288_T3,7	289,20	289,05	289,14	289,13	0,02%	7,43	7,51	7,54	7,49 0,63%		
		55,11	55,20	55,21	55,17	0,08%	0,41	0,42	0,42	0,41 0,86%	
		82,47	82,26	82,34	82,36	0,10%	0,54	0,54	0,53	0,54 0,52%	
						0,81	0,85	0,82	0,83 2,11%		
						1,06	1,06	1,05	1,05 0,29%		
						1,77	1,74	1,75	1,75 0,55%		

Análise semelhante foi realizada para as oscilações axiais com o modelo girado em 45 graus, apresentando comportamento semelhante. A comparação das amplitudes de carga entre o modelo a 0 e a 45 graus mostram valores semelhantes, indicando (sem nenhum pós-processamento avançado) que a rotação não afeta as cargas hidrodinâmicas no gimbal.

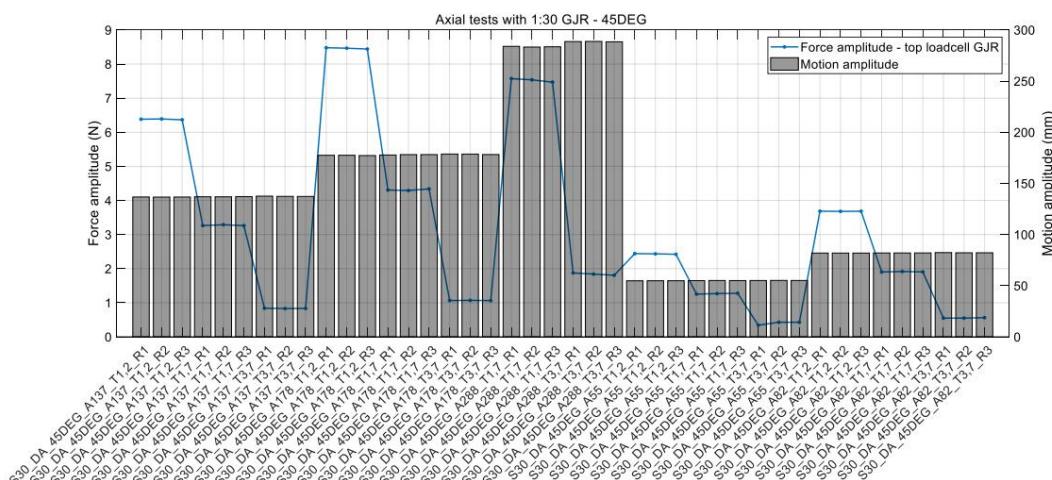


Figura A-8: Amplitudes de movimento (barras) e carga (curva azul) em cada execução - verificação de repetibilidade para oscilações axiais a 45° na escala 1:30



Tabela A-6: Verificação de repetibilidade para oscilações axiais de 1:30 a 45°

CASO	AMPLITUDE DE MOVIMENTO					AMPLITUDE DE CARGA								
	R1 (milímetros)	R2 (milímetros)	R3 (milímetros)	SIGNIFICA (milímetros)	ERRO % RMS	R1 (N)	R2 (N)	R3 (N)	SIGNIFICA (N)	ERRO % RMS				
S30_DA_45DEG_A55_T1,2	54,78	54,81	54,85	54,81	0,06%	2,44	2,42	2,42	2,43	0,35%				
S30_DA_45DEG_A82_T1,2	81,88	81,86	81,90	81,88	0,02%	3,68	3,71	3,71	3,69	0,31%				
S30_DA_45DEG_A137_T1,2	136,63	136,67	136,67	0,03%	6,39	S30_DA_45DEG_A178_T1,2	6,39	6,36	6,38	0,21%				
177,56	177,57	177,23	177,45	0,09%	8,47	S30_DA_45DEG_A288_T1,2	S30_DA_45DEG_A55_T1,7	8,46	8,44	8,46	0,14%			
S30_DA_45DEG_A82_T1,7	S30_DA_45DEG_A137_T1,7	136,93	136,93	137,28	137,05	0,12%	3,27	—	—	—	—			
S30_DA_45DEG_A178_T1,7	177,84	177,55	177,55	177,55	0,05%	10,80	S30_DA_45DEG_A288_T1,7	1,27	1,28	1,27	0,65%			
283,99	283,27	283,54	283,60	0,10%	7,82	S30_DA_45DEG_A55_T1,7	S30_DA_45DEG_A82_T3,7	1,92	1,92	1,91	0,43%			
S30_DA_45DEG_A137_T3,7	137,55	137,32	137,55	137,47	0,08%	0,84	S30_DA_45DEG_A178_T3,7	3,28	3,26	3,27	0,30%			
178,71	178,67	178,45	178,61	0,06%	1,07	S30_DA_45DEG_A288_T3,7	289,20	289,05	288,43	288,89	4,31	4,33	4,31	0,33%
0,12%	1,88	—	—	—	—	—	—	7,59	7,56	7,60	0,56%			
		55,10	55,16	55,08	55,11	0,07%	0,34	—	0,43	0,43	0,40	10,30%		
		82,40	82,21	82,31	82,31	0,10%	0,55	—	0,56	0,55	0,55	1,14%		
		—	—	—	—	—	—	0,83	0,83	0,84	0,42%			
		—	—	—	—	—	—	1,07	1,07	1,07	0,26%			
		—	—	—	—	—	—	1,84	1,82	1,85	1,24%			

Após os testes com o modelo do gimbal, a estrutura foi oscilada sozinha para medir as cargas adquiridas pelas células de carga diferentes do desejado, que é a carga hidrodinâmica no gimbal. A ergodicidade deste teste também foi verificada de forma semelhante, conforme ilustrado pela Figura A-9.

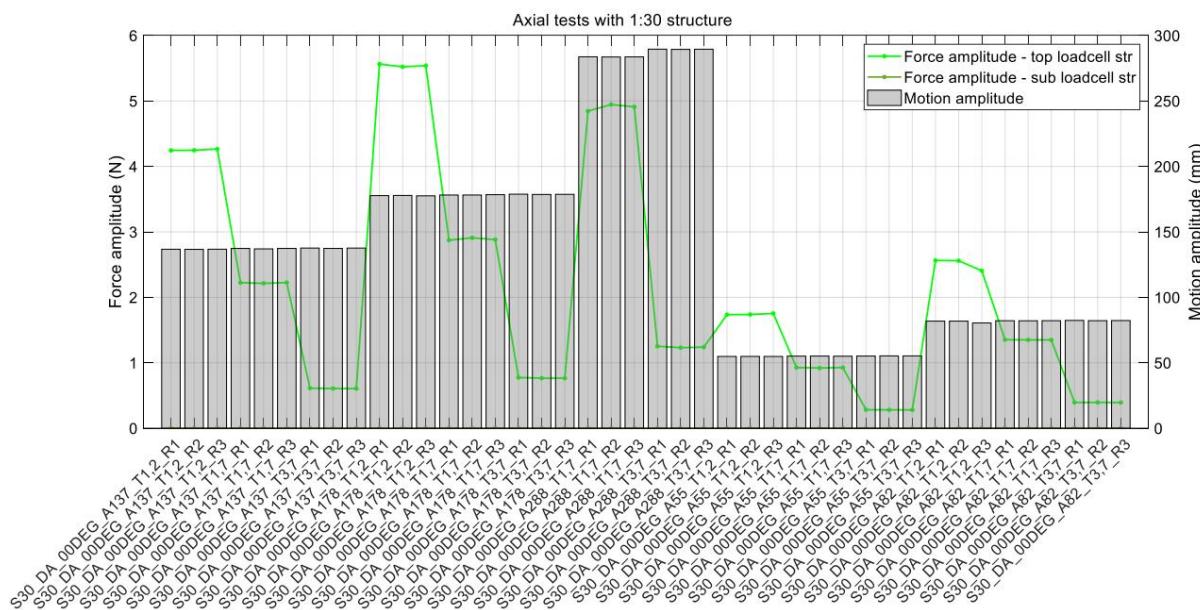


Figura A-9: Amplitudes de movimento (barras) e carga (curva azul) em cada corrida - verificação de repetibilidade para oscilações axiais da estrutura na escala 1:30



