RODRIGO MOTA AMARANTE

ESTUDO DA ESTÁTICA E DINÂMICA DE LINHAS, SOB CONFIGURAÇÃO DE CATENÁRIA, ATRAVÉS DA IDENTIFICAÇÃO GEOMÉTRICA, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE IMAGENS DIGITAIS

RODRIGO MOTA AMARANTE

ESTUDO DA ESTÁTICA E DINÂMICA DE LINHAS, SOB CONFIGURAÇÃO DE CATENÁRIA, ATRAVÉS DA IDENTIFICAÇÃO GEOMÉTRICA, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE IMAGENS DIGITAIS

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de

Mestre em Engenharia

Área de concentração:

Engenharia Naval e Oceânica

Orientador: Prof. Dr.

André Luis Condino Fujarra

São Paulo

FICHA CATALOGRÁFICA

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.
São Paulo, 10 de Maio de 2010.
Assinatura do autor
Assinatura do orientador

Amarante, Rodrigo Mota

Estudo da estática e dinâmica de linhas, sob configuração de

"catenária", através da identificação geométrica, processamento e análise de imagens digitais / R.M. Amarante. -- ed.rev. -- São Paulo, 2010.

p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

1. Dinâmica das estruturas 2. Tubos flexíveis 3. Imagem digital I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II. t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e minhas filhas.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. **André Luis Condino Fujarra**, pela orientação e pelo constante estímulo transmitido durante todo o trabalho. Pelo seu empenho profissional e amizade, pelas discussões e pela calma e serenidade ao longo desta jornada.

Ao Prof. Dr. **Kazuo Nishimoto**, coordenador do Tanque de Provas Numérico, cujo apoio foi fundamental na fase final deste trabalho.

Ao Prof. Dr. **Marcos Mendes de Oliveira Pinto**, pelo material sobre compressão dinâmica que gentilmente me cedeu, por seu apoio e sua preocupação com minha vida pessoal, profissional e acadêmica.

Ao Prof. Dr. **Flavius Portella Ribas Martins** pela proveitosa conversa nos momentos finais que antecederam a Qualificação deste texto e nortearam boa parte deste trabalho com relação à calibração de câmeras.

Às minhas filhas **Beatriz Chagas Amarante** e **Carolina Chagas Amarante** pelos lúdicos momentos de alegria e descontração. O papai as ama incondicionalmente.

À **Natalia Portela Gemignani** pelo apoio e carinho irrestritos. A pessoa que me deu força e motivação nos momentos mais importantes. Não importa o tempo, não importa a distância, não importa o que a vida fizer das nossas vidas. Nunca me esquecerei de você. A minha estrada corre pro seu mar...

À amiga Engenheira Naval **Mariana Simionato Robortella** por todos os anos de dedicação, conversas e suporte. Meu sincero agradecimento por tudo.

Aos amigos Engenheiros Navais **Edgard Borges Malta** e **Felipe Rateiro Pereira**, companheiros de luta em busca do mesmo sonho.

Ao amigo **Rafael de Andrade Watai** pelo apoio, discussões e ajuda nos últimos ensaios. E pelos momentos em que me retirava dos meus devaneios para espairecer.

Ao amigo **Pedro Daniel Myaki Bueno da Silva** pela inestimável ajuda durante os últimos ensaios.

Ao amigo Guilherme Feitosa Rosetti pelas produtivas discussões.

Aos amigos do Centro de Estudos em Gestão Naval, o CEGN.

Aos funcionários da secretaria do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica por sua imensa dedicação ao trabalho de auxílio aos alunos do curso.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) pelo apoio aos ensaios realizados para produção deste texto. Em especial ao Engenheiro Naval **Hélio Correa da Silva Júnior**, ao estagiário **Felipe de Arruda Campos Simões** e a todos os técnicos que colaboraram comigo.

A todos aqueles que colaboraram, direta ou indiretamente, durante todas as etapas deste trabalho, com as minhas sinceras desculpas pela deselegância em não citálos nominalmente.

À **CAPES** pela bolsa de estudos que foi de fundamental importância para mim no desenvolvimento e confecção da presente dissertação.

EPÍGRAFE

It makes all the difference whether one sees darkness through the light or brightness through the shadows.

(David Lindsay)

RESUMO

A auto-suficiência adquirida pelo Brasil em termos de produção de petróleo representou uma conquista inédita e de extrema importância para o país. As pesquisas e desenvolvimento técnico-científico associados a esse fato impulsionaram a produção oceânica de petróleo e gás para lâminas d'água cada vez maiores, fazendo com que os sistemas oceânicos fossem obrigados a evoluir concomitantemente.

Intrinsecamente, os problemas associados aos sistemas de prospecção se tornaram mais desafiadores. Os cabos e tubos submersos normalmente lançados sob configuração de catenária direta e utilizados para essa tarefa possuem importância fundamental para a Engenharia Oceânica e seu estudo é parte da motivação para esta dissertação.

Adicionalmente, os avanços computacionais das últimas décadas permitiram que outras áreas do conhecimento experimentassem um desenvolvimento sem precedentes na história da ciência. Dentre elas, destaca-se o Processamento Digital de Imagens.

O presente trabalho busca estudar a estática e a dinâmica de linhas sob configuração de catenária, através da identificação geométrica, processamento e análise de imagens digitais, promovendo um ponto de convergência entre a Engenharia Oceânica e o Processamento Digital de Imagens. A fim de caminha nesse sentido, diversos experimentos e simulações foram concebidos e realizados e estão descritos ao longo do presente texto.

A metodologia utilizada consiste em extrair informações de um sistema físico, a partir da análise de imagens e vídeos. O principal intuito é a investigação da estática e dinâmica locais de uma linha flexível, na região próxima ao solo, conhecida como TDZ. Em particular, foi possível observar, em um dos experimentos, a ocorrência do fenômeno de compressão dinâmica que foi, então, brevemente discutido.

Os resultados obtidos experimentalmente foram confrontados com um sistema comercial de captura de movimentos e com resultados advindos da revisão

bibliográfica ou de simulações numéricas, mostrando adequação frente às confrontações realizadas e apresentando o mesmo nível de precisão que o sistema comercial utilizado.

Como conseqüência, a metodologia proposta e empregada para as investigações físicas ao longo desta dissertação parece sugerir a extrapolação de seus resultados na concepção de formas pouco invasivas de ensaios físicos e para a análise e desenvolvimento de sistemas oceânicos.

ABSTRACT

The self-sufficiency acquired by Brazil in terms of oil production represents an unprecedented achievement and it was extremely important for the country. The scientific researches and technical development associated with that fact push the oceanic production of oil and gas to increasing depths, obligating ocean systems to evolve concurrently.

As a result, the problems associated with exploration systems have become more challenging. The submerged cables and pipes commonly launched in catenary configuration are crucial for the Offshore Engineering and its study is part of the motivation for this dissertation.

In addition, computational advances in the last decades have allowed other areas of knowledge experienced an unprecedented development in the history of science. Among them, one can highlight the Digital Image Processing.

This work was concerned with studies about static and dynamic lines in catenary configuration, in a convergence between Offshore Engineering and Digital Image Processing. In order to move towards this direction, several experiments and simulations have been designed and performed and are described throughout this text.

The proposed methodology consisted in extract information from a physical system, through processing and analysis of images and/or videos. The main focus was the investigation of local static and dynamic behavior of a flexible line, in the touchdown zone. In particular, it was observed, in one of the experiments, the occurrence of dynamic compression in the line, and this subject was then briefly discussed.

The experimental results were compared with a commercial motion capture system and results stemming from the literature or numerical simulations, indicating a fairly good agreement and providing the same level of accuracy with the employed commercial system.

As a result, the proposed and used methodology for physical investigations along this work seems to suggest the extrapolation of their results to develop less invasive forms of physical tests and promoting the development of marine systems.

SUMÁRIO

DE	EDIC	ATĆ	DRIA	
AC	3RAI	DEC	IMENTOS	I
EF	PÍGR	AFE	<u> </u>	IV
RE	ESUI	MO		V
ΑE	BSTF	RAC	Г	. VI
Sl	JMÁ	RIO.		IX
LI	STA	DE I	FIGURAS	VII
			TABELAS	
LI			SÍMBOLOS	
1	IN		DUÇÃO	
	1.1		DTIVAÇÃO	
	1.2		BJETIVOS	
	1.3		NTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO	
	1.4		RGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	
2	Fl		AMENTAÇÃO TEÓRICA	
	2.1		NCEITOS BÁSICOS SOBRE IMAGENS DIGITAIS	
	2.2		COCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS	
		2.1	Aquisição e digitalização de imagens	
		2.2	Histograma de níveis de cinza de uma imagem	
		2.3	Limiarização e segmentação de imagens	
		2.4	Morfologia matemática sobre imagens	
		2.5	Operações de dilatação e erosão	
		2.6	Operações restritas a uma janela	
	2.3		LIBRAÇÃO DE CÂMERAS	
		3.1	Sistemas de coordenadas envolvidos	
		3.2	Métodos de calibração de câmeras	
	2.4		MÉTODO DLT	
		4.1	Calibração usando o método DLT	
		4.2	Reconstrução tridimensional usando o método DLT	
		4.3	Relação entre os parâmetros DLT e os parâmetros das câmeras	
	2.5		CATENÁRIA	
	2.	5.1	Equilíbrio estático de uma corda flexível suspensa entre dois pontos.	51

2.5.2	Formulação da catenária	53
2.6 ES	STÁTICA DE LINHAS EM CATENÁRIA	56
2.6.1	Equilíbrios de forças sobre um elemento de linha	63
2.6.2	Equilíbrio de momentos sobre um elemento de linha	64
2.6.3	Equações constitutivas	64
2.6.4	Simplificações do modelo	66
2.7 DII	NÂMICA DE LINHAS EM CATENÁRIA	75
3 MATE	RIAIS E MÉTODOS	79
3.1 MA	ATERIAIS	79
3.1.1	Sistema comercial de câmeras	80
3.1.2	Sistema de câmeras convencionais	85
3.1.3	Linha flexível utilizada nos experimentos	90
3.1.4	Dispositivo atuador	92
3.2 MÉ	ÉTODOS	93
4 ENSA	IOS PRELIMINARES	97
4.1 EX	PERIMENTO 1: PÊNDULO SIMPLES LINEARIZADO	97
4.1.1	Aparato utilizado nos Experimentos 1 e 2	98
4.1.2	Abordagem analítica: modelo físico para o pêndulo simples	100
4.1.3	Resultados do sistema comercial de câmeras	104
4.1.4	Resultados obtidos a partir do procedimento proposto	105
4.1.5	Comparação dos resultados obtidos no Experimento 1	107
4.1.6	Discussões acerca do Experimento 1	112
4.2 EX	(PERIMENTO 2: PÊNDULO SIMPLES NÃO-LINEARIZADO	113
4.2.1	Resultados da simulação computacional	113
4.2.2	Resultados do sistema comercial de câmeras	116
4.2.3	Resultados obtidos a partir do procedimento proposto	118
4.2.4	Comparação dos resultados obtidos no Experimento 2	119
4.2.5	Discussões acerca do Experimento 2	125
4.3 EX	(PERIMENTO 3: AFERIÇÃO DO DISPOSITIVO ATUADOR	126
4.3.1	Aparato utilizado no Experimento 3	127
4.3.2	Resultados obtidos no Experimento 3A	128
4.3.3	Resultados obtidos no Experimento 3B	130
4.3.4	Resultados obtidos no Experimento 3C	133
4.3.5	Discussões acerca dos Experimentos 3A, 3B e 3C	135
4.4 EX	(PERIMENTO 4: ESTÁTICA DE UMA LINHA FLEXÍVEL	136
4.4.1	Aparato utilizado no Experimento 4	137
4.4.2	Resultados obtidos no Experimento 4	140

		4.4	.3	Discussões acerca do Experimento 4	.144
	4.	5	EXF	PERIMENTO 5: DINÂMICA DE UMA LINHA FLEXÍVEL	.145
		4.5	.1	Resultados obtidos no Experimento 5	.148
		4.5	.2	Discussões acerca do Experimento 5	.157
	4.	6	DIS	CUSSÕES ACERCA DOS EXPERIMENTOS PRELIMINARES	.158
5		ΕN	SAIC	OS COM A LINHA FLEXÍVEL	.161
	5.	.1	ОА	PARATO UTILIZADO NO EXPERIMENTO COM LINHA FLEXÍVEL	.161
	5.	2	PRE	EPARAÇÃO DO ENSAIO E CALIBRAÇÃO DAS CÂMERAS	.163
	5.	3	RES	SULTADOS OBTIDOS NO EXPERIMENTO COM LINHA FLEXÍVEL.	.167
		5.3	.1	Comparação dos resultados obtidos para o alvo 1	.169
		5.3	.2	Comparação dos resultados obtidos para o alvo 4	.172
		5.3	.3	Comparação dos resultados obtidos para o alvo 7	.174
		5.3	.4	As geometrias assumidas pela linha	.177
	5.	4	DIS	CUSSÕES ACERCA DO EXPERIMENTO COM A LINHA FLEXÍVEL	.180
		5.4	.1	Os movimentos próximos ao TDP da linha	.182
6		CC	NCL	.USÕES	.191
7		PΕ	RSP	ECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS	.194
R	ΕF	FER	ÊNC	CIAS	.195
Α	NE	EXC	A: N	Manual do Anflex	.200
Δ	NF	EXC	B· F	- Estatísticas do Experimento Final	204

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Ilustração simplificada de um sistema de <i>risers</i> e amarras em uma plataforma oceânica do tipo semi-submersível	. 4
Figura 2.1: Atividades típicas do processamento digital de imagens	
Figura 2.2: Sensores utilizados em câmeras digitais	
Figura 2.3: Imagem em escala de cinza e seu respectivo histograma	
Figura 2.4: Padrões encontrados em histogramas de imagens	
Figura 2.5: Inspeção visual de histogramas de imagens	
Figura 2.6: Exemplo de limiarização automática (Método de Otsu)	
Figura 2.7: Etapas do processo de limiarização automática – Método das médias	20
Figura 2.8: Binarização de uma imagem, com limiar calculado automaticamente – Método das médias	20
Figura 2.9: Binarização de uma imagem, com limiar calculado automaticamente – Método de Otsu.	21
Figura 2.10: Principais operações morfológicas sobre imagens	23
Figura 2.11: Dilatação e erosão com elemento estruturante aplicadas sobre uma imagem	24
Figura 2.12: Tipos de vizinhança de pixels	26
Figura 2.13: Aplicação do filtro mediana sobre uma imagem binária	27
Figura 2.14: Representação dos quatro sistemas de coordenadas envolvidos na calibração de câmeras.	29
Figura 2.15: Distorções radial (dr) e tangencial (dt), causada pelas imperfeições das lentes	31
Figura 2.16: Efeitos da distorção radial sobre uma imagem	33
Figura 2.17: Sistemas de coordenadas real e da imagem	39
Figura 2.18: Relação entre as coordenadas dos pontos N e O	39
Figura 2.19: Sistema tridimensional de coordenadas da imagem	40
Figura 2.20: Configurações de <i>risers</i> : (a) vertical; (b) catenária livre; (c) catenária complexa.	51
Figura 2.21: Configuração de catenária de uma linha	
Figura 2.22: Diagrama de corpo livre em uma linha em catenária	
Figura 2.23: Trechos de uma linha em catenária	57
Figura 2.24: Esforços atuantes sobre uma linha submersa	58

Figura 2.25: Esforços atuantes sobre um elemento de linha de comprimento infinitesimal
Figura 2.26: Modificação nos esforços atuantes sobre o elemento de linha para consideração do empuxo atuante e definição de tração efetiva 59
Figura 2.27: Resultantes dos esforços aplicados sobre um elemento de linha
Figura 2.28: Esforços atuantes sobre um elemento de linha deformado 62
Figura 2.29: Fluxograma de procedimento iterativo para determinação da equação que rege a estática de uma linha em catenária
Figura 3.1: Câmera do sistema comercial81
Figura 3.2: Esquema ilustrativo de montagem do sistema comercial 81
Figura 3.3: Calibração do volume de controle a partir das estruturas de calibração do sistema comercial de câmeras
Figura 3.4: Calibração do sistema comercial de câmeras 84
Figura 3.5: Alvos do sistema comercial de câmeras 84
Figura 3.6: Câmera do sistema convencional 86
Figura 3.7: Corpos de referência utilizados na calibração das câmeras convencionais
Figura 3.8: Exemplo de identificação dos pontos de controle presentes em uma estrutura de calibração, através de técnicas de processamento de imagem
Figura 3.9: Definição do volume de controle calibrado, a partir da movimentação da estrutura de calibração89
Figura 3.10: Equipamento para imposição de movimentos ao topo da linha92
Figura 3.11: Detalhe do rolamento fixado à placa móvel do dispositivo atuador para ensaios com a linha flexível
Figura 3.12: Descrição ilustrativa dos procedimentos utilizados para confrontação dos resultados obtidos nos experimentos físicos realizados 94
Figura 3.13: Fluxograma das etapas de processamento das imagens obtidas nos ensaios
Figura 4.1: Ilustração do pêndulo simples e o modelo físico utilizado para os Experimentos 1 e 2
Figura 4.2: Disposição dos sistemas de câmeras para o monitoramentos dos Experimento 1 e 2
Figura 4.3: Posicionamentos do corpo de referência para calibração das câmeras convencionais utilizada nos Experimentos 1 e 2
Figura 4.4: Resultado do processo de mitigação dos efeitos da distorção radial sobre uma imagem obtida por uma das câmeras digitais convencionais
Figura 4.5: Pêndulo simples utilizado nos Experimentos 1 e 2

Figura 4.6: Séries temporais e espectros de potência do pêndulo ensaiado no Experimento 1 – sistema comercial de câmeras
Figura 4.7: Séries temporais e espectros de potência do pêndulo ensaiado no Experimento 1 – sistema de câmeras convencionais
Figura 4.8: Séries temporais dos deslocamentos em x, y e z do pêndulo do Experimento 1 e os respectivos espectros de potência para as três abordagens utilizadas
Figura 4.9: Comparação gráfica das amplitudes na direção x para as três abordagens utilizadas
Figura 4.10: Diagrama de blocos para o pêndulo do Experimento 2 114
Figura 4.11: Séries temporais e espectros de potência do pêndulo ensaiado no Experimento 2 – abordagem analítica (simulação numérica). 115
Figura 4.12: Séries temporais e espectros de potência do pêndulo ensaiado no Experimento 2 – sistema comercial de câmeras
Figura 4.13: Séries temporais e espectros de potência do pêndulo ensaiado no Experimento 2 – sistema de câmeras convencionais
Figura 4.14: Séries temporais e espectros de potência em x, y e z do pêndulo do Experimento 2
Figura 4.15: Comparação gráfica dos deslocamentos verticais percebidos pelo pêndulo do Experimento 2, para cada uma das abordagens consideradas
Figura 4.16: Comparação gráfica dos deslocamentos verticais percebidos pelo pêndulo do Experimento 2, para cada uma das abordagens consideradas
Figura 4.17: Arranjo experimental para os ensaios de aferição do dispositivo atuador
Figura 4.18: Resultados obtidos no experimento 3A – sistema comercial de câmeras
Figura 4.19: Visualização do movimento detectado no plano xz pelo sistema comercial de câmeras no Experimento 3A
Figura 4.20: Resultados obtidos no experimento 3B – sistema comercial de câmeras
Figura 4.21: Trajetória do movimento detectado no plano xz pelo sistema comercial de câmeras no Experimento 3B
Figura 4.22: Resultados obtidos no experimento 3C – sistema comercial de câmeras
Figura 4.23: Trajetória do movimento detectado no plano xz pelo sistema comercial de câmeras no Experimento 3C
Figura 4.24: Linha flexível utilizada no Experimento 4, monitorada pelo conjunto de câmeras convencionais
Figura 4.25: Detalhe da fixação da linha flexível ao dispositivo atuador através de um rolamento que permite a rotação da mesma no plano vertical que a contém.