A.4. Oscilações normais na escala 1:30 – 1 testes

rua

As figuras e tabelas resumem a verificação de repetibilidade para o primeiro conjunto de oscilações normais no conjunto de 1:30.

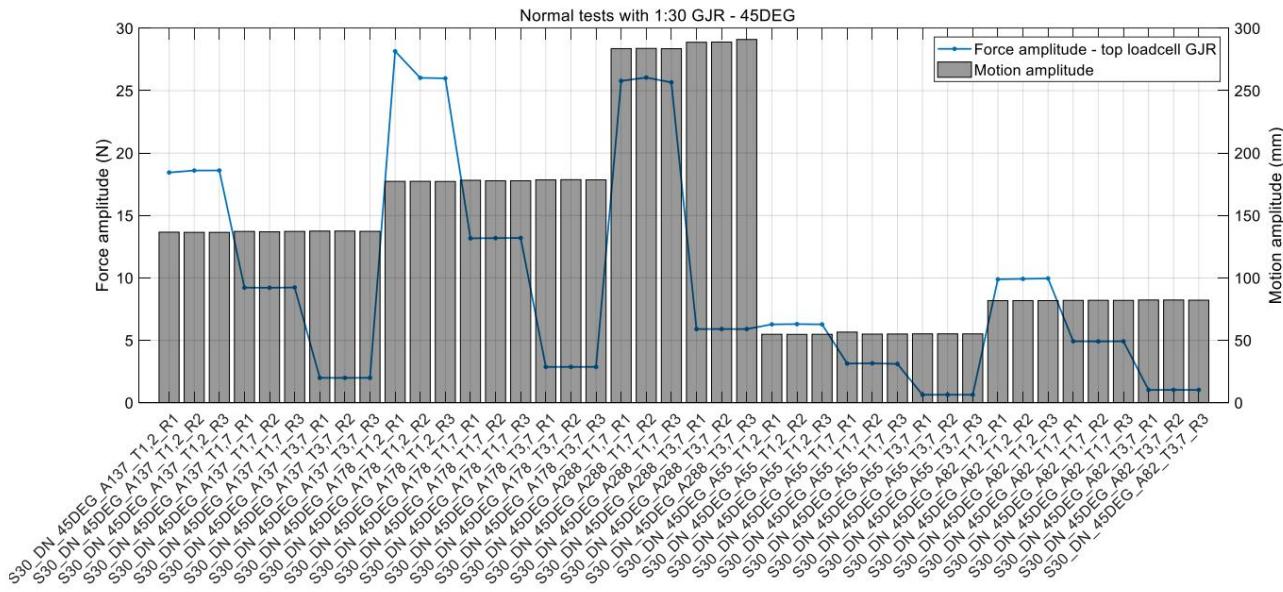


Figura A-10: Amplitudes de movimento (barras) e carga (curva azul) em cada corrida - verificação de repetibilidade para oscilações normais em 00DEG na escala 1:30

Tabela A-7: Verificação de repetibilidade para oscilações normais de 1:30 a 00DEG

CASO	AMPLITUDE DE MOVIMENTO					AMPLITUDE DE CARGA						
	R1 (milímetros)	R2 (milímetros)	R3 (milímetros)	SIGNIFICA (milímetros)	ERRO % RMS	R1 (N)	R2 (N)	R3 (N)	SIGNIFICA (N)	ERRO % RMS		
S30_DN_00DEG_A55_T1,2	55,06	55,00	55,07	55,05	0,06%	6,38			6,33	6,37	6,36 0,32%	
S30_DN_00DEG_A82_T1,2	82,06	82,12	82,04	82,07	0,04%	9,94			10,00	9,98	9,97 0,26%	
S30_DN_00DEG_A137_T1,2	137,15	137,02	137,02	137,06	0,04%	18,80	19,00	18,95	18,92	0,44%		
S30_DN_00DEG_A178_T1,2	178,07	178,10	178,00	178,06	0,02%	26,38	26,98	26,75	26,70	0,94%		
S30_DN_00DEG_A288_T1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
S30_DN_00DEG_A55_T1,7	55,29	55,27	55,31	55,29	0,03%	3,20			3,21	3,18	3,20 0,40%	
S30_DN_00DEG_A82_T1,7	82,46	82,28	82,30	82,34	0,10%	4,98			4,99	4,98	4,98 0,10%	
S30_DN_00DEG_A137_T1,7	137,70	137,43	137,76	137,63	0,11%	9,65	S30_DN_00DEG_A178_T1,7		9,57	9,56	9,59 0,40%	
	178,59	178,57	178,98	178,71	0,11%	13,84	13,68	13,64	13,72	0,62%		
S30_DN_00DEG_A288_T1,7	284,84	284,63	284,77	284,74	0,03%	26,95	27,14	27,09	27,06	0,29%		
S30_DN_00DEG_A55_T3,7	0,66	S30_DN_00DEG_A82_T3,7	55,45	55,41	0,02%	0,07	S30_DN_00DEG_A137_T3,7	137,87	137,74	137,78	0,65	0,50 45,83%
137,80	0,04%	2,09	S30_DN_00DEG_A178_T3,7	82,78	82,54	0,26	82,56	82,60	0,06%	82,61	82,79	82,79 0,05%
S30_DN_00DEG_A288_T3,7	289,98	290,17	289,99	290,05	0,03%	6,22			2,06	2,08	2,08 0,58%	
									3,02	3,01	3,01 0,16%	
									6,22	6,23	6,22 0,09%	