Figura 4.26: Estrutura utilizada para calibração das câmeras convencionais no Experimento 4, disposta em duas posições distintas, separadas por 40mm paralelamente ao eixo y e os respectivos pontos de controle reconhecidos
Figura 4.27: Esquema ilustrativo, sem escala, do arranjo experimental utilizado para os ensaios estáticos e dinâmicos da linha flexível
Figura 4.28: Imagens originais e reconhecimento, por processamento digital, dos alvos dispostos sobre a linha do Experimento 4, para ambas as câmeras convencionais utilizadas
Figura 4.29: Identificação das posições dos alvos posicionados sobre a linha flexível, lançada em catenária direta do Experimento 4 – plano xz 141
Figura 4.30: Identificação das posições dos alvos posicionados sobre a linha flexível, lançada em catenária direta do Experimento 4 – plano yz 142
Figura 4.31: Aproximação gráfica por catenária dos alvos reconhecidos pelos sistemas de câmeras
Figura 4.32: Exemplo de sequência de <i>frames</i> , obtidos a partir das câmeras convencionais, com o respectivo reconhecimento de alvos pelo procedimento proposto
Figura 4.33: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 1 da linha utilizada no Experimento 5
Figura 4.34: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 1 da linha utilizada no Experimento 5, com modificação das escalas
Figura 4.35: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 5 da linha utilizada no Experimento 5
Figura 4.36: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 8 da linha utilizada no Experimento 5
Figura 4.37: Geometria adquirida pela linha ensaiada, ao longo do tempo, a partir da percepção dos sistemas de câmeras utilizados no monitoramento do Experimento 5
Figura 5.1: Arranjo do aparato junto ao solo para a execução do experimento final com linha flexível
Figura 5.2: Preparação da estrutura de calibração utilizada nos ensaios finais
Figura 5.3: Resultados da calibração das câmeras do sistema comercial para o experimento final
Figura 5.4: Identificação dos pontos de controle utilizados para a calibração das câmeras convencionais pelo Método DLT
Figura 5.5: Os seis graus de liberdade de uma embarcação
Figura 5.6: Configuração geométrica inicial da linha, resultante da simulação numérica realizada com auxílio do Anflex
Figura 5.7: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 1 da linha utilizada – Experimento final, primeira repetição

direções x, y e z do alvo 1 da linha utilizada – Experimento final, segunda repetição
Figura 5.9: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 1 da linha utilizada – Experimento final, terceira repetição
Figura 5.10: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 4 da linha utilizada – Experimento final, primeira repetição
Figura 5.11: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 4 da linha utilizada – Experimento final, segunda repetição
Figura 5.12: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 4 da linha utilizada – Experimento final, terceira repetição
Figura 5.13: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 7 da linha utilizada – Experimento final, primeira repetição
Figura 5.14: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 7 da linha utilizada – Experimento final, segunda repetição
Figura 5.15: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 7 da linha utilizada – Experimento final, primeira repetição
Figura 5.16: Geometria adquirida pela linha ensaiada, ao longo do tempo, a partir da percepção dos sistemas de câmeras utilizados no monitoramento do experimento final, primeira repetição
Figura 5.17: Geometria adquirida pela linha ensaiada, ao longo do tempo, a partir da percepção dos sistemas de câmeras utilizados no monitoramento do experimento final, segunda repetição
Figura 5.18: Geometria adquirida pela linha ensaiada, ao longo do tempo, a partir da percepção dos sistemas de câmeras utilizados no monitoramento do experimento final, terceira repetição
Figura 5.19: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 1 da linha utilizada no Experimento 5, com modificação das escalas
Figura 5.20: Cascata de harmônicos no espectro de potência das tensões em uma linha flexível, sujeita a compressão dinâmica
Figura 5.21: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 1 da linha utilizada, com modificação das escalas – Experimento final, terceira repetição
Figura 5.22: Propagação de ondas de compressão em direção ao topo de uma linha sujeita ao fenômeno de compressão dinâmica
Figura 5.23: Série temporal da tração total no TDP, normalizada pela tração estática

Figura 5.24: Evolução temporal da tração no TDP e carga crítica calculada	3
– Experimento 5	. 189
Figura 5.25: Evolução temporal da tração no TDP e carga crítica calculada – Experimento final	

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Especificações técnicas das câmeras do sistema comercial 82
Tabela 3.2: Especificações técnicas das câmeras do sistema convencional
Tabela 3.3: Características físicas da linha flexível utilizada nos experimentos
Tabela 4.1: Características físicas do pêndulo do Experimento 1
Tabela 4.2: Máximas amplitudes teóricas do pêndulo do Experimento 1 103
Tabela 4.3: Análise temporal do Experimento 1 – sistema comercial de câmeras
Tabela 4.4: Análise temporal do Experimento 1 – conjunto de câmeras convencionais
Tabela 4.5: Comparação dos períodos de oscilação do pêndulo na direção x, para as três abordagens utilizadas – Experimento 1
Tabela 4.6: Amplitude do pêndulo na direção x – Experimento 1 111
Tabela 4.7: Análise temporal do Experimento 2 – simulação computacional
Tabela 4.8: Análise temporal do Experimento 2 – sistema comercial de câmeras
Tabela 4.9: Análise temporal do Experimento 2 – conjunto de câmeras convencionais
Tabela 4.10: Períodos de oscilação do pêndulo na direção x – Experimento 2
Tabela 4.11: Amplitude do pêndulo na direção x – Experimento 2 122
Tabela 4.12: Períodos de oscilação do pêndulo na direção z – Experimento 2
Tabela 4.13: Amplitude do pêndulo na direção z – Experimento 2

Tabela 4.14: Características dos movimentos impostos ao dispositivo atuador para fins de aferição do mesmo com a utilização do sistema comercial de câmeras
Tabela 4.15: Amplitudes e frequências percebidas pelo sistema comercial de câmeras, a partir do movimento prescrito pelo dispositivo atuador no Experimento 3A
Tabela 4.16: Amplitudes e frequências percebidas pelo sistema comercial de câmeras, a partir do movimento prescrito pelo dispositivo atuador no Experimento 3B
Tabela 4.17: Amplitudes e frequências percebidas pelo sistema comercial de câmeras, a partir do movimento prescrito pelo dispositivo atuador no Experimento 3A
Tabela 4.18: Valores dos parâmetros livres da linha flexível lançada em catenária no Experimento 4
Tabela 4.19: Matriz de ensaios do Experimento 5, efetuado com a linha flexível
Tabela 4.20: Dez primeiros modos de vibrar da linha flexível, calculados a partir da técnica WKB
Tabela 5.1: Características geométricas da linha lançada em catenária direta
Tabela 5.2: Características geométricas da linha lançada em catenária direta, provenientes da análise estática via Anflex
Tabela B.1: Análise temporal do Alvo 1 – Experimento Final – 1 ^a Repetição
Tabela B.2: Análise temporal do Alvo 1 – Experimento Final – 2ª Repetição Erro! Indicador não definido.
Tabela B.3: Análise temporal do Alvo 1 – Experimento Final – 3ª Repetição Erro! Indicador não definido.
Tabela B.4: Análise temporal do Alvo 4 – Experimento Final – 1 ^a Repetição Erro! Indicador não definido.
Tabela B.5: Análise temporal do Alvo 4 – Experimento Final – 2ª Repetição Erro! Indicador não definido.
Tabela B.6: Análise temporal do Alvo 4 – Experimento Final – 3 ^a Repetição. Erro! Indicador não definido.

		•				 Experimento Final – 1^a Erro! Indicador não definido.
Tabela B.8:	Análise	temporal	do	Alvo	7	 Experimento Final – 2^a Erro! Indicador não definido.
		•				 Experimento Final – 3^a Erro! Indicador não definido.

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto romano

[R]	Matriz de rotação							
[T]	Matriz de translação							
а	Parâmetro livre da catenária. Corresponde fisicamente à curvatura da linha no TDP							
Α	Representação matricial de uma imagem digital bidimensional							
В	Na seção 2.2.3 representa uma imagem binária, na seção 2.2.6 se refere a um elemento estruturante utilizado como "máscara"							
b	Número total de bits de uma imagem							
С	Parâmetro livre da catenária. Corresponde à fase da função hiperbólica da equação da catenária							
\mathbf{C}_{D}	Coeficiente de arrasto							
См	Coeficiente de inércia							
D	Diâmetro externo da linha							
ds	Comprimento infinitesimal de um elemento de linha							
$d\overline{s}$	Comprimento de um elemento de linha deformado							
EA	Rigidez axial da linha							
EI	Rigidez flexional da linha							
f	Distância focal							
F ou F(s)	Tração total sobre a linha, resultado das trações estática e dinâmica							
f(u, v)	Intensidade ou nível de cinza no ponto (u, v) de uma imagem							
f _{cx}	Decomposição da força hidrodinâmica na direção x, por unidade de							

	comprimento LC							
f _{cz}	Decomposição da força hidrodinâmica na direção z, por unidade de comprimento LC							
\mathbf{F}_{D}	Parcela de origem viscosa da resposta da linha a uma excitação							
F _H	Força de origem hidrodinâmica atuante sobre a linha							
Fı	Parcela inercial da resposta da linha a uma excitação							
Fs	Parcela de restauração da resposta da linha a uma excitação							
g	Intensidade do campo gravitacional terrestre							
Н	Lâmina d'água ou altura do topo da linha no ar							
k	Parâmetro livre da catenária. Corresponde à elevação da catenária no ponto de abscissa nula							
$\mathbf{k}_{\mathbf{i}}$	Coeficientes de distorção radial							
L	No Processamento Digital de Imagens corresponde à quantidade de níveis de cinza de uma imagem ou histograma; no estudo de linhas representa o comprimento total da linha							
I	Comprimento do pêndulo							
Ľ	Comprimento do trecho da linha que repousa sobre o solo							
L ₁ ,, L ₁₁	Parâmetros de calibração do Método DLT							
L _c	Comprimento suspenso da linha							
M	Na seção 4.1.1 refere-se à massa do pêndulo, nas demais representa o momento-fletor							
m	massa							
m _a	massa adicional							

Campo de pressões hidrostáticas atuantes sobre um elemento de

 \mathbf{P}_{cr}

 \textbf{P}_{ext}

 $\mathbf{p}_{\mathbf{i}}$

linha

Carga crítica de compressão

Coeficientes de distorção tangencial

R(s, t) Resultante das forças externas atuantes sobre uma linha

r₁, r₂,...,r₉ Elementos da matriz de rotação

s ou s(x) Coordenada curvilínea na direção tangente à linha

S(s) Área da seção transversal de um elemento de linha em s = s(x)

 \mathbf{s}_{x} , \mathbf{s}_{y} Densidade linear de *pixels* nas direções X e Y, respectivamente

T No Processamento Digital de Imagem se refere ao nível de cinza utilizado na limiarização, na seção no estudo de linhas, corresponde à tração estática da linha na direção tangente a ela, cuja notação mais adequada é T(s), na seção 4.1.1 corresponde ao período de oscilação do pêndulo

T₀ ou T(0) Tração da linha no TDP

Tef Tração efetiva

 T_x , T_y , T_z Elementos da matriz de translação

 Deslocamento da linha, frente a uma perturbação, com relação à sua posição estática

u, v Coordenadas de um ponto qualquer no sistema de coordenadas da imagem (em pixels)

V_c Velocidade do escoamento incidente sobre a linha

X, Y Coordenadas de um ponto qualquer no sistema de coordenadas da imagem

x, y, z Coordenadas de um ponto qualquer no sistema de coordenadas do objeto (real)

 $\mathbf{x_c}, \mathbf{y_c}, \mathbf{z_c}$ Coordenadas de um ponto qualquer no sistema de coordenadas da câmera

X_{und}, Y_{und} Coordenadas de um ponto qualquer no sistema de coordenadas da imagem, após correção das distorções radial e tangencial

Alfabeto grego

- Na seção 4.1.1 representa o deslocamento angular de oscilação do pêndulo, no item 5.4.1.1 corresponde a um dos parâmetros da equação para a carga crítica
- α, β, γNa seção 2.4 referem-se aos ângulos de rotação em torno dos eixos,x, y e z, respectivamente
 - β Parâmetro adimensional que relaciona a rigidez axial de uma linha e os esforços axiais nela atuantes
 - β_{cr} Parâmetro auxiliar da equação para determinação da carga crítica
 - γ Peso específico da linha na água
 - ε Deformação percentual sofrida por um elemento de linha sob tração
 - γ Peso específico da linha na água
 - ya Peso específico do meio que circunda a linha
- θ ou θ(s) Ângulo entre as direções paralelas ao peso da linha e sua tração no TDP
 - **λ** Comprimento flexural
 - μ Densidade linear da linha no ar
 - No Processamento Digital de Imagens refere-se à tangente do ângulo que as colunas de pixels forma com a direção perpendicular às linhas; no estudo de linhas corresponde à tração dinâmica atuante sobre a linha, onde a nomenclatura mais correta seria $\tau(s)$
- χ ou χ (s) Curvatura da linha em um dado ponto
 - **ω** Velocidade angular

Capítulo 1 Introdução

1 INTRODUÇÃO

O estudo da estática e da dinâmica de linhas possui grande relevância prática para o segmento oceânico. Linhas de ancoragem, de amarração e *risers*¹ são exemplos de estruturas que estaticamente podem apresentar configuração de catenária² e são imprescindíveis, direta ou indiretamente, na prospecção de gás e petróleo em águas profundas e ultra-profundas. Nesse setor, o Brasil aparece como líder mundial em tecnologia.

Sistemas flutuantes, como plataformas semi-submersíveis e FPSOs³, possuem sistemas de ancoragem e amarração sujeitos a diversos esforços ambientais, como correnteza e a ação de ondas. *Risers* acoplados a uma unidade flutuante também são submetidos a esses mesmos esforços e por sua destacada importância para o setor de produção oceânica de petróleo e gás vêm sendo objeto de diversos estudos.

A resposta dinâmica de *risers* frente a uma excitação externa impacta diretamente no seu custo de produção, dado que os esforços a que são submetidos podem levar a falhas estruturais por fadiga, por exemplo. Dependendo das condições ambientais a que são expostos, diversos fenômenos são passíveis de serem observados e, portanto, merecem investigações aprofundadas. Um desses fenômenos é a compressão dinâmica em *risers* que pode ocorrer em linhas quase-verticais, sujeitas à flambagem sob excitação em seu topo, culminando no aparecimento de ondas de compressão que se propagam em direção ao topo da linha, a partir do TDZ⁴.

Fonte de motivação para este trabalho, a estática e dinâmica de linhas sob configuração inicial de catenária serão estudados a partir de uma abordagem

¹ Risers são dutos especializados na prospecção de óleo e gás natural.

² Nome dado à geometria da curva assumida por um cabo flexível e de densidade uniforme, suspenso entre dois pontos, sujeito somente ao seu peso próprio. Do latim *catena* que significa corrente.

³ FPSO é a sigla para *Floating, Production, Storage and Offloading vessel.* É utilizado para exploração e armazenamento de gás e/ou óleo, escoando sua produção posteriormente para navios aliviadores.

⁴ TDZ é a sigla para *touchdown zone*, que é a região do leito marinho em que a linha experimenta deslocamentos verticais capazes de fazê-la perder o contato físico com o solo momentaneamente.

diferenciada: a utilização de técnicas de processamento de imagens digitais e calibração de câmeras.

Desta maneira, configuram-se como áreas de conhecimento envolvidas neste trabalho a Engenharia Oceânica, particularmente o estudo de linhas, e o Processamento Digital de Imagens e Calibração de Câmeras.

O presente capítulo está estruturado de maneira a apresentar, após essa breve introdução, as motivações para o presente trabalho. A seguir são descritos, de maneira sucinta, os objetivos desta dissertação e, posteriormente, as contribuições do texto ao estado da arte das áreas de conhecimento citadas. A última seção deste capítulo aborda a maneira como foi estruturada a organização desta dissertação.

1.1 MOTIVAÇÃO

Uma das áreas de interesse e de forte atuação do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) é a Mecânica de Sistemas Oceânicos, onde o estudo de linhas é, sem dúvida, um dos mais importantes. Essas estruturas têm aplicação fundamental, por exemplo, nas amarrações de sistemas flutuantes e nos *risers*.

É evidente, portanto, a importância dos estudos das estruturas de amarração de unidades flutuantes, bem como daquelas relacionadas à prospecção de petróleo e gás, entre outras. Especificamente com relação à compressão dinâmica, o interesse repousa principalmente sobre o estudo dos *risers*, inclusive os SCR⁵, e cabos umbilicais. A Figura 1.1 mostra, de maneira ilustrativa, uma plataforma semisubmersível com seu sistema de amarras e um conjunto de *risers* a ela acomplado.

⁵ SCR é a sigla em inglês para *steel catenary riser* que se configuram como os *riser*s rígidos lançados sob configuração de catenária.

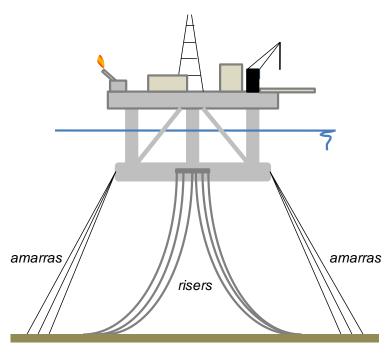


Figura 1.1: Ilustração simplificada de um sistema de *risers* e amarras em uma plataforma oceânica do tipo semi-submersível.

Elaboração própria.

As formas de estudo desses sistemas de linhas variam muito, passando pelas vertentes analítica, numérica e experimental. Não são raros também os casos em que duas ou mais destas formas de análise são utilizadas conjuntamente.

Dados os progressos tecnológicos na área computacional alcançados nas últimas décadas com os sucessivos avanços em termos de capacidade de memória e processamento, tem se tornado cada vez mais comum a utilização de ferramentas numéricas para auxiliar o estudo de diversos problemas de engenharia.

Particularmente para o segmento oceânico, com a conquista de lâminas d'água cada vez maiores, chegando à casa dos 3000m, a atual capacidade de processamento de dados promove avanços importantes em termos de análise dinâmica. Com relação a essa abordagem podem ser citados os trabalhos de Shiguemoto *et al.* (2007), Pesce; Martins (2005), Dalheim (1999) e Chakrabarti (1987).

Além disso, ensaios físicos utilizando modelos em escala reduzida são práticas historicamente comuns no âmbito da Engenharia Naval e Oceânica, permitindo a visualização física e estudo dos mais diversos fenômenos físicos a que uma estrutura pode ser submetida, previamente à fase de construção de um protótipo.

Pode-se mencionar, no campo da experimentação, Riveros *et al.* (2009), Valdivia *et al.* (2007), Fujarra; Simos (2006), Simos; Fujarra (2006), Faltinsen *et al.* (1994).

Por outro lado, abordagens analíticas promovem o embasamento teórico para as demais vertentes citadas, consubstanciando-se em uma das maiores fontes de publicações, como pode ser encontrado em Ramos; Pesce (2003), Aranha; Pinto (2001), Aranha; Pinto; Silva (2001), Pesce (1997), Bae (1995) e Bernitsas (1981).

Cabe ressaltar que grande parte dos trabalhos encontrados sobre a Mecânica de Linhas concentra suas investigações em pelo menos duas das abordagens citadas.

No caso particular dos *risers*, é interessante notar que a análise estática da linha submersa é essencial para a determinação de seu comportamento dinâmico frente às condições impostas pelo ambiente.

Postas essas considerações, percebe-se que é imperativo o entendimento do comportamento mecânico-estrutural das estruturas citadas, bem como suas respostas dinâmicas nas condições de operação, buscando concatenar de forma eficiente suas principais variáveis de projeto, tais como nível de produção, custo, tempo de vida útil e peso estrutural. Múltiplos esforços têm sido empregados para essa finalidade, nos mais diversos grupos de estudo.

O desenvolvimento das técnicas computacionais e o aumento da capacidade de processamentos numéricos citadas anteriormente permitiram que outras áreas do conhecimento surgissem ou se fortalecessem. É o caso, por exemplo, do Processamento Digital de Imagens. O monitoramento de ensaios através de câmeras fotográficas ou gravadoras de vídeos pode ser entendido como uma forma de instrumentação minimamente invasiva. Assim, o acompanhamento experimental utilizando esses recursos pode ser útil em situações em que a instrumentação convencional é demasiado complicada ou quando a mesma pode interferir nos resultados do ensaio. É o caso, por exemplo, do estudo da região próxima ao TDP⁶, que é de difícil caracterização via instrumentação convencional.

O presente trabalho pretende enfocar o problema da Mecânica de Linhas de maneira alternativa, utilizando câmeras digitais como principal instrumento de

⁶ TDP é a sigla para *touchdown point* que é primeiro ponto de contato do *riser* com o leito marinho, a partir do topo.

monitoramento, visando proporcionar novas perspectivas e possibilidades de experimentações físicas.