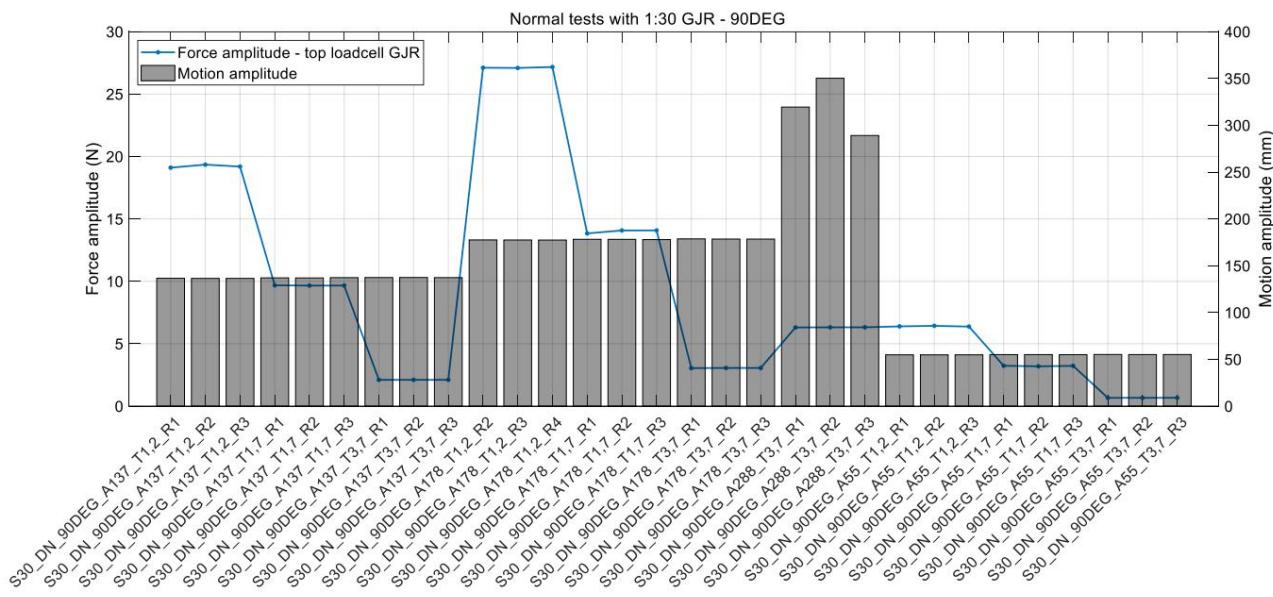


Figura A-11: Amplitudes de movimento (barras) e carga (curva azul) em cada execução - verificação de repetibilidade para oscilações normais a 45° na escala 1:30

Tabela A-8: Verificação de repetibilidade para oscilações normais de 1:30 a 45°

CASO	AMPLITUDE DE MOVIMENTO					AMPLITUDE DE CARGA				
	R1 (milímetros)	R2 (milímetros)	R3 (milímetros)	SIGNIFICA	ERRO % RMS	R1 (N)	R2 (N)	R3 (N)	SIGNIFICA	ERRO % RMS
S30_DN_45DEG_A55_T1,2	54,83	54,78	54,83	54,82 0,05%		6,28	6h30	6,28	6,29 0,16%	
S30_DN_45DEG_A82_T1,2	81,79	81,82	81,82	81,81 0,01%		9,89	9,92	9,96	9,92 0,28%	
S30_DN_45DEG_A137_T1,2	136,64	136,49	136,49	136,54 0,05%	18,44	18,60	18,61	18,55 0,41%		
S30_DN_45DEG_A178_T1,2	177,34	177,36	177,25	177,32 0,03%	28,16	26,03	25,98	26,72 3,80%		
S30_DN_45DEG_A288_T1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S30_DN_45DEG_A55_T1,7	56,59	54,99	55,06	55,55 1,33%		3,14	3,16	3,11	3,14 0,65%	
S30_DN_45DEG_A82_T1,7	81,99	82,06	82,00	82,02 0,04%		4,93	4,92	4,92	4,92 0,09%	
S30_DN_45DEG_A137_T1,7	137,23	136,91	137,24	137,13 0,11%	S30_DN_45DEG_A178_T1,7	9,22	9,21	9,23	9,22 0,09%	
178,19	177,82	177,80	177,94 0,10%	13,17	13,19	13,20	13,19 0,08%			
S30_DN_45DEG_A288_T1,7	283,66	283,81	283,60	283,69 0,03%	25,78	26,05	25,66	25,83 0,63%		
S30_DN_45DEG_A55_T3,7	55,20	55,19	55,15	55,18 0,04%		0,64	0,64	0,64	0,64 0,22%	
S30_DN_45DEG_A82_T3,7	82,31	82,31	82,17	82,26 0,08%		1,03	1,03	1,03	1,03 0,11%	
S30_DN_45DEG_A137_T3,7	137,53	137,30	137,44	137,44 0,07%	S30_DN_45DEG_A178_T3,7	2,00	1,99	2,00	1,99 0,10%	
178,52	178,68	178,55	178,58 0,04%	S30_DN_45DEG_A288_T3,7	288,75	288,92	290,98		2,87 0,08%	
289,55 0,35%						5,90	5,90	5,90	5,90 0,03%	

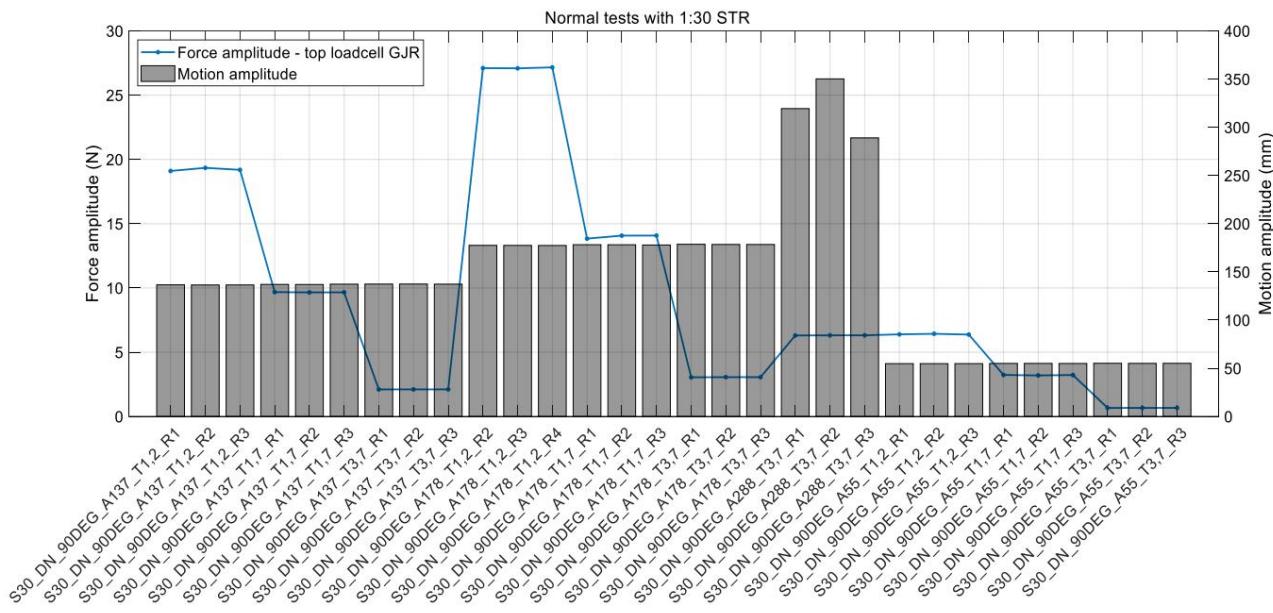


Figura A-12: Amplitudes de movimento (barras) e carga (curva azul) em cada execução - verificação de repetibilidade para oscilações normais a 90° na escala 1:30