1.2 OBJETIVOS

O que se propõe neste trabalho é a utilização das técnicas de processamento e análise de imagens e calibração de câmeras, que são discutidas nas seções 2.2 a 2.4, para a determinação das características estáticas e das respostas dinâmicas de linhas (seções 2.6 e 2.7) sob configuração inicial de catenária, através de imagens e vídeos digitais. O emprego desses recursos, desenvolvidos particularmente para essa aplicação, aparece como uma nova alternativa para a Engenharia Oceânica, nos casos em que a instrumentação de linhas é difícil ou quando pode alterar os resultados das análises, além de apresentar baixo custo relativo de implementação, em detrimento dos resultados de grande valor prático e teórico que podem ser obtidos.

Ao fim deste trabalho, espera-se a proposição de uma ferramenta alternativa, de baixo custo, para a análise de linhas, bem como estabelecer os procedimentos gerais para seu uso.

Com base no que foi exposto até aqui, a presente dissertação tem como principais objetivos:

- A concepção de uma metodologia de estudo de linhas utilizando o processamento digital de imagens como uma alternativa pouco invasiva com relação à instrumentação convencional;
- A realização de simulações numéricas e/ou experimentos preliminares, a fim de entender os aspectos inerentes à metodologia que será utilizada, bem como compreender a forma como se inter-relacionam os principais parâmetros relacionados com a estática e dinâmica de linhas;
- Conceber e executar um experimento físico que possibilite a aplicação da metodologia proposta para estudo da estática e dinâmica de linhas flexíveis;

 Planejar e realizar um arranjo experimental que permita a percepção de movimentos tridimensionais da linha em estudo.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO

Atualmente, o processamento de imagens é utilizado em praticamente todos os campos de pesquisa: identificação de imagens por marca d'água, processamento de impressões digitais, processamento de imagens aeroespaciais, inspeção visual submarina, robótica, visão computacional, cartografia e topografia, para citar apenas alguns.

O presente trabalho não está inserido dentro do estado da arte do Processamento Digital de Imagens, mas traz como maior contribuição para esse campo de pesquisa sua utilização para estudo de fenômenos físicos relevantes para a Engenharia Oceânica, além da abordagem teórica detalhada que é feita na sequência, no que concerne à sua aplicação no contexto desta dissertação.

A despeito da utilização de técnicas de Processamento Digital de Imagens e da extensa fundamentação teórica que se realizará ao longo deste capítulo acerca deste assunto, cabe salientar que o processamento de imagens digitais não se configura como foco principal do presente texto. O processamento e análise de imagens, no contexto deste trabalho, são utilizados como ferramentas alternativas para o estudo da Engenharia Oceânica, no que diz respeito às linhas de amarração e *risers*, principalmente.

No que tange ao estudo das linhas, esta dissertação está apoiada em experimentos físicos em ambiente controlado, a fim de observar fenômenos descritos anteriormente em outros trabalhos. O objetivo, nesse sentido, é confrontar os dados obtidos através de simulação numérica, com os resultados encontrados na literatura especializada e aqueles provenientes das experimentações realizadas no escopo deste trabalho, a fim de avaliar quais benefícios podem ser obtidos com o uso de uma instrumentação de baixo custo e pouco invasiva.

A seção 1.4, a seguir, apresentará a forma com que este trabalho está organizado.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A fim de dar <u>Fundamentação Teórica</u> e sustentar as análises realizadas, o Capítulo 2 aborda, de maneira detalhada, tanto os aspectos relacionados com o Processamento Digital de Imagens, quanto a Estática e a Dinâmica de Linhas. Nele também são apresentados os conceitos de calibração de câmeras, que se configura em uma série de procedimentos que permite estabelecer uma conexão entre as coordenadas dos pontos de uma imagem e suas respectivas coordenadas no mundo real, através da utilização de transformadas que levam em conta as próprias coordenadas, possíveis distorções causadas pelas lentes das câmeras, fatores de ampliação/redução, entre outros fatores.

Após fundamentar teoricamente os fenômenos que se deseja estudar e as ferramentas auxiliares para atingir os objetivos estabelecidos, o Capítulo 3 apresenta os <u>Métodos</u> utilizada para realização dos ensaios e simulações descritos na sequência, bem como os <u>Materiais</u> e equipamentos utilizados para essa finalidade.

A fim de exemplificar a utilização da metodologia proposta aplicada a uma situação controlada, uma pequena série de ensaios foi realizada. As descrições e discussões acerca dos mesmos são apresentadas no Capítulo 4, sob a denominação de Ensaios Preliminares.

O emprego dos conceitos de processamento de imagem e calibração de câmeras é utilizado de maneira indireta nas análises estática e dinâmica de uma linha flexível no ar, sujeita a um movimento harmônico de topo. Os procedimentos, materiais utilizados e os resultados e análises desse <u>Experimento com Linha Flexível</u> estão expostos de maneira detalhada no Capítulo 5.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as <u>Conclusões</u> acerca dos resultados obtidos, bem como as <u>Perspectivas</u> de trabalhos futuros passíveis de serem realizados a partir dos estudos desenvolvidos e das experimentações realizadas ao longo desta dissertação.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo abordará de maneira detalhada os aspectos teóricos que norteiam os ensaios desenvolvidos no âmbito deste trabalho. Como se trata de uma abordagem diferenciada, que utilizará o processamento de imagens para estudo da estática e dinâmica de linhas elásticas em catenária, faz-se necessária a fundamentação de duas linhas importantes de pesquisa: Análise e Processamento Digital de Imagens e Mecânica de Linhas.

Utilizados como meio, e não como um fim em si próprios, os princípios básicos que norteiam o processamento de imagens são abordados nas seções 2.1 e 2.2, onde são apresentados os conceitos de imagem como ente matemático e as ferramentas usuais para seu processamento no escopo deste trabalho. A calibração de câmeras é apresentada na seção 2.3 e se configura como um tópico essencial no contexto do presente trabalho. O método que será utilizado (seção 2.4) permite a obtenção das coordenadas tridimensionais de um objeto, a partir de uma imagem (bidimensional) do mesmo.

Em seguida, é discutida, de maneira mais aprofundada, a física de linhas elásticas relativa aos aspectos importantes no escopo deste trabalho. Inicialmente, é feita a dedução da equação da catenária através da utilização de conceitos matemáticos (seção 2.5) para, então, recuperar a equação assim obtida através de conceitos de Mecânica de Linhas (seções 2.6 - Estática e 2.7 - Dinâmica).

2.1 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE IMAGENS DIGITAIS

De acordo com Gonzales; Woods (2001), "uma imagem pode ser definida como uma função bidimensional f(u,v), aonde u e v são coordenadas espaciais (planas), e a amplitude de f para qualquer par de coordenadas (u, v) é chamada de intensidade ou nível de cinza da imagem nesse ponto. Quando todos os valores das intensidades são quantidades discretas a imagem é denominada imagem digital".

Vídeos, por sua vez, são formados por uma sequência de fotos digitais, denominadas *frames*. O processamento e análise de vídeos, no contexto deste trabalho, é a aplicação, *frame* a *frame*, das técnicas e conceitos aqui abordados.

Conforme indicado na Equação (2.1, imagem digital pode ser representada por uma matriz de M linhas e N colunas, composta por $M \cdot N$ pixels⁷, aos quais são atribuídas informações relativas à sua cor.

$$A_{MxN} = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(1,0) & \dots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1,N-1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \dots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix}$$
(2.1)

Neste caso, por definição, A é uma imagem digital e os elementos f(u, v) que a compõe possuem valores proporcionais à energia irradiada pelo objeto fotografado.

A função f(u, v) pode ser caracterizada por duas parcelas:

- i(u, v):parcela denominada iluminância, determinada pelas fontes de iluminação;
- *r(u, v)*: parcela que representa a reflectância, caracterizada pela capacidade do objeto capturado de refletir a iluminação incidente.

O produto destas duas parcelas é igual a f(u, v). Ou seja, $f(u, v) = i(u, v) \cdot r(u, v)$.

Por outro lado, o processo de digitalização de uma imagem implica em discretização dos valores de f(u, v) em uma certa quantidade $L = 2^k$ de níveis de cinza. Segundo Gonzales, Woods (2001), "é prática comum referir-se a uma imagem como imagem k-bits". Por exemplo, uma imagem contendo 256 níveis de cinza é denominada imagem 8-bits. O total de bits necessários para armazenar uma imagem k-bits de tamanho M x N é igual a $b = M \cdot N \cdot k$. Assim, para armazenar uma imagem 8-bits de tamanho 320 x 240 são necessários $320 \cdot 240 \cdot 8 = 614.400$ bits.

⁷ Pixel é a abreviatura do termo picture element, que significa elemento de imagem.

2.2 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

O processamento digital de imagens abrange um conjunto de procedimentos interconectados em que a entrada e a saída correspondem a imagens e cujo passo inicial é marcado pela aquisição destas últimas. Um exemplo do conjunto de tarefas associadas ao processamento digital de imagens está ilustrado na Figura 2.1.

Dadas as particularidades deste trabalho, apenas um número restrito desses procedimentos foi utilizado. O objetivo desta seção é apresentar uma descrição sucinta das técnicas de processamento de imagens utilizadas no escopo desta dissertação.

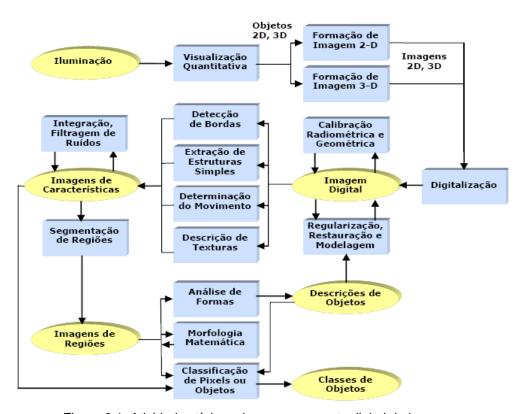


Figura 2.1: Atividades típicas do processamento digital de imagens. Fonte: Queiroz; Gomes (2001)

2.2.1 Aquisição e digitalização de imagens

A aquisição é o primeiro procedimento para o processamento de imagens e consiste no uso de um dispositivo físico sensível a uma determinada banda do espectro eletromagnético.

Atualmente, uma forma simples e usual de se fazer a aquisição de imagens é com a utilização de uma câmera digital. Através dela, a luz visível é captada por sensores feitos de materiais semicondutores, que armazenam as informações relativas a essas ondas luminosas incidentes.

Os dois sensores mais utilizados são os dos tipos CMOS — complementary metal oxide semiconductor e CCD — charge coupled device. De maneira geral, ambos convertem a luz capturada em elétrons. Dispositivos CMOS utilizam diversos transistores para amplificar e mover as cargas elétricas armazenadas nos sensores. Como o sinal CMOS é digital, não há necessidade de uso de conversos A/D (analógico-digital). Um sensor CCD transporta a carga através de um chip e a lê matricialmente. Um conversor A/D é utilizado para transformar o valor de cada pixel em um valor digital por meio da medição da quantidade de carga em cada diodo fotossensível. A Figura 2.2 apresenta esses dois tipos de sensores.



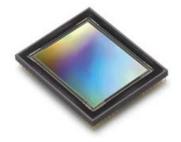


Figura 2.2: Sensores utilizados em câmeras digitais. À esquerda um dispositivo CMOS, à direita um sensor CCD. Fonte: http://eletronicos.hsw.uol.com.br/cameras-digitais.htm, consultada em 03/03/2010.

As diferenças entre esses dois tipos de sensores levam a algumas vantagens e desvantagens, dentre as quais se pode destacar:

- os sensores CCD criam imagens de alta qualidade e baixo nível de ruído, enquanto que os sensores CMOS geralmente são mais suscetíveis a ruídos (interferência eletromagnética);
- como cada pixel em um sensor CMOS possui diversos transistores localizados próximos a ele, a sensibilidade à luz de um chip CMOS é menor.
 Muitos dos fótons atingem os transistores ao invés do fotodiodo;
- os CCDs consomem 100 vezes mais energia do que um sensor CMOS equivalente;
- os sensores CCD têm sido produzidos em massa há mais tempo, assim essa tecnologia está mais consolidada. Eles tendem a ter *pixels* de maior qualidade e em maior quantidade.

Além do tipo de sensor utilizado, outros parâmetros são fundamentais para a aquisição de imagens de boa qualidade. Dentre esses parâmetros, um dos mais importantes é a iluminação, que deve ser adequada e controlada em função do que se quer filmar ou fotografar. A quantidade de luz que é capturada pelos sensores de uma câmera digital ou que atinge o filme em uma câmera convencional é controlada pela abertura da câmera e pela velocidade do obturador.

Outro fator importante é a escolha adequada das lentes empregadas, bem como da distância focal a ser utilizada, que está relacionada ao fator de ampliação ou redução que se pode obter.

2.2.2 Histograma de níveis de cinza de uma imagem

O histograma de uma imagem é uma função que associa cada um de seus L níveis de cinza ao número de *pixels* que possuem essa intensidade de cor, como no exemplo da Figura 2.3.

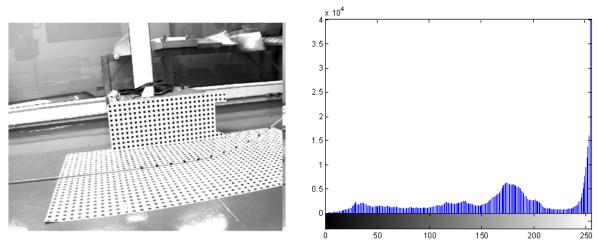


Figura 2.3: Imagem em escala de cinza e seu respectivo histograma. Elaboração própria.

O histograma de uma imagem pode ser utilizado na análise da distribuição dos seus níveis de cinza, a fim de apontar para eventuais melhorias a serem promovidas na referida imagem. Além disso, pode auxiliar na identificação de mudanças bruscas de intensidade, facilitando os processos de limiarização e segmentação, que serão abordados na seção 2.2.3. Exemplos dos padrões de histogramas de imagens, possíveis de serem encontrados, podem ser visualizados na Figura 2.4.

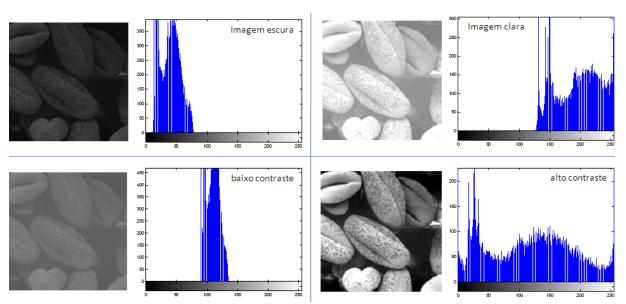


Figura 2.4: Padrões encontrados em histogramas de imagens. Fonte: Adaptado de Gonzales; Woods (2001).

2.2.3 Limiarização e segmentação de imagens

Notação: uma imagem bidimensional A, composta de pontos com coordenadas inteiras e, portanto, pertencentes ao espaço Z^2 , é representada por A $\subset Z^2$.

Para algumas das análises realizadas, as imagens ou *frames* obtidos necessitam sofrer um processo de binarização, ou seja, sua representação por apenas duas cores: preta e branca. Esse procedimento consiste em determinar, manual ou automaticamente, um limiar T abaixo do qual todos os tons de cinza passam a ser pretos. O restante da imagem torna-se branca. Cabe salientar que é possível, ainda, a utilização de vários limiares T_i com a determinação de intervalos que promovam uma separação adequada entre os conjuntos de *pixels* pertencentes aos objetos de interesse e aqueles correspondentes ao *background*, conforme necessidade do usuário.

Notação: uma imagem binária é representada por B: $Z^2 \rightarrow \{0, 1\}$.

Em processamento de imagens, a limiarização é entendida como um procedimento de segmentação, que consiste na aplicação de algoritmos que possibilitam a identificação de diferenças entre dois ou mais objetos ou regiões de uma imagem, baseada nas descontinuidades (bordas e fronteiras) e semelhanças entre seus níveis de cinza (regiões).

O principal objetivo desse processo consiste no reconhecimento de características ou padrões de objetos (*foreground*) representados na imagem, e também do seu descolamento do restante da figura (*background*), culminando na identificação de elementos conexos que a compõe.

Em um vídeo, o *background* corresponde ao conjunto de *pixels* que não apresenta mudanças significativas ao longo da sequência de *frames*. Em uma imagem simples, essa diferenciação é mais sutil e é conseguida a partir do reconhecimento de padrões específicos que o objeto em estudo possui. É o caso dos chamados pontos de controle e alvos definidos a seguir, na seção 2.3.

O primeiro passo para a segmentação de uma imagem é a inspeção visual do histograma da imagem em análise. Se a imagem for relativamente simples, como as apresentadas na Figura 2.5, é mais fácil e conveniente definir um (ou mais) limiar(es)

manualmente. Neste caso específico, a identificação de regiões é bastante natural. Entretanto, não é isso que ocorre na maior parte das imagens, como a apresentada anteriormente na Figura 2.3, levando à necessidade da aplicação de processos mais complexos para a segmentação da imagem.

Métodos subjetivos, baseados na escolha *ad hoc* de um observador, não possuem generalidade; métodos automáticos, por seu turno, somente são aplicáveis a imagens que apresentem histogramas de tons de cinza com características peculiares.

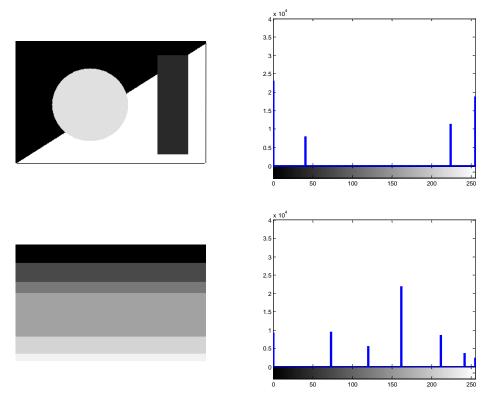


Figura 2.5: Inspeção visual de histogramas de imagens. À esquerda as imagens em escala de cinza, à direita os respectivos histogramas. Elaboração própria.

Com relação à análise da Figura 2.5, cabe salientar um aspecto importante: um pico presente em um histograma de imagem representa a quantidade de *pixels* que possuem um determinado nível de cinza. Mudanças bruscas no histograma podem ser indicativos de fronteiras de objetos ou padrões, conforme pode ser visualizado na Figura 2.6. Nela aparecem a imagem original (quatro moedas sobre fundo

escuro), seu histograma e outras duas imagens: a inferior esquerda é o resultado da limiarização usando o nível de cinza correspondente ao pico mais evidente do histograma (T = 50) e a inferior direita provém da limiarização com T = 112 da imagem original. Este limiar foi obtido automaticamente a partir da aplicação do chamado Método de Otsu, que será explicado a seguir.

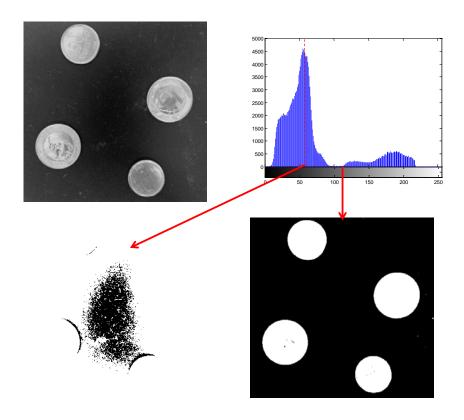


Figura 2.6: Exemplo de limiarização automática (Método de Otsu). Elaboração própria.

Existem diversos métodos utilizados para calcular o limiar de uma imagem automaticamente. Gonzales; Woods (2001) exploram duas possíveis metodologias.

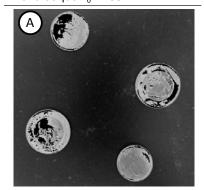
A primeira delas consiste em arbitrar um limiar T (entre os valores máximo e mínimo de intensidade da imagem). A aplicação desse limiar sobre a imagem produzirá dois grupos de *pixels*: um com valores menores que T, outro com valores maiores ou iguais a T. A seguir, computam-se as médias dos *pixels* de cada um desses subgrupos. Um novo limiar é obtido pela média simples dos valores obtidos. O processo é repetido até que a diferença entre os limiares seja menor que um valor

previamente estabelecido. A Figura 2.7 apresenta a aplicação deste método à imagem original da Figura 2.6, composta de quatro moedas. As imagens A e B da Figura 2.7 representam os grupos de *pixels* da Figura 2.6 com valores maiores ou iguais (direita) e menores (esquerda) que o limiar arbitrado $T_0 = 200$. Conforme mencionado anteriormente, para imagens em escala de cinza as intensidades dos *pixels* podem variar entre 0 e 255.

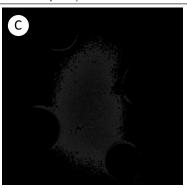
Após uma iteração o processo calcula o novo limiar, T₁ = 65. Os subgrupos da imagem original obtidos a partir desse novo limiar são apresentados na Figura 2.7 C e D. Pode-se notar, no centro de cada uma destas imagens, uma região com *pixels* de intensidades diferentes das do restante do *background*, que foi causada pelo *flash* da câmera utilizada para aquisição da imagem original. Entretanto, conforme pode ser verificado na Figura 2.8, essa região não influencia substancialmente o processo de limiarização automática. É possível, por outro lado, verificar a presença de ruídos na imagem binarizada, passível de serem eliminados com o aumento da precisão utilizada. O processo realizado consistiu em apenas uma iteração, com critério de parada de diferença entre limiares menor ou igual a 10 unidades.

A segunda metodologia apresentada por Gonzales; Woods (2001) consiste na aplicação do Método de Otsu, explicitado a seguir. A Figura 2.9 ilustra a aplicação desse método à imagem da Figura 2.6. Note-se na Figura 2.9 que o ruído apresentado é bem menor, comparativamente ao método das médias com o critério de parada utilizado (Figura 2.8). Além disso, é possível perceber a clara distinção entre background e foreground, com a correta identificação dos objetos de interesse.

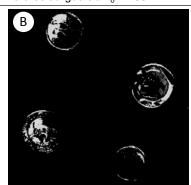
Subgrupo com *pixels* de intensidades menores que $T_0 = 200$



Subgrupo com *pixels* de intensidades menores que $T_1 = 65$



Subgrupo com *pixels* de intensidades maiores ou iguais a $T_0 = 200$



Subgrupo com *pixels* de intensidades maiores ou iguais a $T_1 = 65$

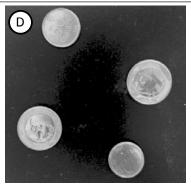
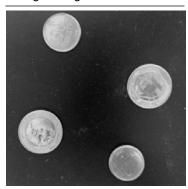


Figura 2.7: Etapas do processo de limiarização automática – Método das médias. Elaboração própria.

Imagem original



Limiarização com T = 65

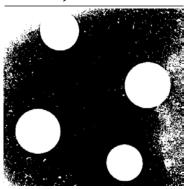
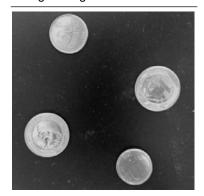


Figura 2.8: Binarização de uma imagem, com limiar calculado automaticamente – Método das médias.

Elaboração própria.

Imagem original



Limiarização - Método de Otsu

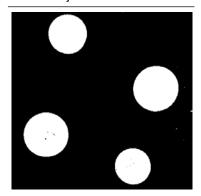


Figura 2.9: Binarização de uma imagem, com limiar calculado automaticamente – Método de Otsu. Elaboração própria.

A limiarização automática utilizando o Método de Otsu consiste em tratar o histograma da imagem como uma função densidade de probabilidade discreta:

$$p_r(r_q) = \frac{n_q}{n} \tag{2.2}$$

onde q = 0, 1, 2, ..., L - 1, n é o número total de *pixels* da imagem e n_q é o número de *pixels* com intensidade r_q .

Por esse método, é escolhido um valor k para o limiar de modo que se tenham duas classes de *pixels*: uma com níveis de cinza pertencentes ao intervalo [0, k-1] e outra com níveis em [k, L-1]. De acordo com Gonzales; Woods (2001), o Método de Otsu escolhe o limiar k que maximiza a variância inter-classes:

$$\sigma_R^2 = \omega_0 \cdot (\mu_0 - \mu_T)^2 + \omega_1 \cdot (\mu_1 - \mu_T)^2 \tag{2.3}$$

onde:

$$\omega_0 = \sum_{q=0}^{k-1} p_q(r_q) \qquad \omega_1 = \sum_{q=k}^{L-1} p_q(r_q) \qquad \mu_0 = \sum_{q=0}^{k-1} \frac{q \cdot p_q(r_q)}{\omega_0} \qquad \mu_1 = \sum_{q=0}^{k-1} \frac{q \cdot p_q(r_q)}{\omega_1} \qquad \mu_T = \sum_{q=0}^{L-1} q \cdot p_q(r_q)$$

No contexto do presente trabalho, a limiarização apresenta importância fundamental no que tange ao processamento das imagens obtidas a partir dos ensaios físicos. Com relação ao objetivo principal desta dissertação, esse procedimento permite segmentar objetos de interesse (neste caso, alvos posicionados sobre linhas) do restante da imagem, possibilitando a identificação geométrica das linhas estudadas, bem como análises posteriores de estática e dinâmica das mesmas.

Além disso, esta breve introdução teórica relativa a esses dois tópicos sugere que os experimentos sejam elaborados de maneira a garantir iluminação adequada e níveis de contraste apropriados para correta identificação dos alvos posicionados sobre a linha ensaiada.

2.2.4 Morfologia matemática sobre imagens

Os tópicos de processamento digital de imagens discutidos até aqui permitem a identificação de objetos e/ou regiões, além da possibilidade de promoção de melhorias globais na imagem. As operações exploradas consistiram em transformações realizadas *pixel* a *pixel* em uma única imagem.

Conforme visto anteriormente, um vídeo pode ser entendido como uma sequência de imagens (*frames*). Dessa maneira, o estudo de operações morfológicas entre imagens binárias é necessário para o embasamento teórico dos aspectos que cercam a presente dissertação. Salienta-se que, para as finalidades desta, apenas imagens binárias serão aqui consideradas.

Segundo Gonzales; Woods (2001), "as operações lógicas ou matemáticas envolvendo imagens são feitas sob uma base *pixel* a *pixel* entre *pixels* correspondentes de duas ou mais imagens". As principais operações lógicas utilizadas são: Intersecção (AND), União (OR), Intersecção Exclusiva (XOR) e Negação (NOT). O uso destes quatro operadores lógicos pode ser visualizado na Figura 2.10.

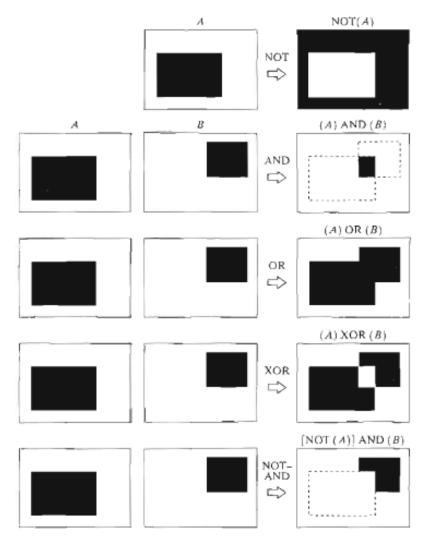


Figura 2.10: Principais operações morfológicas sobre imagens. Fonte: Gonzales; Woods (2001).

2.2.5 Operações de dilatação e erosão

A dilatação e a erosão correspondem, respectivamente, às chamadas soma e subtração de Minkowski, de acordo com Gonzales; Woods (2001).

$$A \oplus B = \{x \in Z^2 : (\hat{B} \cap A) \subseteq A\}$$

$$A \ominus B = \{w \in Z^2 : (\hat{B}) \subseteq A\}$$

$$(2.4)$$

onde $A \oplus B$ representa o processo de soma e $A \ominus B$ o de subtração de Minkowski; A é a imagem de análise e \hat{B} o chamado elemento estruturante, funcionando como uma espécie de máscara — arranjo matricial de dimensões inferiores às da imagem a ser analisada, cujos valores (binários) são definidos em função do tipo particular de artefato que se deseja eliminar. Define-se, então, \hat{B} :

$$\hat{B} = \{ z \in Z^2 : z = -b, b \in B \}$$
 (2.5)

Segundo Pratt (2001), "a dilatação e a erosão são opostas em efeito: a dilatação do background de um objeto se comporta como a erosão do objeto".

Os elementos estruturantes mais conhecidos são o 4-conexo (N_4) e 8-conexo (N_8) , ilustrados a seguir, em um exemplo de elemento estruturante quadrado de ordem 3:

$$N_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \qquad N_8 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Os efeitos da dilatação e erosão sobre uma imagem estão ilustrados na Figura 2.11.

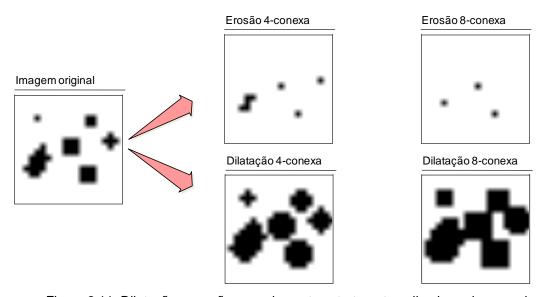


Figura 2.11: Dilatação e erosão com elemento estruturante aplicadas sobre uma imagem. Fonte: Adaptado de Kim (2009)

Denominam-se abertura $(A \circ B)$ e fechamento $(A \bullet B)$, respectivamente, à aplicação de procedimento de erosão seguida de dilatação e dilatação seguida de erosão sobre uma imagem. Tais operações, além de eliminarem objetos em forma de ilhas e lagos, também corrigem o contorno dos objetos de interesse, mediante a eliminação de artefatos em forma de penínsulas ou golfos, sem alterar de forma significativa o tamanho e a forma do objeto original.

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B$$

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B$$
(2.6)

De acordo com Pratt (2001), "a operação de fechamento tende a aumentar a extensão espacial do objeto, enquanto a abertura diminui sua extensão espacial". Além disso, Gonzales; Woods (2001) citam que "em geral, a abertura suaviza o contorno de um objeto, rompe istmos estreitos e elimina saliências finas, enquanto que o fechamento desfaz golfos estreitos, elimina pequenos buracos e preenche lacunas nos contornos, embora também promova sua suavização".

2.2.6 Operações restritas a uma janela

A aplicação de um filtro espacial $B_{(m \times n)}$ a uma imagem $A_{(M \times N)}$ consiste em mover ponto a ponto o filtro pela imagem. Essa operação corresponde a uma convolução entre A e B e é representada pela seguinte expressão:

$$g(u,v) = \sum_{s=-a}^{a} \sum_{t=-b}^{b} B(s,t) \cdot A(u+s,v+t)$$
 (2.7)

onde $a = \frac{m-1}{2}$ e $b = \frac{n-1}{2}$. A aplicação do filtro a toda a imagem consiste em fazer com que u = 0, 1, 2,..., M – 1 e v = 0, 1, 2,..., N – 1.

Por essa definição, diz-se que os filtros espaciais são operados sobre a vizinhança de *pixels* da imagem. A vizinhança de um *pixel* pode ser entendida como o conjunto de *pixels* a ele adjacente. Existem várias formas de se definir essa vizinha: por exemplo, a 4-conectada, a 6-conectada ou a 8-conectada, conforme ilustrado na Figura 2.12. Dado um *pixel* de coordenadas (u, v) em uma imagem, seus vizinhos 4-conectados, por exemplo, são os *pixels* de coordenadas (u+1, v), (u-1, v), (u, v+1) e (u, v-1).

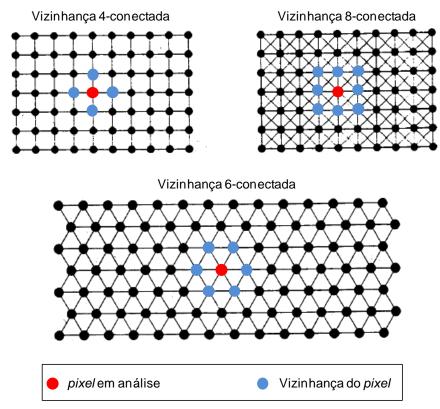


Figura 2.12: Tipos de vizinhança de *pixels*. Fonte: Adaptado de Kim (2009)

Diversos operadores podem desempenhar o papel descrito nesta definição, entre eles os filtros lineares espaciais, o filtro mediana, a média móvel, o filtro gaussiano e a convolução, entre outros. Por ser muito utilizado para atenuação de ruídos do tipo impulsivo ("sal-pimenta") sem suavizar as bordas do objeto, o filtro mediana será o

utilizado no escopo deste trabalho, salvo menção contrária. A Figura 2.13 ilustra a aplicação desse filtro sobre uma imagem binária ruidosa.

A aplicação de um filtro mediana a uma imagem consiste em calcular, para cada *pixel* p(u, v) da imagem original, a mediana med(u, v, C) dos valores de seus vizinhos C-conectados, atribuindo-se esse valor à coordenada (u, v) da imagem de saída.

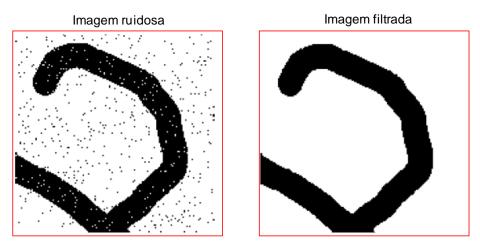


Figura 2.13: Aplicação do filtro mediana sobre uma imagem binária. Fonte: Kim (2009)

Até aqui os tópicos de processamento de imagens foram apresentados de maneira sucinta, a fim de se adequarem ao escopo do presente texto. Na próxima seção, os conceitos de calibração de câmeras serão abordados mais detalhadamente, dada sua importância fundamental nas rotinas numéricas desenvolvidas.

2.3 CALIBRAÇÃO DE CÂMERAS

Um tópico essencial no processamento e análise de imagens e vídeos é a calibração das câmeras utilizadas. O objetivo principal da calibração de câmeras é a

reconstrução tridimensional a partir de pares de imagens estéreo⁸, posteriormente à obtenção de uma transformação matemática entre os sistemas de coordenadas do objeto e da imagem.

A presente seção tem por finalidade explorar os conceitos e aplicações da calibração de câmeras, relacionadas ao escopo desta dissertação. Primeiramente, serão apresentados os quatro sistemas de coordenadas envolvidos na aquisição de imagens. Em seguida, são apresentados sucintamente alguns dos métodos de calibração existentes na literatura especializada, com a justificativa da utilização de um deles, em detrimento dos demais. O procedimento escolhido para uso neste trabalho é, por fim, analisado de maneira mais detalhada, apontando para aspectos de interesse dos quais se podem extrair informações relevantes para a realização dos ensaios propostos.

2.3.1 Sistemas de coordenadas envolvidos

Nos procedimentos de calibração de câmeras é possível identificar quatro sistemas de coordenadas. Este tópico do processamento digital de imagens consiste em estabelecer as correspondências entre pontos de cada um desses sistemas a partir de transformações matemáticas entre eles. A Figura 2.14 ilustra os conjuntos de eixos coordenados de cada um desses sistemas de referência, os quais são descritos a seguir.

Sistema de coordenadas do objeto (SCO): sistema tridimensional de coordenadas (x, y, z), utilizado para descrever o posicionamento de um objeto ou ponto de interesse da cena.

Sistema de coordenadas da câmera (SCC): sistema tridimensional cuja origem se encontra no centro óptico da câmera, também chamado ponto principal. Os eixos desse sistema de referência são tais que o eixo z_c coincide com o eixo óptico (linha tracejada na Figura 2.14) e os eixos x_c e y_c são paralelos ao plano da imagem. A

⁸ Um par de imagens estéreo consiste em duas imagens de uma mesma cena, vista sob pontos de visão diferentes. A reconstrução 3D de uma cena é feita através da associação de pontos dessas duas imagens, de modo similar ao que faz o cérebro humano a partir do que é capturado pelos olhos.

distância entre a origem desse sistema e o plano de projeção da imagem é denominada distância focal (f).

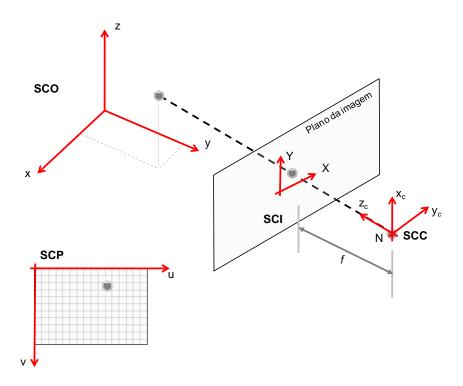


Figura 2.14: Representação dos quatro sistemas de coordenadas envolvidos na calibração de câmeras.

Elaboração própria., adaptado de Marques (2007).

Sistema de coordenadas da imagem (SCI): sistema de coordenadas bidimensional situado no plano da imagem. Assim, o centro desse sistema é a projeção ortogonal do centro óptico da câmera sobre o plano da imagem. Um ponto desse sistema é descrito pelas coordenadas (X, Y). É nesse sistema em que a descrição das coordenadas pode apresentar distorções causadas pela lente.

Sistema de coordenadas em *pixels* **(SCP)**: conforme descrito anteriormente na seção 2.1, é o sistema de referência da imagem com coordenadas (u, v) descritas na unidade usual de medida (*pixel*). Em geral, e como utilizado no presente trabalho, o centro desse sistema bidimensional é o canto superior esquerdo da imagem.

O objetivo da calibração é obter a transformada entre as coordenadas do SCO e do SCP. Os procedimentos descritos nas próximas seções mostram, na ordem, as mudanças de coordenadas do SCO para o SCC, deste para o SCI e deste último

para o SCP. O último e mais importante dos procedimentos é a composição dessas transformações a fim de atingir a finalidade proposta.

Os parâmetros obtidos com a calibração de câmeras podem ser classificados em extrínsecos e intrínsecos. Os primeiros fornecem informações sobre a posição e orientação das câmeras utilizadas com relação ao sistema de coordenadas do objeto (SCO). Os demais encerram as características ópticas e geométricas internas das câmeras utilizadas, como os fatores de escala, os centros ópticos, as distorções e as distâncias focais.

2.3.1.1 A relação entre o SCO e o SCC

A transformação entre coordenadas do SCO e do SCC corresponde a uma mudança usual de coordenadas como as que são utilizadas na Mecânica dos Corpos Rígidos, ou seja, equivale a uma translação e uma rotação, tridimensionais com respeito à origem de um dos sistemas envolvidos.

Sejam [T] o vetor com as coordenadas da origem do SCM e [R] a matriz cujas colunas representam versores paralelos aos eixos x_c , y_c e z_c , concorrentes no centro óptico da câmera, dados por:

$$[T] = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

$$[R] = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$$
 (2.8)

Então:

Neste caso, os parâmetros a serem calibrados são [R] e [T] que correspondem aos parâmetros extrínsecos da câmera, relativos à sua posição e orientação com relação ao sistema de coordenadas do objeto.

2.3.1.2 A relação entre o SCC e o SCI

O passo seguinte consiste em descrever a mudança de coordenadas do SCC para o SCI, considerando que f é a distância focal da câmera. Assim:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z_c} \cdot \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}$$
 (2.10)

É importante notar que a transformação assim definida não é inversível, dado que a um ponto do objeto corresponde um único ponto na imagem, mas um ponto na imagem possui infinitos correspondentes no espaço do objeto. O parâmetro a ser calibrado nesta etapa é a distância focal, considerada um dos parâmetros internos da câmera.

É também nesta etapa da calibração que eventuais distorções causadas pelas lentes das câmeras precisam ser corrigidas. Essas distorções são provenientes de características intrínsecas à construção das lentes (distorção radial) ou de imperfeições existentes no alinhamento dos eixos ópticos daquelas (distorção descentrada), ilustradas na Figura 2.15.

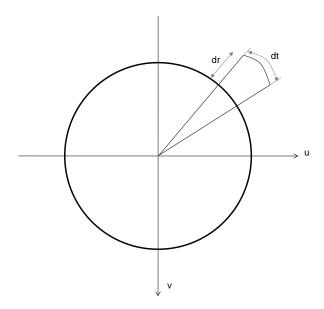


Figura 2.15: Distorções radial (dr) e tangencial (dt), causada pelas imperfeições das lentes.