Tabela A-9: Verificação de repetibilidade para oscilações normais de 1:30 a 90°

CASO	AMPLITUDE DE MOVIMENTO					AMPLITUDE DE CARGA					
	R1 (milímetros)	R2 (milímetros)	R3 (milímetros)	SIGNIFICA (milímetros)	ERRO % RMS	R1 (N)	R2 (N)	R3 (N)	SIGNIFICA (N)	ERRO % RMS	
S30_DN_90DEG_A55_T1,2	54,83	54,82	54,83	54,83	0,01%	6,39	6,43	6,37	6,40	0,40%	
S30_DN_90DEG_A82_T1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
S30_DN_90DEG_A137_T1,2	136,59	136,44	136,46	136,50	0,05%	19,10	19,35	19,19	19,21	0,52%	
S30_DN_90DEG_A178_T1,2	177,54	177,48	177,41	177,47	0,03%	27,11	27,09	27,17	27,12	0,12%	
S30_DN_90DEG_A288_T1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
S30_DN_90DEG_A55_T1,7	55,04	55,06	54,99	55,03	0,05%	3,24	3,19	3,23	3,22	0,58%	
S30_DN_90DEG_A82_T1,7	82,20	82,04	82,01	82,08	0,10%	5,03	5,04	5,03	5,04	0,09%	
S30_DN_90DEG_A137_T1,7	137,0	136,93	137,27	137,07	0,10%	S30_DN_90DEG_A178_T1,7	9,68	9,66	9,66	9,67	0,10%
178,20 178,15 177,88 178,08 0,08%	13,84	14,07	14,08	14,00	0,80%						
S30_DN_90DEG_A288_T1,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
S30_DN_90DEG_A55_T3,7	55,18	55,09	55,15	55,14	0,07%	0,67	0,67	0,67	0,67	0,21%	
S30_DN_90DEG_A82_T3,7	82,33	82,23	82,18	82,25	0,07%	1,07	1,07	1,07	1,07	0,03%	
S30_DN_90DEG_A137_T3,7	137,35	137,41	137,28	137,35	0,04%	S30_DN_90DEG_A178_T3,7	2,11	2,11	2,11	2,11	0,05%
178,65 178,46 178,44 178,52 0,05%	S30_DN_90DEG_A288_T3,7	319,43	350,24	289,06		3,05	3,06	3,06	3,06	0,17%	
319,58 7,82%						6h30	6,31	6,32	6,31	0,09%	

Após os testes com o modelo do gimbal, a estrutura foi oscilada sozinha para medir as cargas adquiridas pelas células de carga diferentes do desejado, que é a carga hidrodinâmica no gimbal. A ergodicidade deste teste também foi verificada de forma semelhante, conforme ilustrado pela Figura A-13.

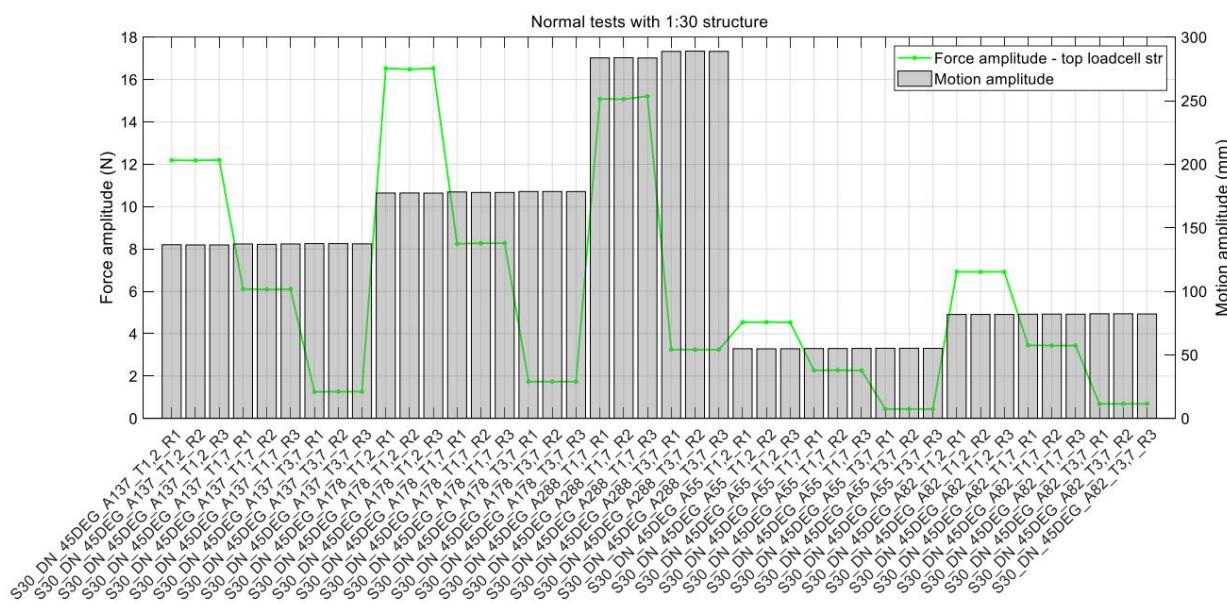


Figura A-13: Amplitudes de movimento (barras) e carga (curva azul) em cada corrida - verificação de repetibilidade para oscilações normais da estrutura na escala 1:30

A.5. Oscilações axiais na escala 1:30 - 2 nd conjunto de testes

Um segundo conjunto de testes foi realizado na escala 1:30 apenas para as condições 00DEG. Os gráficos e tabelas abaixo apresentam a análise de repetibilidade para este conjunto.

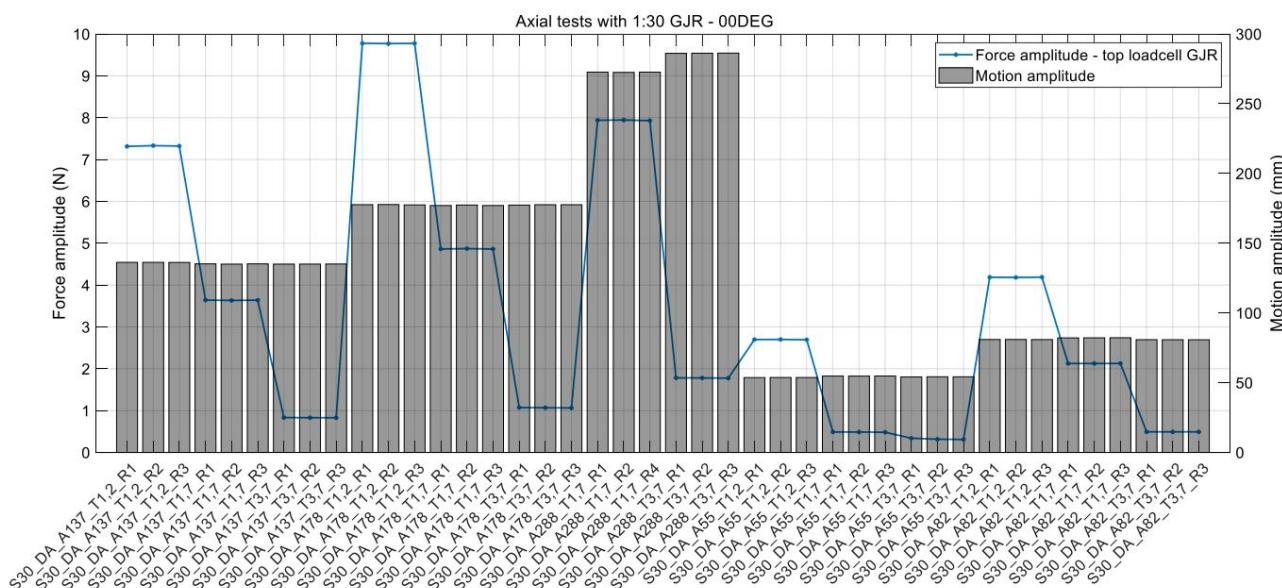


Figura A-14: Amplitudes de movimento (barras) e carga (curva azul) em cada execução - verificação de repetibilidade para o segundo conjunto de oscilações axiais do GJR na escala 1:30