As transformações apresentadas até aqui consideram o modelo de câmera conhecido como *pinhole*, que é uma idealização baseada na propagação retilínea da luz e, portanto, linear. O procedimento usual para se considerarem os efeitos devidos às distorções consiste em acrescentar em (2.10) termos relacionados a esses defeitos de maneira que:

$$\begin{bmatrix} X_{und} \\ Y_{und} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ 0 \end{bmatrix}$$
 (2.11)

X_{und} e Y_{und} correspondem, respectivamente, aos valores de X e Y livres de efeitos de distorção. Heikkilä; Silvén (1997) apud Brown (1966) e Brown (1971) consideram um modelo completo de distorção em que se define:

$$\begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \cdot (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + \cdots) \\ Y \cdot (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + \cdots) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2 \cdot p_1 \cdot X \cdot Y + p_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot X^2) \\ p_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot Y^2) + 2 \cdot p_2 \cdot X \cdot Y \end{bmatrix}$$
(2.12)

onde $r = \sqrt{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2}$ é a distância entre um ponto (X, Y) da imagem e o centro óptico (X₀, Y₀) da câmera, k₁, k₂, ... são os coeficientes de distorção radial e p₁ e p₂ são os coeficientes de distorção tangencial.

Com relação à distorção radial, cujos efeitos sobre uma imagem podem ser visualizados na Figura 2.16, Heikkilä; Silvén (1997) citam que "tipicamente, um ou dois coeficientes são suficientes para compensar essa distorção". Quanto à desconsideração da distorção tangencial, afirmam que "na maioria dos casos, o erro é pequeno e os componentes de distorção insignificantes". Levando em conta estas asserções, a expressão (2.12) se reduz a:

$$\begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \cdot k_1 \cdot r^2 \\ Y \cdot k_1 \cdot r^2 \\ 0 \end{bmatrix}$$
 (2.13)

O modelo de distorção apresentado em (2.13) será o utilizado para correção das distorções em imagens no escopo do presente trabalho. Essa simplificação equivale à consideração de $p_1 = p_2 = k_2 = 0$ em (2.12), de modo a considerar apenas o primeiro termo da distorção radial, cujos efeitos sobre uma imagem estão ilustrados na Figura 2.16.

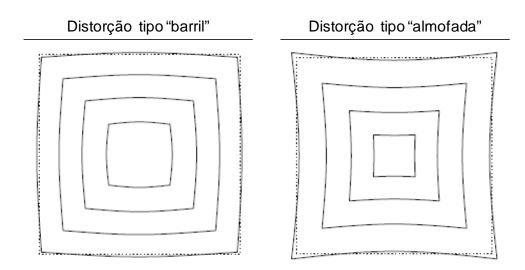


Figura 2.16: Efeitos da distorção radial sobre uma imagem. A imagem original corresponde à linha tracejada. Fonte: Ojanen (1999).

Por concisão, no que se refere às transformações entre os sistemas de referência identificados na calibração de câmeras, a continuidade desse texto não levará em conta, explicitamente, os efeitos relacionados às distorções. Entretanto, a formulação apresentada na Equação (2.13) foi implementada na rotina numérica de processamento de imagens desenvolvida para aplicação aos ensaios desta dissertação. Assim, é feito um pré-tratamento das imagens obtidas, anteriormente à aplicação das transformações de coordenadas necessárias.

2.3.1.3 A relação entre o SCI e o SCP

Conforme descrito na seção 2.2.1, a luz refletida por um objeto durante a captura de sua imagem é registrada por sensores dentro da câmera digital. Esses sensores, distribuídos em um arranjo retangular, não estão perfeitamente alinhados, devido a

imperfeições durante sua construção. Assim, as linhas e colunas de sensores não guardam paralelismo e perpendicularismo estritos entre si. Levando-se em considerações essas distorções geométricas devidas à construção da câmera, é possível descrever a transformada de coordenadas do SCI para o SCP da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & \tau & X_0 \\ 0 & s_y & Y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}$$
 (2.14)

onde:

s_x e s_y correspondem à densidade linear de *pixels* nas direções horizontal e vertical, respectivamente;

au é a tangente do ângulo que as colunas de *pixels* forma com a direção perpendicular às linhas;

X₀ e Y₀ são as coordenadas do centro óptico no plano de projeção da imagem.

2.3.1.4 A composição das transformações: relação entre SCO e SCP

Para o objetivo que a calibração de câmeras se propõe, que se resume na obtenção da transformação entre as coordenadas do SCO e do SCP, é necessária a composição das transformadas descritas nas seções de 2.3.1.1 a 2.3.1.3, cujo resultado é mostrado a seguir:

Com relação à Equação (2.15), cabe salientar que as matrizes [R] e [T] foram descritas anteriormente na seção 2.3.1.1 e contêm as informações referentes aos parâmetros intrínsecos das câmeras. Os vetores-coluna representam as coordenadas de um ponto (x, y, z) do objeto e seu correspondente (u, v) da imagem. A composição das matrizes quadradas determina uma matriz [I]_{3x3} denominada

matriz intrínseca de calibração que contém todos os parâmetros intrínsecos da câmera. Assim:

$$[I] = \begin{bmatrix} s_x & \tau & X_0 \\ 0 & s_y & Y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \cdot s_x & f \cdot \tau & X_0 \\ 0 & f \cdot s_y & Y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(2.16)

2.3.2 Métodos de calibração de câmeras

As discussões anteriores apontaram para o fato de que a calibração de câmeras corresponde a uma composição de três transformações matemáticas entre os diferentes sistemas de coordenadas que estão envolvidos na aquisição de imagens por uma câmera digital (ou conjunto delas). A transformação representada pela Equação (2.15) corresponde a uma formulação genérica que pode ser aplicada a qualquer caso. Entretanto, existem diversos métodos de calibração de câmeras encontrados na literatura especializada, que apresentam modificações, simplificações ou hipóteses restritivas com relação a esse modelo.

Dado que o foco principal do presente texto não é o Processamento Digital de Imagens, a despeito da fundamentação teórica detalhada que se faz, serão discutidos brevemente três desses métodos de calibração, reconhecidos como os mais utilizados: o Método de Tsai, o Método de Zhuang e o Método DLT.

O objetivo desta seção é apresentar brevemente os procedimentos citados e justificar a escolha por um deles para a realização das análises a serem efetuadas.

2.3.2.1 Método de Tsai

De acordo com Zollner; Sablatnig (2003), o método de Tsai é composto de dois estágios. No primeiro, todos os parâmetros extrínsecos são calculados usando a restrição de paralelismo (com exceção da translação sobre o eixo óptico). Na segunda etapa todos os demais parâmetros são computados a partir de otimização não-linear.

As simplificações inerentes a esse modelo, resultantes da hipótese de alinhamento entre o SCI e o SCC, não permitem o reconhecimento de distorções devidas às lentes, nem a perda de ortogonalidade da projeção. Por outro lado, sua aplicação torna-se mais rápida que em outros métodos. Originalmente, o método de Tsai foi proposto para calibrações de uma única câmera, ou seja, para aplicações 2D.

2.3.2.2 Método de Zhuang

Diferentemente da técnica desenvolvida por Tsai, o método de Zhuang requer a utilização de pelo menos três diferentes projeções de um alvo de calibração, conforme discutido por Zollner; Sablatnig (2003).

Sua implementação é feita a partir de um conjunto de pontos cujas coordenadas nos sistemas SCO e SCI são conhecidas. Sob a hipótese restritiva de ortogonalidade entre os vetores contidos nas duas primeiras colunas da matriz de rotação R, definida em 2.3.1.1, é descrita uma homografia que resulta em um vetor 6D a ser determinado. Para cada uma das projeções dos alvos de calibração utilizados é possível obter um conjunto de duas equações, o que implica diretamente na necessidade de três pontos de visão do alvo de calibração para determinação dos elementos do vetor 6D.

2.3.2.3 Método da transformada linear direta

O procedimento de calibração usando a transformação linear direta consiste em dois passos: no primeiro, é estabelecida a correspondência entre as coordenadas de pontos de controle nos sistemas do objeto e da imagem, através de um conjunto de parâmetros de calibração. Em seguida, esses parâmetros são utilizados para a determinação da transformada entre esses sistemas de coordenadas.

2.3.2.4 Comparação entre os métodos de calibração

Cronologicamente, o método de Tsai é o mais antigo. Sua fácil implementação e baixo custo computacional o caracteriza como um dos procedimentos de calibração

⁹ A homografia é uma relação projetiva entre elementos do espaço e consiste em uma transformação matemática que envolve entes geométricos de diferentes espécies (por exemplo, cubo e octaedro).

mais utilizados. Dessa maneira, diversos códigos numéricos escritos em linguagem C/C++ (ou outras de baixo nível) podem ser encontrados em publicações sobre o tema. Por outro lado, segundo Zollner; Sablatnig (2003), este método não é apropriado para casos de múltipla visão, ou seja, quando existe a necessidade de se utilizar mais de uma câmera.

Implementações do método da transformação linear direta, também conhecida como DLT, estão disponíveis em linguagens de programação de alto nível. Zollner; Sablatnig (2003) concluíram que o método DLT apresenta um custo computacional maior que o método de Tsai. Entretanto, apresentam erros menores que o deste último e são amplamente utilizados em sistemas com várias câmeras, mostrando-se adequado para reconstrução tridimensional de objetos.

O método de Zhuang é o mais recente dentre os citados e seu embasamento teórico utiliza conceitos avançados de geometria projetiva. De acordo com Zollner; Sablatnig (2003), este método requer um enorme esforço computacional em sua primeira etapa, a qual envolve estimativas não-lineares das homografias de cada ponto de visão envolvido.

O trabalho desenvolvido por Zollner; Sablatnig (2003), base do presente texto sobre os métodos de calibração, consistiu na realização de ensaios em laboratório e apontou o método de Zhuang como o "de melhor convergência nos casos multivisão", embora a um alto custo computacional. O método de Tsai foi tido como o de melhor desempenho computacional, em detrimento das maiores divergências nos resultados da calibração.

Dadas essas considerações e tomando como fator de decisão a melhor relação entre o custo computacional e convergência de resultados frente ao esperado, optou-se pela utilização do método DLT como o procedimento de calibração a ser utilizado ao longo do presente trabalho. A seção 2.4 a seguir apresentará de maneira detalhada o método de calibração escolhido.

2.4 O MÉTODO DLT

O Método da Transformação Linear Direta foi proposto originalmente por Abdel-Aziz; Karara (1971) e é um dos mais utilizados para a calibração de câmeras. As discussões e formulações referentes a esse tema e que cercam a presente seção estão baseadas em Kwon (1998).

O objetivo do Método DLT, assim como os demais de calibração de câmeras, é a determinação da relação entre as coordenadas dos sistemas real (SCO) e da imagem em *pixels* (SCP), a partir da utilização de um determinado conjunto de pontos de controle, dos quais devem ser conhecidas suas coordenadas nestes dois sistemas. Obtida essa transformação é possível calcular as coordenadas reais de um ponto da imagem, ou seja, dado um *frame* obtido a partir das câmeras calibradas, é possível determinar as coordenadas de qualquer ponto dessa figura no sistema de referência do objeto. Esse último procedimento é conhecido como reconstrução tridimensional e está descrito na seção 2.4.2.

2.4.1 Calibração usando o método DLT

A fim de construir os princípios do Método DLT utilizar-se-á a Figura 2.17, na qual foram omitidos os demais sistemas de coordenadas (SCC e SCI). Nesta figura, é ilustrada a formação da imagem I do ponto O de um objeto, a partir da utilização de uma câmera cujo centro de projeção óptico se encontra em N.

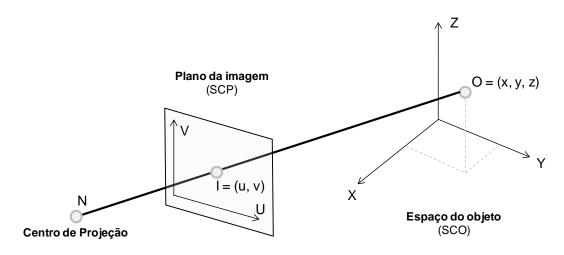


Figura 2.17: Sistemas de coordenadas real e da imagem. Fonte: Adaptado de Kwon (1998)

As coordenadas (x, y, z) do ponto O são dadas com relação ao sistema de coordenadas real (ou do objeto), em unidades métricas (cm ou m, por exemplo). Já as do ponto I pertencem ao plano da imagem, cuja unidade característica é o *pixel*. O ponto N pode ser descrito em função de um ou outro sistema. Assim, N = (x_0, y_0, z_0) ou N = (u_0, v_0) .

Decorre diretamente do princípio da propagação retilínea da luz – proposição fundamental do Método DLT – que os pontos N, I e O são colineares. A partir disso, conclui-se que o vetor $\vec{A} = \overrightarrow{NO}$ tem coordenadas (x – x₀, y – y₀, z – z₀) no espaço do objeto, conforme ilustrado na Figura 2.18.

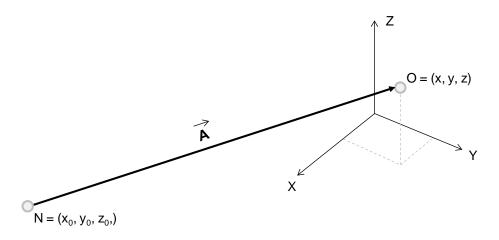


Figura 2.18: Relação entre as coordenadas dos pontos N e O. Fonte: Adaptado de Kwon (1998)

A fim de estabelecer a relação entre os sistemas descritos, um terceiro eixo W deve ser adicionado perpendicularmente ao plano da imagem (Figura 2.19).

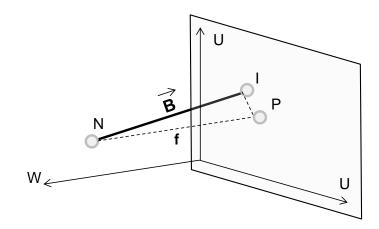


Figura 2.19: Sistema tridimensional de coordenadas da imagem. Fonte: Adaptado de Kwon (1998)

O ponto P, introduzido na figura anterior, é denominado ponto principal. A reta paralela ao eixo W que passa por P e por N é conhecida como eixo principal da câmera. A distância entre estes dois pontos é a distância focal f. Em coordenadas do sistema da imagem, I = (u, v, 0), $P = (u_0, v_0, 0)$ e $N = (u_0, v_0, f)$. Dessa forma, o vetor $\vec{B} = \vec{NI}$ da Figura 2.19 pode ser escrito como $(u - u_0, v - v_0, -f)$.

A condição de colinearidade de N, I e O é, portanto, equivalente à expressão:

$$\vec{B} = c \cdot \vec{A} \tag{2.17}$$

onde c é um escalar não nulo. É importante notar que os vetores \vec{A} e \vec{B} foram descritos em função do sistema de referência do objeto e da imagem, respectivamente. Entretanto, faz-se necessário que os vetores presentes na relação expressa pela Equação (2.17) sejam escritos com base em um mesmo sistema de coordenadas, por exemplo, o da imagem. Para tanto deve ser utilizada a transformação de coordenadas apresentada em (2.9), de maneira que:

$$A^{(I)} = T + R \cdot A^{(O)} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \cdot A^{(O)}$$
 (2.18)

onde $A^{(I)}$ é o vetor A descrito a partir do sistema tridimensional da imagem e $A^{(O)}$ é o mesmo vetor em função das coordenadas do espaço do objeto.

Substituindo (2.18) em (2.17):

$$\begin{bmatrix} u - u_0 \\ v - v_0 \\ -f \end{bmatrix} = c \cdot \left\{ \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} \right\}$$
 (2.19)

O sistema matricial (2.19) pode ser desenvolvido a fim de se obter o conjunto de equações (2.20):

$$u - u_0 = c \cdot [T_x + r_1 \cdot (x - x_0) + r_2 \cdot (y - y_0) + r_3 \cdot (z - z_0)]$$

$$v - v_0 = c \cdot [T_y + r_4 \cdot (x - x_0) + r_5 \cdot (y - y_0) + r_6 \cdot (z - z_0)]$$

$$-f = c \cdot [T_z + r_7 \cdot (x - x_0) + r_8 \cdot (y - y_0) + r_9 \cdot (z - z_0)]$$
(2.20)

A última das equações de (2.20), rearranjada, leva a:

$$c = \frac{-f}{T_z + r_7 \cdot (x - x_0) + r_8 \cdot (y - y_0) + r_9 \cdot (z - z_0)}$$
(2.21)

Substituindo (2.21) nas primeiras duas equações de (2.20), chega-se a:

$$u - u_0 = -f \cdot \frac{T_x + r_1 \cdot (x - x_0) + r_2 \cdot (y - y_0) + r_3 \cdot (z - z_0)}{T_z + r_7 \cdot (x - x_0) + r_8 \cdot (y - y_0) + r_9 \cdot (z - z_0)}$$
(2.22)

$$v - v_0 = -f \cdot \frac{T_y + r_4 \cdot (x - x_0) + r_5 \cdot (y - y_0) + r_6 \cdot (z - z_0)}{T_z + r_7 \cdot (x - x_0) + r_8 \cdot (y - y_0) + r_9 \cdot (z - z_0)}$$

Note-se que, em (2.22), persiste a questão das diferentes unidades existentes nos dois sistemas: o da imagem, em *pixels*, e o do objeto, em unidades métricas. A essa formulação devem ser então introduzidos fatores de escala s_u e s_v, respectivamente para as direções u e v, que compatibilizam as unidades dos dois sistemas adotados. Dessa maneira,

$$u = u_0 - f \cdot s_u \cdot \frac{T_x + r_1 \cdot (x - x_0) + r_2 \cdot (y - y_0) + r_3 \cdot (z - z_0)}{T_z + r_7 \cdot (x - x_0) + r_8 \cdot (y - y_0) + r_9 \cdot (z - z_0)}$$

$$v = v_0 - f \cdot s_v \cdot \frac{T_y + r_4 \cdot (x - x_0) + r_5 \cdot (y - y_0) + r_6 \cdot (z - z_0)}{T_z + r_7 \cdot (x - x_0) + r_8 \cdot (y - y_0) + r_9 \cdot (z - z_0)}$$
(2.23)

O conjunto de equações dadas em (2.23) recupera o sistema apresentado em (2.15), a menos da distorção τ que o método DLT pressupõe ser nula. Por fim, podese reescrever (2.23) de maneira mais simples, a partir da introdução de um determinado conjunto de parâmetros:

$$u = \frac{L_1 \cdot x + L_2 \cdot y + L_3 \cdot z + L_4}{L_9 \cdot x + L_{10} \cdot y + L_{11} \cdot z + 1}$$

$$v = \frac{L_5 \cdot x + L_6 \cdot y + L_7 \cdot z + L_8}{L_9 \cdot x + L_{10} \cdot y + L_{11} \cdot z + 1}$$
(2.24)

onde L₁ a L₁₁ são os chamados parâmetros DLT de calibração, próprios de cada sistema de aquisição (câmera) e refletem as relações entre os sistemas de referência da imagem (SCP) e do objeto (SCO). Esses parâmetros são dados em (2.25), com base nas definições dadas em (2.26) e (2.27):

$$L_{1} = \frac{u_{0} \cdot r_{7} - d_{u} \cdot r_{1}}{D}$$

$$L_{2} = \frac{u_{0} \cdot r_{8} - d_{u} \cdot r_{2}}{D}$$

$$L_{3} = \frac{u_{0} \cdot r_{9} - d_{u} \cdot r_{3}}{D}$$

$$L_{4} = \frac{(d_{u} \cdot r_{1} - u_{0} \cdot r_{7}) \cdot x_{0} + (d_{u} \cdot r_{2} - u_{0} \cdot r_{8}) \cdot y_{0} + (d_{u} \cdot r_{3} - u_{0} \cdot r_{9}) \cdot z_{0} + T_{z} \cdot u_{0} - T_{x} \cdot d_{u}}{D}$$

$$L_{5} = \frac{v_{0} \cdot r_{7} - d_{v} \cdot r_{1}}{D}$$

$$L_{6} = \frac{v_{0} \cdot r_{8} - d_{v} \cdot r_{2}}{D}$$

$$L_{7} = \frac{v_{0} \cdot r_{9} - d_{v} \cdot r_{3}}{D}$$

$$L_{8} = \frac{(d_{v} \cdot r_{1} - v_{0} \cdot r_{7}) \cdot x_{0} + (d_{v} \cdot r_{2} - v_{0} \cdot r_{8}) \cdot y_{0} + (d_{v} \cdot r_{3} - v_{0} \cdot r_{9}) \cdot z_{0} + T_{z} \cdot v_{0} - T_{y} \cdot d_{v}}{D}$$

$$L_{9} = \frac{r_{7}}{D}$$

$$L_{10} = \frac{r_{8}}{D}$$

onde:

$$(d_u, d_v) \equiv (f \cdot s_u, f \cdot s_v) \tag{2.26}$$

$$D \equiv T_z - x_0 \cdot r_7 - y_0 \cdot r_8 - z_0 \cdot r_9 \tag{2.27}$$

As equações dadas pelo sistema em (2.24) associam as coordenadas de um ponto no espaço do objeto (SCO) com suas correspondentes no plano da imagem em *pixels* (SCP). Dado que existem onze parâmetros (L₁ a L₁₁) a serem determinados a partir de pares de equações dadas em (2.24), são necessários pelo menos seis pontos de calibração, espacialmente distribuídos, para que esse sistema seja determinado. Na realidade, seis ou mais pontos de calibração tornam o sistema dado por (2.24) super-determinado, ou seja, ele passa a ter mais equações que incógnitas. Essa é uma característica desejável a fim de mitigar eventuais erros

inerentes às medições. A resolução deste tipo de sistema de equações é feita a partir da aplicação do chamado Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), para o qual o tratamento matricial das equações apresentadas torna-se mais adequado. Para tanto, o sistema (2.24) pode ser reescrito da seguinte forma:

Ou ainda como:

$$[C]_{2N\times11} \cdot [L]_{11\times1} = [D]_{2N\times1} \tag{2.29}$$

Aplicando o MMQ à equação anterior, obtém-se:

$$[C]_{11\times 2N}^{t} \cdot [C]_{2N\times 11} \cdot [L]_{11\times 1} = [C]_{11\times 2N}^{t} \cdot [D]_{2N\times 1}$$
(2.30)

A Equação (2.30) pode, ainda, ser expressa em uma forma mais concisa:

$$[E]_{11\times1} \cdot [L]_{11\times1} = [F]_{11\times1} \tag{2.31}$$

A maior virtude da Equação (2.31) é que o sistema formado passa a contar com o mesmo número de equações e incógnitas e a resolução deste fornece os parâmetros DLT, desde que sejam conhecidas as coordenadas de, no mínimo, seis pontos de controle, tanto no SCO quanto no SCP.

2.4.2 Reconstrução tridimensional usando o método DLT

Conforme apontado pelo sistema (2.24), a obtenção dos parâmetros DLT permite que seja realizada a transformação de coordenadas entre os sistemas de referência do objeto e da imagem. Convém, entretanto, escrever essas equações na forma matricial, reorganizando o sistema a fim de explicitar as variáveis de interesse (x, y e z) e, desta forma, propiciar a reconstrução tridimensional do objeto da cena.

$$\begin{bmatrix} L_{1}^{(1)} - u^{(1)} \cdot L_{9}^{(1)} & L_{2}^{(1)} - u^{(1)} \cdot L_{10}^{(1)} & L_{3}^{(1)} - u^{(1)} \cdot L_{11}^{(1)} \\ L_{5}^{(1)} - v^{(1)} \cdot L_{9}^{(1)} & L_{6}^{(1)} - v^{(1)} \cdot L_{10}^{(1)} & L_{7}^{(1)} - v^{(1)} \cdot L_{11}^{(1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^{(1)} - L_{4}^{(1)} \\ v^{(1)} - L_{8}^{(1)} \end{bmatrix}$$
(2.32)

O sistema de equações (2.32) apresenta duas equações e três incógnitas e é, portanto, indeterminado. Apenas a adição de pelo menos outra equação torna possível sua solução inequívoca. A maneira de se fazer isso é valer-se do uso de mais de uma câmera. Tomando como m o número de câmeras usadas, pode-se reescrever (2.32) da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} L_{1}^{(1)} - u^{(1)} \cdot L_{9}^{(1)} & L_{2}^{(1)} - u^{(1)} \cdot L_{10}^{(1)} & L_{3}^{(1)} - u^{(1)} \cdot L_{11}^{(1)} \\ L_{5}^{(1)} - v^{(1)} \cdot L_{9}^{(1)} & L_{6}^{(1)} - v^{(1)} \cdot L_{10}^{(1)} & L_{7}^{(1)} - v^{(1)} \cdot L_{11}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{1}^{(m)} - u^{(m)} \cdot L_{9}^{(m)} & L_{2}^{(m)} - u^{(m)} \cdot L_{10}^{(m)} & L_{3}^{(m)} - u^{(m)} \cdot L_{11}^{(m)} \\ L_{5}^{(m)} - v^{(m)} \cdot L_{9}^{(m)} & L_{6}^{(m)} - v^{(m)} \cdot L_{10}^{(m)} & L_{7}^{(m)} - v^{(m)} \cdot L_{11}^{(m)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^{(1)} - L_{4}^{(1)} \\ v^{(1)} - L_{8}^{(1)} \\ \vdots \\ u^{(m)} - L_{4}^{(m)} \\ v^{(m)} - L_{4}^{(m)} \end{bmatrix}$$

$$(2.33)$$

Ou, ainda, como:

$$[G]_{2m\times 3} \cdot [O]_{3\times 1} = [H]_{2m\times 1} \tag{2.34}$$

Aplicando a (2.34) o MMQ:

$$[G]_{3\times 2m}^t \cdot [G]_{2m\times 3} \cdot [O]_{3\times 1} = [G]_{3\times 2m}^t \cdot [H]_{2m\times 1}$$
(2.35)

Que em uma forma mais concisa pode ser escrita como:

$$[P]_{3\times 3} \cdot [O]_{3\times 1} = [Q]_{3\times 1} \tag{2.36}$$

A resolução do sistema (2.36) permite encontrar as coordenadas reais (x, y, z) dos alvos a partir de suas coordenadas (u, v) no sistema de referência da imagem e dos parâmetros DLT obtidos anteriormente.

Cabe salientar que o Método DLT exige que os pontos de controle utilizados para calibração de cada câmera formem um volume de controle. Foram realizados experimentos preliminares para entendimento e aplicação básica dos conceitos apresentados nessa seção. As descrições, os resultados obtidos, as discussões e análises desses ensaios encontram-se no Capítulo 4.

2.4.3 Relação entre os parâmetros DLT e os parâmetros das câmeras

Conforme descrito anteriormente, a calibração de câmeras consiste na determinação de parâmetros físicos e geométricos das mesmas, a partir de um conjunto de pontos de controle, cujas coordenadas nos sistemas real e da imagem são conhecidas.

A solução da equação (2.24) permite a obtenção dos parâmetros DLT de cada câmera, definidos em (2.25) a (2.27), os quais contêm as informações intrínsecas e extrínsecas de cada uma das câmeras. A obtenção destas últimas, a partir dos parâmetros DLT é o objetivo desta seção.

Substituindo (2.27) em (2.25), nas expressões para L_1 a L_4 , chega-se à seguinte relação após algumas manipulações algébricas:

$$L_1 \cdot x_0 + L_2 \cdot y_0 + L_3 \cdot z_0 = -L_4 - \frac{T_x \cdot d_u - T_z \cdot u_0}{D}$$
 (2.37)

Analogamente, usando os conjuntos de expressões para L_5 a L_8 e L_9 a L_{11} e a equação (2.37) obtida anteriormente, é possível estabelecer a seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_5 & L_6 & L_7 \\ L_9 & L_{10} & L_{11} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_4 - \frac{T_x \cdot d_u - T_z \cdot u_0}{D} \\ -L_8 - \frac{T_y \cdot d_v - T_z \cdot v_0}{D} \\ -1 - \frac{T_z}{D} \end{bmatrix}$$
(2.38)

Dessa maneira, os 11 parâmetros DLT (L_1 a L_{11}) encontrados na calibração de cada câmera são suficientes para determinar as coordenadas do centro óptico da mesma no sistema de referência do objeto, através da resolução do sistema (2.38). Para tanto, deve-se notar que, como definido na Figura 2.18, o centro óptico de cada câmera tem coordenadas (x_0 , y_0 , z_0) associadas a (u_0 , v_0), o que implica, apenas para este ponto, em $T_x = T_y = T_u = 0$, reduzindo a equação (2.38) a:

$$\begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_5 & L_6 & L_7 \\ L_9 & L_{10} & L_{11} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_4 \\ -L_8 \\ -1 \end{bmatrix}$$
 (2.39)

Ainda com base em (2.25), das expressões para L₉, L₁₀ e L₁₁ conclui-se que:

$$\frac{1}{D^2} \cdot (r_7^2 + r_8^2 + r_9^2) = L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2 = \frac{1}{D^2}$$
 (2.40)

Para compreensão da relação $r_7^2 + r_8^2 + r_9^2 = 1$ é conveniente explicitar os elementos que compõem a matriz de rotação R, em função dos ângulos α , β e γ de rotação em torno dos eixos x, y e z, respectivamente. A matriz de rotação R pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\beta \cdot \cos\gamma & \sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\alpha \cdot \sin\gamma & -\cos\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \sin\alpha \cdot \sin\gamma \\ -\cos\beta \cdot \sin\gamma & -\sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma + \cos\alpha \cdot \cos\gamma & \cos\alpha \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma + \sin\alpha \cdot \cos\gamma \\ -\sin\beta & -\sin\alpha \cdot \cos\beta & \cos\alpha \cdot \cos\beta \end{bmatrix}$$
(2.41)

A relação $r_7^2 + r_8^2 + r_9^2 = 1$ pode ser verificada a partir da última linha da matriz de rotação apresentada de forma explícita em (2.41), dado que $r_7 = sen\beta$, $r_8 = -sen\alpha \cdot cos\beta$ e $r_9 = cos\alpha \cdot cos\beta$. Analogamente, $r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 = 1$ e $r_4^2 + r_5^2 + r_6^2 = 1$. Estes resultados demonstram a propriedade de ortogonalidade da matriz de rotação. Também de (2.25), das equações para L₁, L₂, L₃, L₉, L₁₀ e L₁₁, obtém-se:

$$D \cdot (L_1 \cdot L_9 + L_2 \cdot L_{10} + L_3 \cdot L_{11}) = u_0 \cdot (r_7^2 + r_8^2 + r_9^2) + d_u \cdot (r_1 \cdot r_7 + r_2 \cdot r_8 + r_3 \cdot r_9)$$
 (2.42)

De (2.42) e (2.25) é possível depreender, então, que:

$$u_0 = \frac{L_1 \cdot L_9 + L_2 \cdot L_{10} + L_3 \cdot L_{11}}{L_0^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2}$$
 (2.43)

E, analogamente:

$$v_0 = \frac{L_5 \cdot L_9 + L_6 \cdot L_{10} + L_7 \cdot L_{11}}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2}$$
 (2.44)

Neste ponto, são conhecidos os parâmetros DLT, o valor de D definido em (2.18) e as coordenadas do centro óptico da câmera nos dois principais sistemas referenciais (SCP e SCO). A partir destes valores é possível determinar os demais parâmetros

envolvidos na calibração de câmeras, utilizando as expressões desenvolvidas anteriormente.

A partir das relações de L_9 , L_{10} e L_{11} dadas em (2.25) e da equação para D em (2.27), é possível também determinar os valores de r_7 , r_8 e r_9 .

Por outro lado, a ortogonalidade da matriz de rotação, juntamente com as equações para L_1 , L_2 e L_3 , permite a determinação do valor de d_u . Da mesma maneira, com as equações para L_5 , L_6 e L_7 , calcula-se d_v . Ou seja:

$$d_{u}^{2} = \frac{(u_{0} \cdot L_{9} - L_{1})^{2} + (u_{0} \cdot L_{10} - L_{2})^{2} + (u_{0} \cdot L_{11} - L_{3})^{2}}{L_{9}^{2} + L_{10}^{2} + L_{11}^{2}}$$

$$d_{v}^{2} = \frac{(v_{0} \cdot L_{9} - L_{5})^{2} + (v_{0} \cdot L_{10} - L_{6})^{2} + (v_{0} \cdot L_{11} - L_{7})^{2}}{L_{9}^{2} + L_{10}^{2} + L_{11}^{2}}$$
(2.45)

Cabe salientar que d_u e d_v estão relacionados aos fatores de escala s_u e s_v , respectivamente nas direções u e v. Esses fatores são expressos pelo números de *pixels* por unidade métrica de comprimento e são facilmente obtidos com a definição utilizada pelas câmeras em questão. A equação apresentada em (2.26) permite, então, determinar a distância focal da câmera em questão.

As relações encontradas para d_u e d_v possibilitam, agora, a determinação de todos os elementos da matriz de rotação [R], através das equações para L_1 , L_2 , L_3 , L_5 , L_6 e L_7 . Dessa forma, [R] é dada por:

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} = D \cdot \begin{bmatrix} \frac{u_0 \cdot L_9 - L_1}{d_u} & \frac{u_0 \cdot L_{10} - L_2}{d_u} & \frac{u_0 \cdot L_{11} - L_3}{d_u} \\ \frac{v_0 \cdot L_9 - L_5}{d_v} & \frac{v_0 \cdot L_{10} - L_6}{d_v} & \frac{v_0 \cdot L_{11} - L_7}{d_v} \\ L_{10} & L_{11} \end{bmatrix}$$
 (2.46)

Além disso, a partir das equações para L₄ e L₈ pode-se reescrever explicitamente a matriz de translação [T], definida em (2.8):

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_z \cdot u_0 - L_1 \cdot x_0 - L_2 \cdot y_0 - L_3 \cdot z_0 - L_4 \cdot D \\ T_z \cdot v_0 - L_5 \cdot x_0 - L_6 \cdot y_0 - L_7 \cdot z_0 - L_8 \cdot D \end{bmatrix}$$
(2.47)

Com T_z dado por:

$$T_z = D \cdot (x_0 \cdot L_9 + y_0 \cdot L_{10} + z_0 \cdot L_{11} + 1) \tag{2.48}$$

Com isso, ficam determinados todos os parâmetros intrínsecos e extrínsecos das câmeras, pondo fim à discussão teórica sobre o processamento de imagens. Enfatize-se apenas que, embora apresentada uma fundamentação teórica detalhada sobre o assunto, o processamento digital de imagens, no que concerne ao escopo do presente trabalho, é apenas uma ferramenta para o objetivo primeiro que é o estudo de tópicos relacionados à Estática e Dinâmica de linhas sob configuração de catenária, cujos fundamentos teóricos são abordados a seguir.

2.5 A CATENÁRIA

O objetivo desta seção é deduzir a expressão analítica para a função z = f(x) que tem como gráfico a curva plana conhecida como catenária, cuja importância é fundamental para o estudo estático e dinâmico de linhas. De maneira geral, essas estruturas se apresentam sob três possíveis configurações nas aplicações oceânicas, as quais podem ser visualizadas na Figura 2.20.

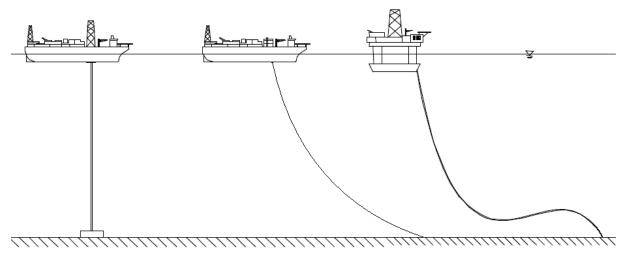


Figura 2.20: Configurações de *risers*: (a) vertical; (b) catenária livre; (c) catenária complexa. Extraída de Martins (2008). Fonte original: DNV-OS-F201 (2001).

Dentre as disposições que essas linhas podem assumir, a catenária livre é, sem dúvida, uma das mais relevantes em termos de aplicações.

Em termos matemáticos, a catenária é a família de curvas planas semelhantes às que podem ser visualizadas, por exemplo, quando uma corda flexível é presa pela suas extremidades entre dois pontos fixos, permanecendo sujeita apenas à ação do campo gravitacional local.

A abordagem para determinar a forma exata da catenária consiste em estabelecer as condições de equilíbrio estático da linha a partir de alguns poucos parâmetros físicos e geométricos, cujo desenvolvimento é descrito a seguir.

2.5.1 Equilíbrio estático de uma corda flexível suspensa entre dois pontos

O primeiro passo para o estudo da geometria da curva denominada catenária é a escolha de um sistema de coordenadas cartesiano adequado. Neste caso, o eixo vertical z é tal que coincide com o eixo de simetria da corda, explicitando o fato de que a função f(x) é par, ou seja, f(-x) = f(x). O eixo das abscissas é posicionado de maneira a permanecer paralelo à reta que tangencia o ponto mais baixo da corda e que passará a ser denominado por P_0 . A Figura 2.21 ilustra essa situação. Os eixos cartesianos estão posicionados como descrito.

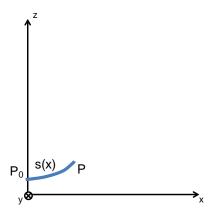


Figura 2.21: Configuração de catenária de uma linha. Elaboração própria.

Tomando-se um ponto arbitrário P = (x, 0, z) da curva, diferente de $P_0 = (0, 0, k)$, o comprimento do arco entre esses dois pontos será denotado por s = s(x). A corda é suposta homogênea, com peso linear (peso por unidade de comprimento) μ .

Desta forma, a porção de corda situada entre os pontos P_0 e P estará em equilíbrio estático devido à ação de três forças:

- i. o peso µ.s;
- ii. a tensão T_0 em P_0 ;
- iii. a tensão T em P, de direção tangente à curva, devido à premissa inicial de flexibilidade da corda.

O diagrama de corpo livre e a representação vetorial do equilíbrio deste sistema de forças estão ilustrados na Figura 2.22 a seguir.

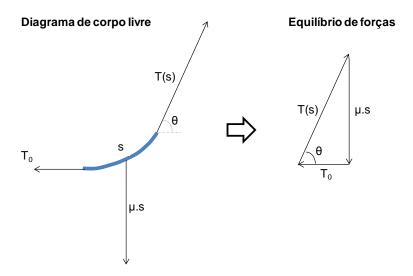


Figura 2.22: Diagrama de corpo livre em uma linha em catenária. Elaboração própria.

2.5.2 Formulação da catenária

Denominando por θ o ângulo determinado pelo eixo das abscissas e a direção tangente à catenária em um ponto arbitrário P da catenária, conforme a Figura 2.22, o equilíbrio estático determina que:

$$T(s) \cdot sen\theta = \mu \cdot s$$

 $T(s) \cdot cos\theta = T_0$ (2.49)

De onde se pode concluir que $tg\theta=\frac{\mu\cdot s}{T_0}$. Por concisão, foi utilizada a notação θ ao invés de $\theta(s)$ que é a nomenclatura matemática formal para o ângulo entre a tangente à linha e a horizontal.

Assim, se z = f(x) é a função par, de classe C^2 , que se quer determinar e cuja representação gráfica é a catenária, verifica-se que:

$$f'(x) = tg\theta = \frac{\mu}{T_0} \cdot s(x) \tag{2.50}$$

A definição de comprimento de arco mostra que:

$$s(x) = \int_{0}^{x} \sqrt{1 + [f'(t)]^2} dt$$
 (2.51)

Substituindo-se (2.51) em (2.50) obtém-se:

$$f'(x) = \frac{\mu}{T_0} \cdot \int_0^x \sqrt{1 + [f'(t)]^2} dt$$
 (2.52)

E, usando o Teorema Fundamental do Cálculo:

$$f''(x) = \frac{\mu}{T_0} \cdot \sqrt{1 + [f'(x)]^2}$$
 (2.53)

Essa expressão é uma equação diferencial cuja solução é a função que se quer determinar. Tomando $a=\frac{\mu}{T_0}$ e g(x)=f'(x) em (2.53), obtém-se:

$$\frac{g'(x)}{\sqrt{1 + [g(x)]^2}} = a \tag{2.54}$$

Integrando-se a expressão anterior e verificando que P_0 é mínimo local (o que leva ao fato de que g(0) = 0), tem-se que:

$$ln\left[g(x) + \sqrt{1 + [g(x)]^2}\right] = a \cdot x$$
 (2.55)

Ou ainda,

$$g(x) + \sqrt{1 + [g(x)]^2} = e^{a \cdot x}$$
 (2.56)

Como f(x) é par e g(x) = f'(x), conclui-se que g(x) é impar. Logo, g(-x) = -g(x). Assim,

$$-g(x) + \sqrt{1 + [g(x)]^2} = e^{-a \cdot x}$$
 (2.57)

Subtraindo-se (2.57) de (2.56), chega-se a:

$$g(x) = f'(x) = \frac{e^{a \cdot x} - e^{-a \cdot x}}{2} = \operatorname{senh}(a \cdot x)$$
 (2.58)

E, finalmente, a integração de (2.58) leva à expressão da função procurada:

$$f(x) = \frac{1}{a} \cdot \cosh(a \cdot x + C) + k \tag{2.59}$$

onde C e k são constantes de integração a serem determinadas a partir das condições de contorno de uma dada linha. Essas constantes, além do coeficiente "a" apresentado anteriormente, serão denominadas a partir deste ponto de "parâmetros livres da catenária".