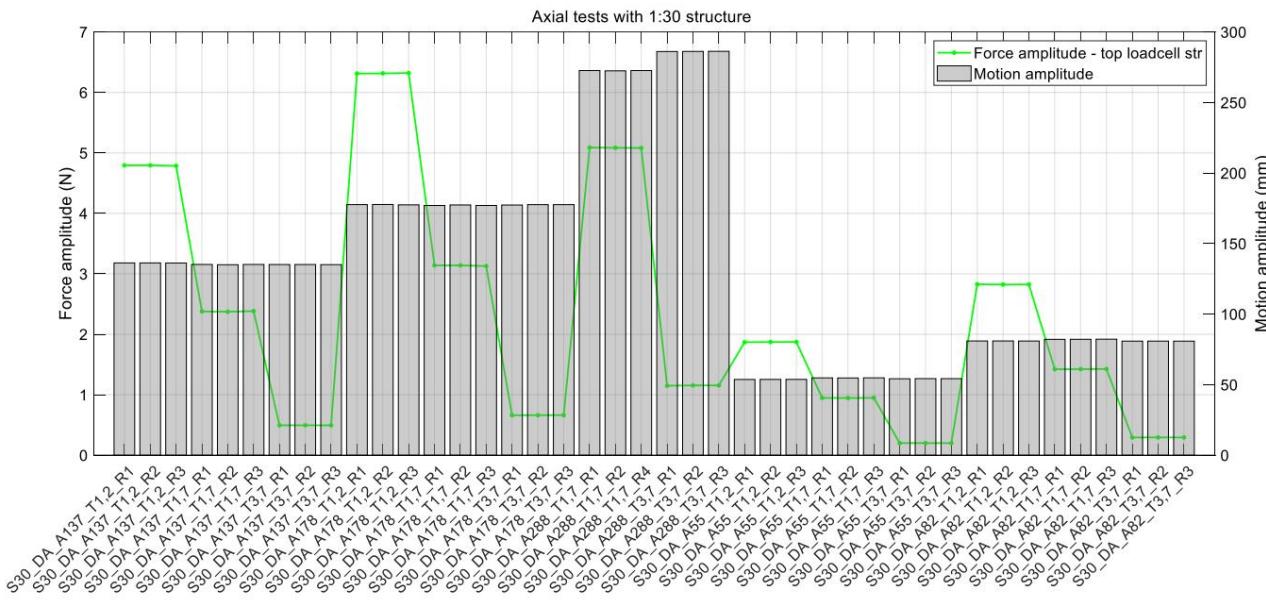


Figura A-15: Amplitudes de movimento (barras) e carga (curva azul) em cada corrida - verificação de repetibilidade para o segundo conjunto de oscilações axiais da estrutura na escala 1:30

Tabela A-10: Verificação de repetibilidade para o segundo conjunto de oscilações axiais de 1:30 a 00DEG

CASO	AMPLITUDE DE MOVIMENTO					AMPLITUDE DE CARGA					
	R1 (milímetros)	R2 (milímetros)	R3 (milímetros)	SIGNIFICA (milímetros)	ERRO % RMS	R1 (N)	R2 (N)	R3 (N)	SIGNIFICA (N)	ERRO % RMS	
S30_DA_00DEG_A55_T1,2	53,69	53,74	53,74	53,73	0,05%	2,70	2,70	2,69	2,70	0,11%	
S30_DA_00DEG_A82_T1,2	80,98	81,00	80,94	80,97	0,03%	4,19	4,18	4,19	4,19	0,07%	
S30_DA_00DEG_A137_T1,2	136,30	136,29	136,23	136,27	0,02%	S30_DA_00DEG_A178_T1,2	7,31	7,33	7,32	7,32 0,10%	
135.03 135.05 135.10 135.06 0.02%	S30_DA_00DEG_A288_T1,2 S30_DA_00DEG_A55_T1,7					0,83	0,83	0,83	0,83	0,22%	
S30_DA_00DEG_A82_T1,7	S30_DA_00DEG_A137_T1,7	135.27	135.02	135.21	135.15	-	-	-	-	-	
0,06%	S30_DA_00DEG_A178_T1,7	154,82	154,75	154,88	154,79	0,65%	10 %	0,49	0,49	0,48	0,49 0,59%
S30_DA_00DEG_A288_T1,7	272,67	272,67	272,68	272,68	0,05%	S30_DA_00DEG_A55_T3,7	2,13	2,13	2,13	2,13	0,04%
54,17	54,27	54,25	54,23	54,23	0,09%	S30_DA_00DEG_A82_T3,7	3,64	3,63	3,64	3,64	0,10%
135.03 135.05 135.10 135.06 0.02%	S30_DA_00DEG_A137_T3,7	177,35	177,61	177,61	177,61		4,86	4,87	4,86	4,87	0,10%
177,52	0,07%	S30_DA_00DEG_A288_T3,7	286,14	286,23	286,30	286,22	0,02%	7,94	7,94	7,93	7,94 0,08%
							0,34	0,32	0,31	0,32	3,96%
						80,87	80,84	80,80	80,83	0,03%	
						0,49	0,49	0,49	0,49	0,08%	
						0,83	0,83	0,83	0,83	0,22%	
						1,07	1,07	1,06	1,07	0,33%	
						1,78	1,78	1,78	1,78	0,16%	

No segundo conjunto de testes, dada a observação de que o ângulo do modelo não afetaria as cargas hidrodinâmicas no GJR e apenas os casos 00DEG foram testados, decidiu-se aumentar o número de condições de oscilação para explorar outras combinações de amplitudes e períodos (KC e Reynolds). Cada caso adicional foi executado três vezes, como os originais.

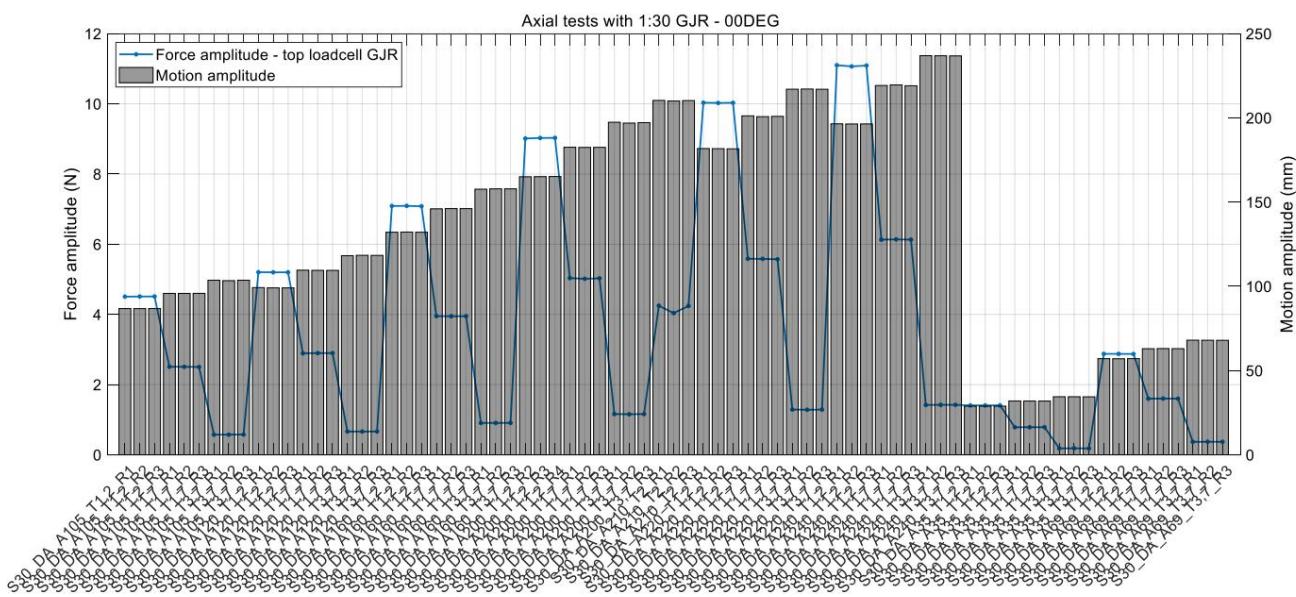


Figura A-16: Amplitudes de movimento (barras) e carga (curva azul) em cada execução - verificação de repetibilidade para o segundo conjunto de oscilações axiais do GJR na escala 1:30 para casos adicionais

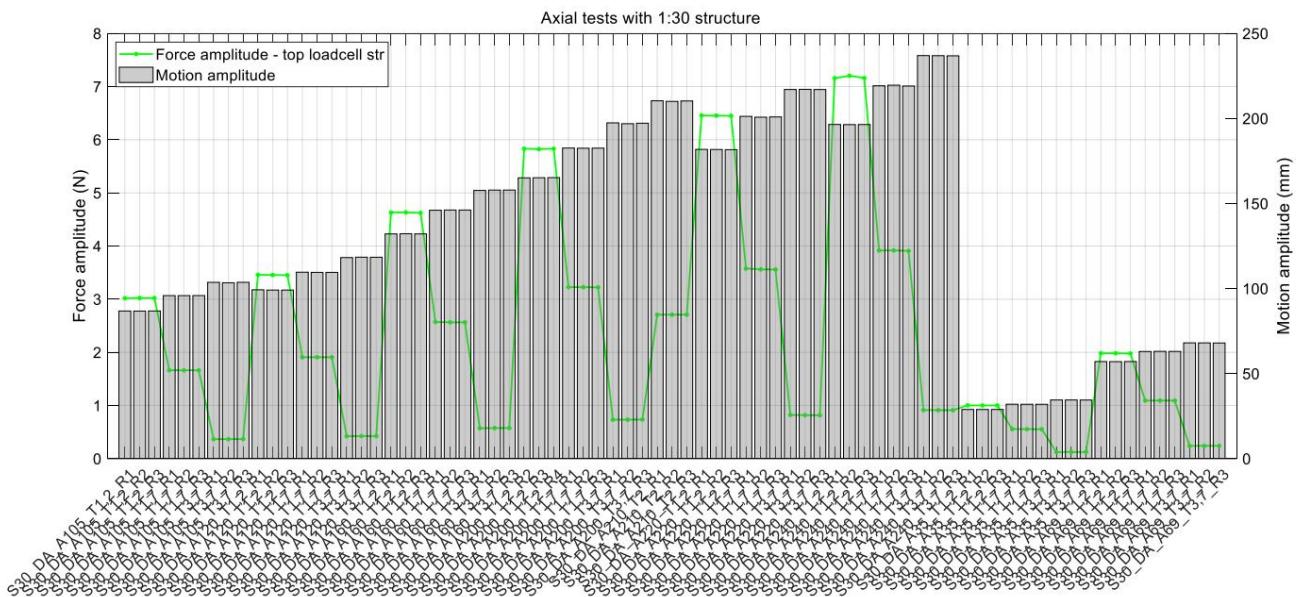


Figura A-17: Amplitudes de movimento (barras) e carga (curva azul) em cada corrida - verificação de repetibilidade para o segundo conjunto de oscilações axiais da estrutura na escala 1:30 para casos adicionais

A.6. Oscilações normais na escala 1:30 – 2

nd conjunto de
testes

Como nos casos axiais, um conjunto de condições de oscilação adicionais foi testado, conforme ilustrado pela verificação de repetibilidade na Figura A-18 para o teste com o modelo e na Figura A-19 para a estrutura isolada e resumida na Tabela A-11.

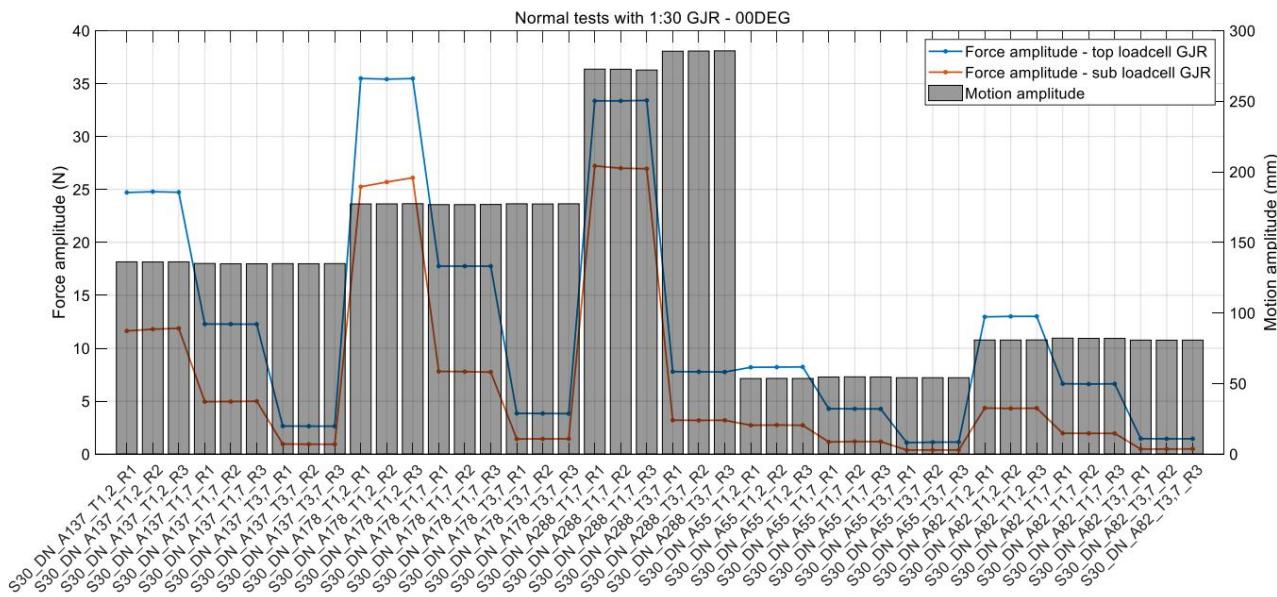


Figura A-18: Amplitudes de movimento (barras) e carga (curva azul) em cada execução - verificação de repetibilidade para o segundo conjunto de oscilações normais do GJR na escala 1:30