As seções 2.6 e 2.7, que se seguem, tratam, respectivamente, da estática e dinâmica de linhas sob configuração inicial de catenária.

2.6 ESTÁTICA DE LINHAS EM CATENÁRIA

A formulação inicial do problema de uma linha sob configuração de catenária foi feita a partir das considerações apresentadas na seção 2.5, cuja descrição matemática não levou em conta os aspectos físicos pormenorizados de uma linha real, partindo apenas de poucos fundamentos físicos e geométricos específicos. Características como curvaturas, ângulos e tensões apresentados pela linha, condições de lançamento da mesma e suas rijezas axial e flexional foram propositadamente suprimidas a fim de simplificar o problema.

A presente seção busca dar um sentido físico mais completo à mecânica de linhas em catenária, através de um estudo mais aprofundado de sua estática, correlacionando os aspectos citados com a equação obtida matematicamente. O detalhamento é feito de maneira sistemática, visando dar suporte aos resultados perseguidos nos experimentos descritos nos Capítulos 4 e 5.

O estudo que se segue trata de linhas que apresentam dois trechos distintos: um que permanece assentado ao leito marinho e outro suspenso que se configura, em determinadas situações, como uma catenária. Conforme ilustrado na Figura 2.23, é possível visualizar uma região de extremo interesse para a mecânica de linhas: o TDP, definido como o ponto de contato da linha com o leito marinho. A rigor, dadas as características dinâmicas, não existe um único ponto contato, mas sim uma região de pontos (TDZ); porém, a fim de manter a nomenclatura usual, o presente texto utilizará essa terminologia.

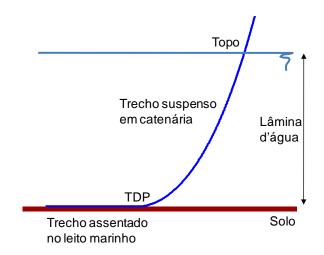


Figura 2.23: Trechos de uma linha em catenária. Elaboração própria.

Buscando desenvolver a base física para entendimento da linha como um cabo submerso, analisando os aspectos relacionados à sua estática, considere-se uma linha elástica como aquela apresentada na Figura 2.23.

Sobre a linha em questão atuam seu peso próprio, além de possíveis esforços devidos à correnteza, forças resultantes do campo de pressões hidrostáticas a que está submetida e um movimento harmônico no topo devido à ação de ondas locais sobre a unidade flutuante à qual está conectada. A Figura 2.24 ilustra esta situação, na qual L é representa o comprimento total, L_C o comprimento suspenso e L' o comprimento que repousa sobre o solo, de forma que $L = L_C + L'$. Nesta mesma figura, z(s) corresponde à cota vertical do elemento de linha de comprimento infinitesimal ds e H é a lâmina d'água. Além disso, supõe-se que a incidência de corrente atua apenas no plano da linha (carregamento plano).

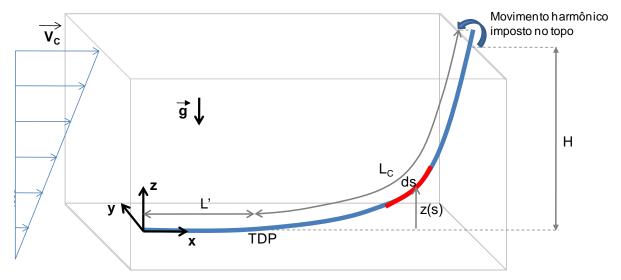


Figura 2.24: Esforços atuantes sobre uma linha submersa. Elaboração própria.

Os esforços atuantes sobre o elemento de comprimento infinitesimal da linha considerada podem ser visualizados na Figura 2.25, onde não estão indicados explicitamente os efeitos hidrodinâmicos de correnteza ou esforços no topo da linha.

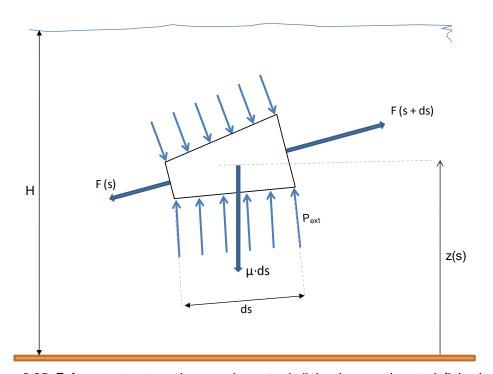


Figura 2.25: Esforços atuantes sobre um elemento de linha de comprimento infinitesimal. Elaboração própria, adaptado de Pesce (1997).

Quanto aos esforços atuantes sobre esse elemento de linha pode-se afirmar que:

• Peso próprio $\overrightarrow{P_e}$ do elemento de linha:

$$\overrightarrow{P_e} = \overrightarrow{\mu} \cdot ds \tag{2.60}$$

onde $\vec{\mu}$ é o peso específico do elemento de linha, ou seja, o peso próprio desse elemento por unidade de comprimento.

• Empuxo e tração efetiva:

Ao se analisar um trecho infinitesimal da linha, suas faces extremas apresentam-se como seções (circulares) abertas, não atuando sobre elas a pressão hidrostática. A fim de dar maior compreensão física ao equilíbrio de forças sobre o elemento de linha considerado, a Figura 2.26 ilustra um procedimento que permite explicitar a influência do empuxo e a definição de tração efetiva.

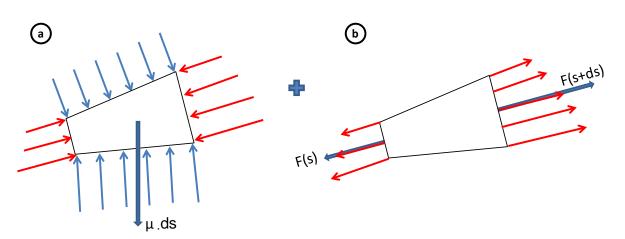


Figura 2.26: Modificação nos esforços atuantes sobre o elemento de linha para consideração do empuxo atuante e definição de tração efetiva.

Em (a), a adição de um campo de pressões. Em (b), correção do equilíbrio pela subtração do mesmo campo de pressões.

Elaboração própria, adaptado de Pesce (1997).

O procedimento ilustrado na Figura 2.26 consiste em:

- (a) Completar artificialmente o campo de pressões sobre o elemento, como se esse campo atuasse sobre toda a superfície do mesmo (em vermelho, na figura). Convém citar que o empuxo é definido como a integral desse campo de pressões sobre a superfície do elemento (Figura 2.27 a);
- (b) Adicionar ao elemento um campo de pressões contrário ao anterior. Este último, integrado sobre as faces não expostas do tubo e somado adequadamente às trações F(s) e F(s+ds) atuantes nestas seções, resulta nas chamadas trações efetivas T_{ef} (Figura 2.27 b), de maneira que:

$$T_{ef}(s) = F(s) + F'(s)$$
 (2.61)

onde $F'(s) = \gamma_a \cdot S(s) \cdot [H - z(s)]$, γ_a é o peso específico do meio circundante e S(s) é a área da seção circular em s = s(x). Formulação similar pode ser feita para a extremidade em s + ds.

Cabe salientar que, de acordo com Pesce (1997), "é a tração efetiva, e não a tração solicitante que determina, do ponto de vista estrutural, a configuração de equilíbrio estático e rege a rigidez geométrica da linha a deslocamentos transversais, esta última a principal condicionante de sua resposta dinâmica".

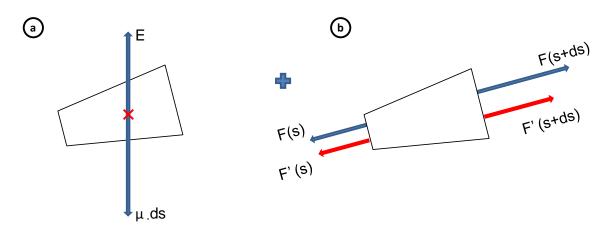


Figura 2.27: Resultantes dos esforços aplicados sobre um elemento de linha. Elaboração própria, adaptado de Pesce (1997).

• Esforços devidos à correnteza:

Shiguemoto *et al.* (2007) *apud* Chakrabarti (1987) cita que, "como uma linha submersa pode ser considerada um elemento esbelto que não apresenta efeitos de difração, as forças hidrodinâmicas $\overrightarrow{F_H}$ atuantes sobre ele podem ser calculadas através da Equação de Morison", dadas por:

$$dF_H = C_M \cdot \frac{\gamma_a}{g} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{d\vec{U}}{dt} \cdot ds + \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \frac{\gamma_a}{g} \cdot D \cdot |\vec{U}| \cdot \vec{U} \cdot ds$$
 (2.62)

onde C_M e C_D são, respectivamente, os coeficientes inercial e de arrasto, D é o diâmetro externo da linha e \vec{U} é a velocidade do escoamento incidente.

Cabe citar que é prática comum a decomposição do carregamento hidrodinâmico em duas parcelas: uma paralela ao eixo x, dada por $f_{cx} = \frac{F_H}{L_C} \cdot cos\theta$; e outra paralela ao eixo z, definida como $f_{cz} = \frac{F_H}{L_C} \cdot sen\theta$, relativamente ao sistema de coordenadas apresentado na Figura 2.24. Convém notar que essas duas componentes são dadas em unidades de força por comprimento.

Movimento imposto ao topo da linha:

A imposição de um movimento ao topo da linha corresponde à atuação de uma tração dinâmica neste ponto. Desta maneira, a força F(s) que aparece na Figura 2.25 incorpora, na realidade, duas componentes: uma tração estática T(s) e outra dinâmica $\tau(s)$. Analogamente, pode ser obtida uma expressão para F(s+ds).

$$F(s) = T(s) + \tau(s) \tag{2.63}$$

Após serem explicitados os carregamentos atuantes sobre um elemento de comprimento infinitesimal da linha em estudo, é possível estabelecer o

equacionamento estático da mesma. Assim, de $d\bar{s}$ é o comprimento deformado desse elemento de linha e considerando que esta possua comportamento linear, bem como seja feita de material elástico, isotrópico e homogêneo (portanto, sujeita à Lei de Hooke), segue que:

$$d\bar{s} = (1 + \varepsilon) \cdot ds \tag{2.64}$$

onde ε corresponde à elongação percentual sofrida pelo elemento de linha deformado, devida aos esforços atuantes.

A Figura 2.28 evidencia as forças atuantes sobre um elemento de linha deformado, a partir dos esforços explicitados anteriormente nesta mesma seção.

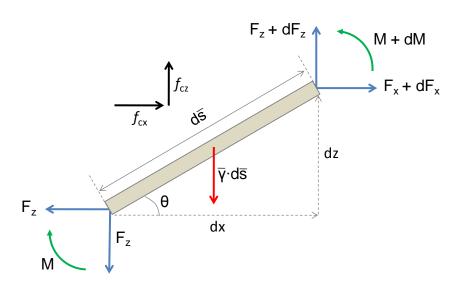


Figura 2.28: Esforços atuantes sobre um elemento de linha deformado. Elaboração própria., adaptado de Santos; Martins (1999).

As seções a seguir apresentam um desenvolvimento analítico dos equilíbrios que se estabelecem sobre elementos de linha, culminando em equacionamentos e discussões a partir de simplificações do modelo geral a ser determinado.

2.6.1 Equilíbrios de forças sobre um elemento de linha

Os equilíbrios estabelecidos a seguir não levam em consideração a movimentação tridimensional da linha devido a efeitos não-lineares, de modo que a mesma permaneça confinada ao plano xz.

Na direção horizontal (eixo x):

$$-F_x + F_x + dF_x + f_{cx} \cdot d\overline{s} = 0$$

$$\frac{dF_x}{d\bar{s}} = -f_{cx}$$

$$\frac{dF_x}{d\bar{s}} = \frac{dF_x}{ds} \cdot \frac{ds}{d\bar{s}} = -f_{cx}$$

$$\frac{dF_x}{ds} = -(1+\varepsilon) \cdot f_{cx} \tag{2.65}$$

• Na direção vertical (eixo z):

$$-F_z + F_z + dF_z + f_{cz} \cdot d\bar{s} - \bar{\gamma} \cdot d\bar{s} = 0$$

onde $\bar{\gamma} = \mu - \gamma_a = \gamma$.

$$-F_z + F_z + dF_z + f_{cz} \cdot \frac{d\overline{s}}{ds} \cdot ds - \gamma \cdot ds = 0$$

$$\frac{dF_z}{ds} = \gamma - (1+\varepsilon) \cdot f_{cz} \tag{2.66}$$

2.6.2 Equilíbrio de momentos sobre um elemento de linha

Considerando a extremidade superior do elemento como pólo para cálculo do equilíbrio dos momentos:

$$-M + M + dM - F_x \cdot dz + F_z \cdot dx - \bar{\gamma} \cdot d\bar{s} \cdot \frac{d\bar{s}}{2} + f_{cx} \cdot d\bar{s} \cdot \frac{dz}{2} - f_{cz} \cdot d\bar{s} \cdot \frac{dx}{2} = 0$$

Desprezando-se os termos de ordem superior:

$$dM = (1 + \varepsilon) \cdot (F_x \cdot dz - F_z \cdot dx) \tag{2.67}$$

2.6.3 Equações constitutivas

A deformação percentual ε, decorrente dos esforços axiais sobre a linha, é tal que:

$$\varepsilon = \frac{T}{EA} \tag{2.68}$$

onde o termo EA corresponde à rigidez axial da linha e $T = F_x \cdot cos\theta + F_z \cdot sen\theta$ é o esforço axial atuante sobre a linha.

Da Figura 2.28 depreendem-se as relações geométricas: $sen\theta = \frac{dz}{d\bar{s}} e \cos\theta = \frac{dx}{d\bar{s}}$.

Além disso, o momento-fletor é dado por:

$$M = \chi \cdot EI = \frac{d\theta}{dx} \cdot EI \tag{2.69}$$

onde El é a rigidez flexional da linha e $\chi = \chi(s)$ é a curvatura apresentada pela mesma em s = s(x).

A formulação apresentada ao longo deste capítulo foi desenvolvida a partir dos esforços atuantes estática e dinamicamente sobre uma linha submersa. Entretanto, para considerar apenas o equilíbrio estático da linha em questão é necessário que:

- não haja imposição de movimento ao topo da linha: $\tau(s) = 0$ implicando em F(s) = T(s);
- inexistam efeitos hidrodinâmicos devidos à correnteza, ou seja, $f_{c,x}=f_{c,z}=0$

Assim, aplicando essas considerações à Equação (2.65), conclui-se que:

$$\frac{dF_x}{ds} = -(1+\varepsilon) \cdot f_{cx} = 0 \tag{2.70}$$

Este resultado implica em F_x constante e recupera o conhecido resultado de invariância da componente horizontal da tração, ou seja, $F_x = T_0 = constante$.

De (2.66), obtém-se:

$$\frac{dF_z}{ds} = \gamma - (1 + \varepsilon) \cdot f_{cz} = \gamma \tag{2.71}$$

o que leva a $F_z = \gamma \cdot s$, que é a expressão para o peso próprio submerso da linha.

Os momentos aplicados podem ser calculados a partir de (2.67), considerando-se os resultados obtidos em (2.70) e (2.71).

2.6.4 Simplificações do modelo

Uma primeira simplificação que pode ser feita é a consideração de ausência de momentos aplicados. Das relações trigonométricas implícitas na Figura 2.28 e dos resultados advindos de (2.70) e (2.71), resulta que:

$$\frac{dz}{dx} = tg(\theta(s)) = \frac{\gamma \cdot s}{T_0}$$
 (2.72)

A equação (2.72) recupera (2.50), desde que se assuma que a linha não se encontra submersa ($\gamma = \mu$), e mostra que a mesma, sob as condições discutidas nesta seção e sob hipótese de inexistência de momentos distribuídos, assume estaticamente configuração de catenária.

De acordo com Pesce (1997), a ausência de momentos distribuídos implica no fato de que "o efeito da rigidez flexional é considerado desprezível face à rigidez geométrica". Pesce (1997) cita, ainda, que essa suposição é considerada válida nos casos em que o comprimento flexural λ , definido por $\lambda = \sqrt{\frac{EI}{T_0}}$, é tal que $\left(\frac{\lambda}{L_C} \right)^2 \ll 1$.

Simplificações adicionais podem ser feitas com base em hipóteses sobre as rijezas axial (EA) e flexional (EI) da linha.

2.6.4.1 Fio inextensível sem correnteza

A hipótese de inextensibilidade é equivalente à consideração de rigidez axial elevada (EA $\rightarrow \infty$, o que implica em $\epsilon \rightarrow 0$ e, portanto, $d\bar{s} \approx ds$). Por ora, será desconsiderada a rigidez flexional da linha (EI = 0).

Pela definição de catenária dada em (2.59) e aqui repetida por conveniência, $z(x) = \frac{T_0}{\gamma} \cdot \cosh\left(\frac{\gamma}{T_0} \cdot x + C\right) + k$, com as constantes de integração C e k a serem determinadas dadas as condições de contorno. Além disso, derivando-se essa última relação com respeito a x, determina-se a declividade da catenária que é dada por $\frac{dz}{dx} = \sinh\left(\frac{\gamma}{T_0} \cdot x + C\right)$.

As condições de contorno sobre a linha impõem que no TDP, onde s(x) = 0, z(0) = 0 e z'(0) = 0, o que implica em C = 0 e $k = -\frac{T_0}{\gamma}$. Dessa forma, a equação desta catenária, de importância elevada para as aplicações oceânicas, assume a seguinte forma:

$$z(x) = \frac{T_0}{\gamma} \cdot \left[\cosh\left(\frac{\gamma}{T_0} \cdot x\right) - 1 \right]$$
 (2.73)

Essa equação para a catenária pode ser descrita em função da coordenada curvilínea s, dadas as seguintes considerações geométricas:

$$sen\theta = \frac{dz}{ds} = \frac{T_0}{T(s)} = \frac{T_0}{\sqrt{T_0^2 + (\gamma \cdot s)^2}}$$

$$cos\theta = \frac{dx}{ds} = \frac{\gamma \cdot s}{T(s)} = \frac{\gamma \cdot s}{\sqrt{T_0^2 + (\gamma \cdot s)^2}}$$
(2.74)

As equações dadas por (2.74), integradas sob as condições x(0) = 0 e z(0) = 0, levam à equação da catenária em função de s:

$$x(s) = \frac{T_0}{\gamma} \cdot asinh\left(\frac{\gamma}{T_0} \cdot s\right)$$

$$z(s) = \frac{T_0}{\gamma} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\gamma}{T_0} \cdot s\right)^2 - 1}$$
(2.75)

Cabe salientar que a determinação da equação analítica que rege a estática de uma linha em catenária, segundo se pode depreender da Equação (2.72), é dependente de dois parâmetros: o ângulo com o topo e a tração horizontal, os quais guardam uma relação de interdependência. Desta maneira, os dados físicos e geométricos de uma linha lançada sob configuração de catenária direta não são por si mesmos suficientes para o estabelecimento unívoco de sua equação analítica, sendo necessário um algoritmo iterativo para sua determinação.

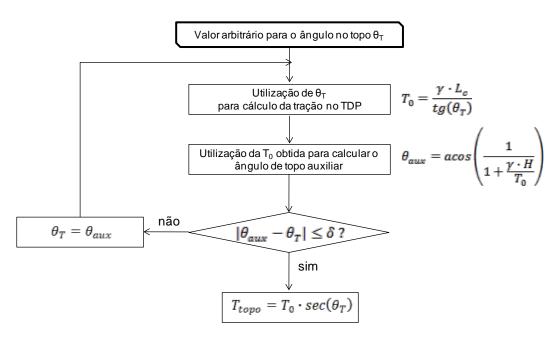


Figura 2.29: Fluxograma de procedimento iterativo para determinação da equação que rege a estática de uma linha em catenária.