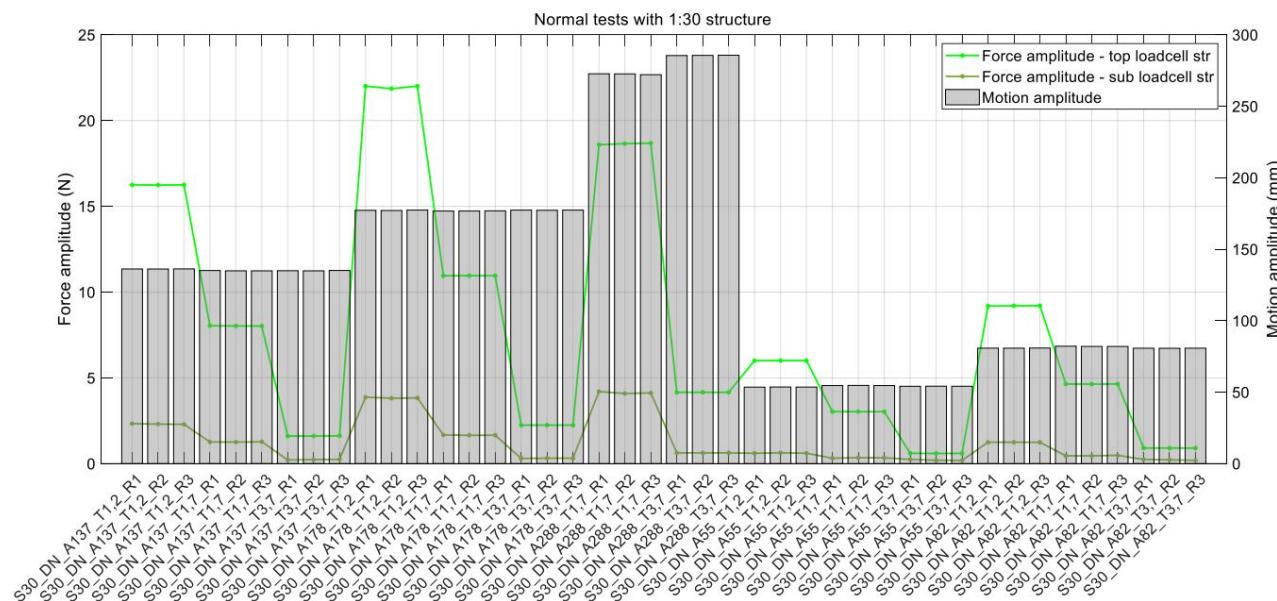


Figura A-19: Amplitudes de movimento (barras) e carga (curva azul) em cada corrida - verificação de repetibilidade para o segundo conjunto de oscilações normais da estrutura na escala 1:30

Tabela A-11: Verificação de repetibilidade para o segundo conjunto de oscilações axiais de 1:30 a 00DEG

CASO	AMPLITUDE DE MOVIMENTO					AMPLITUDE DE CARGA				
	R1 (milímetros)	R2 (milímetros)	R3 (milímetros)	SIGNIFICA (milímetros)	ERRO % RMS	R1 (N)	R2 (N)	R3 (N)	SIGNIFICA (N)	ERRO % RMS
S30_DN_00DEG_A55_T1,2	53,55	53,64	53,58	53,59	0,07%	8,20	8,22	8,23	8,22	0,17%
S30_DN_00DEG_A82_T1,2	80,82	80,79	80,89	80,84	0,05%	12,96	13,01	13,01		12,99 0,16%
S30_DN_00DEG_A137_T1,2 136,21	136,13	136,21	136,18	0,03%	24,71	24,79	24,73	24,74	0,13%	
S30_DN_00DEG_A178_T1,2 177,23	177,28	177,40	177,31	0,04%	35,49	35,41	35,47	35,46	0,09%	
S30_DN_00DEG_A288_T1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S30_DN_00DEG_A55_T1,7	54,63	54,74	54,65	54,67	0,09%	4,29	4,28	4,26	4,28	0,28%
S30_DN_00DEG_A82_T1,7	82,15	82,00	81,99	82,05	0,09%	6,65	6,62	6,64	6,63	0,18%
S30_DN_00DEG_A137_T1,7 135,05	134,84	134,84	134,91	0,07%	12,828	12,28				
S30_DN_00DEG_A178_T1,7 176,74	176,74	176,86	176,78	0,03%	17,75	17,75	17,75	17,75	0,01%	
S30_DN_00DEG_A288_T1,7 272,73	272,66	272,09	272,49	0,11%	33,37	33,36	33,41	33,38	0,06%	
S30_DN_00DEG_A55_T3,7 1,12 1,12	5,99%	5,41	5,13	5,41	0,12 0,01%	1,09			1,14	
S30_DN_00DEG_A82_T3,7	80,76	80,71	80,76	80,74	0,03%	1,46	1,44	1,45	1,45	0,46%
S30_DN_00DEG_A137_T3,7 134,94	134,86	134,97	134,92	0,03%	S30_DN_00DEG_A178_T3,7	2,65	2,64	2,64	2,64	0,23%
177,34 177,21 177,34 177,30 0,03%	S30_DN_00DEG_A288_T3,7	285,43	285,55	285,67		3,85	3,84	3,82	3,84	0,26%
285,55 0,03%						7,79	7,78	7,76	7,77	0,18%

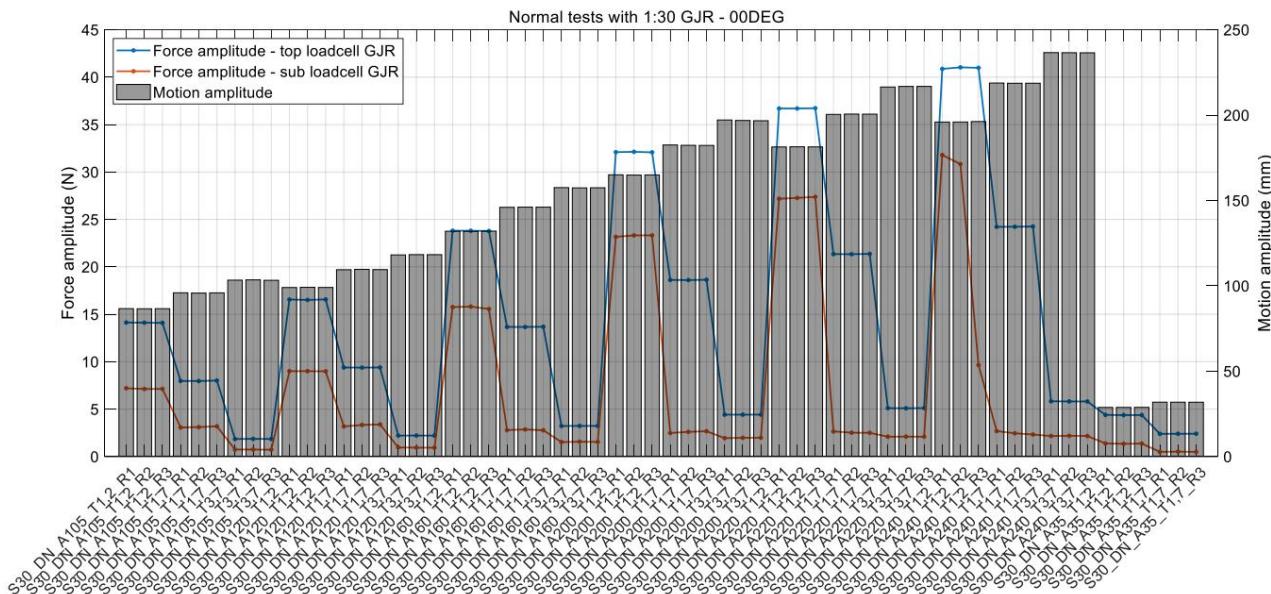


Figura A-20: Amplitudes de movimento (barras) e carga (curva azul) em cada execução - verificação de repetibilidade para o segundo conjunto de oscilações axiais do GJR na escala 1:30 para casos adicionais

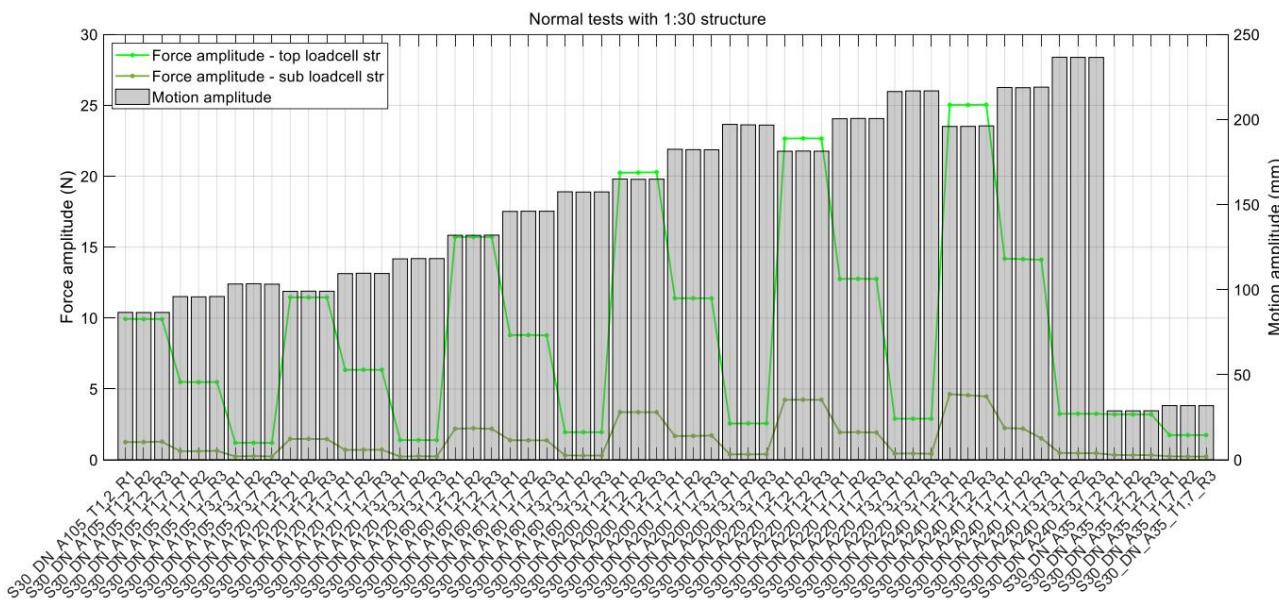


Figura A-21: Amplitudes de movimento (barras) e carga (curva azul) em cada corrida - verificação de repetibilidade para o segundo conjunto de oscilações axiais da estrutura na escala 1:30 para os casos adicionais

Tabela A-12: Verificação de repetibilidade para casos adicionais no conjunto nº 2 de oscilações normais de 1:30 em 00DEG

CASO	AMPLITUDE DE MOVIMENTO					AMPLITUDE DE CARGA				
	R1 (milímetros)	R2 (milímetros)	R3 (milímetros)	SIGNIFICA (milímetros)	ERRO % RMS	R1 (N)	R2 (N)	R3 (N)	SIGNIFICA (N)	ERRO % RMS
S30_DN_00DEG_A105_T1,2 86,65 86,57 86,61 86,61 0,04% 14,13 14,12 14,09 14,11 0,13%										
S30_DN_00DEG_A105_T1,7 95,91 95,76 95,87 95,85 0,07% S30_DN_00DEG_A105_T3,7						7,97	7,96	8,02	7,98 0,29%	
103,32 103,49 103,23 103,35 0,10% S30_DN_00DEG_A120_T1,2 99,00 99,12 99,04 99,05 0,05% 16,56 16,51 16,57 16,55 0,14%						1,85	1,86	1,85	1,86 0,28%	
S30_DN_00DEG_A120_T1,7 109,44 109,65 109,50 109,53 0,08 % S30_DN_00DEG_A120_T3,7						9,39	9,38	9,40	9,39 0,09%	
118,10 118,27 118,26 118,21 0,06% S30_DN_00DEG_A160_T1,T1,T1,T1,21 0,06 %						2,21	2,22	2,21	2,21 0,11%	
S30_DN_00DEG_A160_T1,7 145,98 146,09 146,07 146,04 0,03% 13,66 13,66 13,68 13,67 0,07%										
S30_DN_00DEG_A160_T3,7 157,51 157,36 157,43 157,43 0,04% 3,23 3,23 0,09%						3,22			3,23	
S30_DN_00DEG_A200_T1,2 165,02 164,87 164,96 164,95 0,04% 32,09 32,13 32,08 32,10 0,06%										
S30_DN_00DEG_A200_T1,7 182,50 182,28 182,22 182,34 0,07% 18,62 18,60 18,64 18,62 0,08%										
S30_DN_00DEG_A200_T3,7 197,12 196,84 196,69 196,88 0,09% S30_DN_00DEG_A220_T1,2 4,42 4,42 4,42 4,42 0,03%										
181,33 181,43 181,37 181,38 0,02% 36,70 36,70 36,72										
S30_DN_00DEG_A220_T1,7 200,40 200,59 200,55 200,51 0,04% 21,35 21,33 21,37 21,35 0,07%										
S30_DN_00DEG_A220_T3,7 216,43 216,79 216,79 216,67 0,08% S30_DN_00DEG_A240_T1,2 5,11 5,09 5,11 5,11 0,15%										
195,93 195,94 196,22 196,03 0,07% 40,87 41,03 40,98 %										
S30_DN_00DEG_A240_T1,7 218,78 218,65 218,66 218,70 0,03% 24,22 24,23 24,25 24,23 0,06%										
S30_DN_00DEG_A240_T3,7 236,59 236,53 236,48 236,54 0,02% 5,81 5,82 0,13% 5,83 5,81										