A Figura 2.29 ilustra um exemplo de procedimento iterativo para determinação da equação de catenária, dada uma estimativa inicial para o ângulo de topo. Pelo fluxograma ilustrado, a tração horizontal é então calculada e utilizada para a

determinação do próprio ângulo de topo, a partir de diferentes equações. Os ângulos arbitrado e calculado são comparados. Se a diferença entre eles for menor que um certo valor δ, determinado *a priori*, o processo para e os demais parâmetros são calculados. Caso contrário, o ângulo calculado é utilizado como passo inicial da próxima iteração.

2.6.4.2 Fio extensível sem correnteza

A segunda simplificação que pode ser feita ao equacionamento geral desenvolvido desconsidera, ainda, a rigidez flexional EI. O objetivo, agora, é analisar os efeitos da rigidez axial sobre a linha. Assim, da geometria da linha deformada segue que:

$$sen\theta = \frac{dz}{d\bar{s}} = \frac{dz}{ds} \cdot \frac{ds}{d\bar{s}}$$
 (2.76)

$$\cos\theta = \frac{dx}{d\bar{s}} = \frac{dx}{ds} \cdot \frac{ds}{d\bar{s}} \tag{2.77}$$

Por outro lado, a consideração da extensibilidade da linha leva às seguintes relações:

$$\frac{dz}{ds} = (1+\varepsilon) \cdot sen\theta \tag{2.78}$$

$$\frac{dx}{ds} = (1 + \varepsilon) \cdot \cos\theta \tag{2.79}$$

onde ε foi definido anteriormente pela Equação (2.68).

Como decorrência da própria geometria da linha e das Equações (2.70) e (2.77):

$$\frac{dF_x}{ds} = \frac{d}{ds} (T \cdot \cos\theta) = 0 \tag{2.80}$$

Analogamente, a partir de (2.71) e (2.76):

$$\frac{dF_z}{ds} = \frac{d}{ds} (T \cdot sen\theta) = \gamma \tag{2.81}$$

Sob as seguintes condições de contorno:

- A origem do sistema de coordenadas encontra-se no TDP, onde é exigida a condição de tangência nula da linha com relação ao solo. Assim, x(0) = 0, z(0) = 0 e θ(0) = 0.
- As projeções horizontal e vertical do trecho suspenso da linha são simbolizadas, respectivamente, por D_x e H. Esta última é denominada de lâmina d'água, nas aplicações oceânicas. Assim, no topo da linha, x(L_c) = D_x e z(L_c) = H.

Da integração da Equação (2.80) recupera-se o resultado de tração horizontal constante:

$$F_x = T \cdot cos\theta = constante$$
 (2.82)

E integrando em s a Equação (2.81):

$$T \cdot sen\theta = \gamma \cdot s \tag{2.83}$$

O par de equações (2.82) e (2.83) são idênticos aos resultados decorrentes das equações (2.70) e (2.71), apresentadas para o caso inextensível. A aplicação destes resultados, conjuntamente à equação constitutiva dada pela Equação (2.68), às equações (2.78) e (2.79), implica respectivamente em:

$$\frac{dz}{ds} = \frac{\gamma \cdot s}{T} \cdot (1 + \frac{T}{EA}) \tag{2.84}$$

$$\frac{dz}{ds} = \frac{T_0}{T} \cdot (1 + \frac{T}{EA}) \tag{2.85}$$

Por outro lado, das relações geométricas que se pode deduzir a partir da Figura 2.22, tem-se que $T^2 = T_0^2 + (\gamma \cdot s)^2$. A aplicação desta última às equações (2.84) e (2.85), seguidas de integração algébrica e aplicação das condições de contorno no topo e no TDP levam às seguintes equações para as projeções vertical e horizontal do trecho suspenso da linha:

$$H = \frac{\gamma \cdot L_c^2}{2 \cdot EA} + \frac{1}{\gamma} \cdot (T(L_c) - T_0))$$
 (2.86)

$$D_x = \frac{T_0 \cdot L_c}{EA} + \frac{T_0}{\gamma} \cdot asenh(\frac{\gamma \cdot L_c}{T_0})$$
 (2.87)

2.6.4.3 Importância da rigidez flexional

Um ponto interessante a ser explorado refere-se à importância da rigidez flexional da linha, principalmente com relação aos seus efeitos sobre a dinâmica do *touchdown point*. Cabe salientar que é comum analisar esse efeito a partir da relação existente entre a rigidez flexional EI e a restauração da linha devida à tração. O objetivo deste item é analisar essa relação.

Foi discutido no item 2.6.4.1 que as equações que caracterizam a linha, para o caso inextensível, são dadas pelo conjunto apresentado em (2.88).

$$\frac{dx}{ds} = \cos\theta$$

$$\frac{dz}{ds} = \sin\theta$$

$$\frac{dF_x}{ds} = -q_x$$

$$\frac{dF_z}{ds} = -q_z$$

$$\frac{dM}{ds} = F_x \cdot \sin\theta - F_z \cdot \cos\theta$$

$$M = EI \cdot \frac{d\theta}{ds}$$
(2.88)

onde q_x e q_z são carregamentos genéricos nas direções x e z, respectivamente. Esses carregamentos englobam todos os efeitos possíveis, impostos à linha. No caso específico deste trabalho, estes se relacionam diretamente ao movimento de topo prescrito à linha.

Derivando a última das equações de (2.88) com respeito a s e utilizando a penúltima equação desse conjunto, chega-se à seguinte equação diferencial:

$$EI \cdot \frac{d^2\theta}{ds^2} = F_x \cdot sen\theta - F_z \cdot cos\theta \tag{2.89}$$

Derivando (2.89), com relação a s:

$$EI \cdot \frac{d^3\theta}{ds^3} = \left(\frac{dFx}{ds}\right) \cdot sen\theta - \left(\frac{dFz}{ds}\right) \cdot cos\theta + (F_x cos\theta - F_z sen\theta) \cdot \frac{d\theta}{ds}$$
 (2.90)

Utilizando, agora, os equilíbrios de forças nas direções x e z, apresentados no conjunto de equações (2.88):

$$EI \cdot \frac{d^3\theta}{ds^3} = -q_x \cdot sen\theta - q_z \cdot cos\theta + (F_x cos\theta - F_z sen\theta) \cdot \frac{d\theta}{ds}$$
 (2.91)

É possível reescrever a equação (2.91) em termos dos esforços normais à linha. Para tanto, considere-se a equação apresentada após (2.68), repetida aqui por conveniência, que expressa a composição dos esforços axiais sobre um elemento de linha de comprimento ds: $T = F_x \cdot cos\theta + F_z \cdot sen\theta$. Considere-se, ainda, que $q_n = -q_x \cdot sen\theta + q_z \cdot sen\theta$ corresponde normal à parcela do carregamento total sobre a linha. Substituindo esses dois resultados na equação (2.91), chega-se a:

$$EI \cdot \frac{d^3\theta}{ds^3} - T \cdot \frac{d\theta}{ds} = q_n \tag{2.92}$$

No escopo da presente dissertação, o carregamento que se pretende impor à linha equivale à prescrição de um movimento harmônico ao seu topo, de maneira que é possível considerar a composição de seus efeitos na direção normal à linha, de maneira que se possa escrever que:

$$q_n = q_0 \cdot sen\left(\pi \cdot \frac{s}{L_c}\right) \tag{2.93}$$

Dessa forma, a equação (2.93) tem uma solução com a forma:

$$\theta(s) = \theta_0 \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{s}{L_c}\right) \tag{2.94}$$

Substituindo (2.94) em (2.92) chega-se à expressão:

$$\left[EI \cdot \left(\frac{\pi}{L_c}\right)^3 + T \cdot \frac{\pi}{L_c}\right] \cdot \theta_0 = q_0 \tag{2.95}$$

A expressão dada pela Equação (2.95) permite estabelecer globalmente a relação entre a rigidez flexional EI e a resultante dos esforços axiais dada pela tração T. Para tanto, é usual a definição do parâmetro adimensional β, tal que:

$$\beta = \frac{EI \cdot \left(\frac{\pi}{L_c}\right)^3}{T \cdot \frac{\pi}{L_c}} = \left(\frac{\pi}{L_c}\right)^2 \cdot \frac{EI}{T}$$
 (2.96)

Assim, a rigidez flexional da linha pode ser desprezada quando $\alpha \ll 1$, como é usual para *risers* e umbilicais. Entretanto, se o efeito global da rigidez flexional for desprezado a condição de contorno $\theta_0 = \theta(0) = 0$ não é mais satisfeita, o que implica em uma importância local para a rigidez flexional, nas proximidades do TDP. Para que a solução de (2.92) incorpore esse efeito, considere-se então que sua solução é dada pela soma de duas parcelas: uma θ_c , referente à solução da catenária (EI = 0) dada pela Equação (2.94); e outra θ_f que incorpora os efeitos locais da rigidez flexional. A consideração desses efeitos implica que a solução de (2.92) passa a ser dada por:

$$\theta(s) = \theta_c(s) + \theta_f(s) \tag{2.97}$$

Além disso, θ_f deve satisfazer a forma homogênea da Equação (2.92), sob a condições de contorno $\theta(s) = 0$, ou seja, $\theta_f(0) = -\theta_0$ e $\theta_f(s) \to 0$ para pontos afastados do TDP. Postas essas considerações, θ_f pode ser dado por:

$$\theta_f(s) = -\theta_0 \cdot e^{-\frac{s}{\lambda}} \tag{2.98}$$

Portanto, a solução para a Equação (2.92), que leva em consideração os efeitos locais e globais da rigidez flexional sobre a linha, pode ser dada por:

$$\theta(s) = \theta_0 \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{s}{L_c}\right) - \theta_0 \cdot e^{-\frac{s}{\lambda}} \tag{2.99}$$

Onde λ é o chamado comprimento de flexão dado por $\lambda = \sqrt{\frac{EI}{T_0}}$, definido no início da presente seção.

É importante notar que a solução (2.99) apresentada para a Equação (2.92) guarda informações importantes a respeito do efeito da rigidez flexional sobre a linha:

- Nas proximidades do TDP, onde≈s0 , a solução para θ(s) respeita a condição de contorno de tangência da linha no solo;
- O efeito da flexão permanece restrito às proximidades do TDP, dado que decai exponencialmente com o aumento da coordenada curvilínea s;
- Longe do TDP, a solução para θ(s) recupera a equação (2.94).

2.7 DINÂMICA DE LINHAS EM CATENÁRIA

O estabelecimento da estática de linhas sob configuração inicial de catenária é extremamente importante para a análise de suas respostas dinâmicas nos domínio do tempo e/ou da frequência, visto que, por sua complexidade, o problema dinâmico é geralmente resolvido a partir da introdução de perturbações à solução estática.

Como exemplos de métodos de resolução do problema dinâmico, podem ser citados: a determinação de soluções assintóticas, o uso de técnicas de camada-limite, Método dos Elementos Finitos e simulação através de conceitos de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD).

No que tange aos objetivos da presente dissertação, optou-se pela utilização do programa Anflex Multilines (da Petrobras). No ANEXO A, é possível encontrar uma breve introdução para o uso desse programa, extraído na íntegra do menu *Help* do próprio *software*.

A resolução do problema dinâmico através do Método dos Elementos Finitos implica na discretização da linha em N elementos. Assim, o problema é resolvido de forma discreta, utilizando elementos de 6N graus de liberdade (dois nós por elemento, cada qual com três translações e três rotações).

Em princípio, podem-se considerar para a análise dinâmica de linhas, esforços causados pela incidência de uma onda sobre a mesma e a atuação de um movimento de topo devido ao movimento da unidade flutuante. O equilíbrio das forças atuantes sobre a linha foi discutido anteriormente na seção 2.6, a partir do qual é possível obter a equação diferencial que rege o movimento do sistema.

Se $\vec{R}(s,t)$ for a resultante das forças externas atuantes sobre a linha, três componentes de forças podem surgir como resposta à essa excitação: uma de origem viscosa $\vec{F}_D(s,t)$, uma parcela de restauração $\vec{F}_S(s,t)$ e outra de inércia $\vec{F}_I(s,t)$, de maneira que:

$$\vec{F}_I(s,t) + \vec{F}_D(s,t) + \vec{F}_S(s,t) = \vec{R}(s,t)$$
 (2.100)

Por outro lado, a segunda Lei de Newton da Mecânica Clássica aponta para o fato da resultante das forças de inércia ser tal que:

$$\vec{F}_I(s,t) = (m+m_a) \cdot \ddot{\vec{u}}(s,t) \tag{2.101}$$

Onde, para este equacionamento, m é a massa do sistema, m_a sua respectiva massa adicional e \vec{u} é o deslocamento da linha, relativamente à sua posição de equilíbrio estático.

Considerando a linearização da força viscosa, de origem hidrodinâmica, é possível escrever:

$$\vec{F}_D(s,t) = c \cdot \dot{\vec{u}}(s,t) \tag{2.102}$$

Por fim, a força restauradora, diretamente proporcional ao deslocamento relativo, é dada por:

$$\vec{F}_S = k \cdot \vec{u}(S, t) \tag{2.103}$$

Assim, substituindo (2.101), (2.102) e (2.103) em (2.100), tem-se:

$$m \cdot \ddot{\vec{u}}(s,t) + c \cdot \dot{\vec{u}}(s,t) + k \cdot \vec{u}(s,t) = \vec{R}(s,t)$$
 (2.104)

A equação (2.104) é formulada para cada um dos elementos da linha discretizada. A solução dinâmica, portanto, implica na resolução de um sistema matricial com uma quantidade de equações igual ao número de elementos no qual a linha é subdividida.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme descrito na seção 1.2, o principal objetivo deste trabalho é a realização de experimentos físicos com linhas flexíveis lançadas sob configuração de catenária direta, submersas ou no ar, a fim de estudar seu comportamento estático e dinâmico através da imposição de movimentos em seu topo. A motivação fundamental reside no fato dessas estruturas serem amplamente utilizadas pela Engenharia Oceânica, citando-se, por exemplo, as linhas de amarração e os *risers*.

O presente capítulo tem por finalidade a apresentação dos materiais utilizados (seção 3.1) e os métodos empregados (seção 3.2), comuns a todos os ensaios realizados. Os aspectos particulares de cada experimento, detalhadamente descritos nos Capítulos 4 e 5, serão abordados oportunamente.

3.1 MATERIAIS

Dados os objetivos do presente trabalho, os ensaios realizados foram monitorados através de dois conjuntos de câmeras, aqui denominados <u>sistema convencional de câmeras</u> e <u>sistema comercial de câmeras</u>, descritos, respectivamente, nas seções 3.1.1 e 3.1.2.

Além disso, dada sua importância para os ensaios principais relacionados aos principais objetivos deste trabalho, também serão descritos neste capítulo a <u>linha flexível</u> (seção 3.1.3) empregada nos experimentos e o <u>dispositivo atuador</u> (seção 3.1.4) utilizado para imposição de movimentos ao topo daquela.

Conforme será exposto na seção 3.2, cada experimento concebido e executado possui peculiaridades intrínsecas aos seus fins particulares, ou seja, o conjunto de materiais e equipamentos não foi o mesmo em cada ensaio, a menos dos dois conjuntos de câmeras citados anteriormente e que serão descritos a seguir. Na introdução dos Capítulos 4 e 5, nos quais são minuciosamente expostos os ensaios físicos realizados, far-se-á uma descrição mais detalhada dos materiais específicos utilizados em cada experimento, dependendo do seu objetivo.

3.1.1 Sistema comercial de câmeras

O conjunto de câmeras aqui identificado como comercial é conhecido como um sistema de captura de movimentos composto de um conjunto de câmeras digitais capazes de identificar movimentos 2D ou 3D, através de transmissores e receptores de infravermelho. Para tanto, esse conjunto de câmeras é integrado a um *software* que permite análises em tempo real do movimento percebido por alvos passivos reflexivos posicionados no objeto de interesse. Nos casos de investigação tridimensional é imprescindível uma etapa preliminar de calibração que estabelece um volume de controle no qual o movimento pode ser identificado e mensurado com uma precisão calculada.

Ao longo desta seção, será apresentado o conjunto de equipamentos que compõe esse sistema, bem como os procedimentos necessários para calibração do mesmo.

3.1.1.1 As câmeras do sistema comercial

O sistema comercial utilizado neste trabalho é composto por duas câmeras digitais conectadas entre si e a um computador do tipo *laptop* no qual está instalado o *software* de análise em tempo real. Conforme mencionado anteriormente (seção 2.3) esse é número mínimo de câmeras necessário para mensurar movimentos tridimensionais. A Figura 3.1 apresenta uma das câmeras utilizadas, enquanto a Figura 3.2 ilustra um possível arranjo de montagem do sistema comercial.

O software de análise integrado às câmeras permite a impressão em arquivo digital das séries temporais de deslocamento, velocidade, aceleração, rotações e/ou ângulos, conforme a necessidade do usuário. No contexto do presente trabalho, salvo menção em contrário, as análises serão feitas a partir dos deslocamentos medidos por esse sistema.



Figura 3.1: Câmera do sistema comercial. Fonte: site do SISTEMA COMERCIAL DE CÂMERAS.

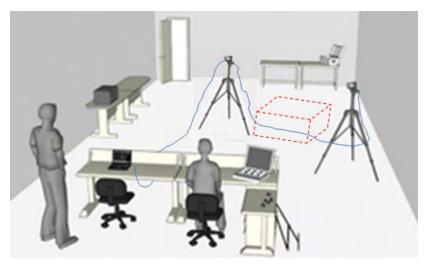


Figura 3.2: Esquema ilustrativo de montagem do sistema comercial. Em destaque o volume de calibração. Fonte: Adaptado de SISTEMA COMERCIAL DE CÂMERAS.

As especificações técnicas do modelo de câmera utilizado estão compiladas na Tabela 3.1 a seguir.

Tabela 3.1: Especificações técnicas das câmeras do sistema comercial.

Especificações	Descrição
Dimensões	(185 x 110 x 124)mm, 1,9kg
	Limiarização ajustável
Ângulo de visão da lente	40º (padrão)
Faixa do espectro de luz	Infravermelho
Sensor CMOS (pixels)	640 x 320
Taxa de aquisição máxima (fps ¹⁰)	250 na resolução máxima
Capacidade do <i>buffer</i> de vídeo	3800 <i>frames</i> na resolução máxima
	Abertura e foco ajustáveis

Vale reforçar que cada uma das câmeras possui um emissor e um receptor de radiação infravermelha.

3.1.1.2 Calibração do sistema comercial de câmeras

Previamente ao monitoramento, deve ser realizada uma etapa de calibração do sistema comercial de câmeras, a fim de definir o volume de controle no qual o software é capaz de identificar e mensurar movimentos tridimensionais. O processo de calibração do sistema comercial consiste em fixar uma estrutura de referência em formato de "L", ilustrada na Figura 3.3 – detalhe A, e movimentar ao seu redor um bastão de calibração em formato de "T" (Figura 3.3 – detalhe B). O paralelepípedo formado pelo plano que contém a estrutura de referência e as posições limites alcançadas pelo bastão de calibração delimita o volume de controle (em vermelho na Figura 3.3). Ambas as estruturas de calibração possuem alvos capazes de refletir a luz infravermelha. O fabricante recomenda que cada etapa de calibração dure pelo menos 10s.

¹⁰ fps é a sigla para *frames* por segundo.

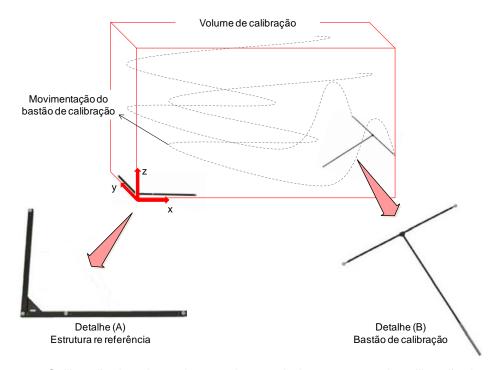


Figura 3.3: Calibração do volume de controle a partir das estruturas de calibração do sistema comercial de câmeras.

Elaboração própria.

Após a calibração das câmeras, o *software* calcula automaticamente a posição das mesmas em relação ao centro de coordenadas real fixado no ângulo reto da estrutura de referência. Esse sistema de coordenadas é uma base positiva, na qual o eixo x é paralelo ao maior lado da estrutura de referência e o eixo y é paralelo ao outro lado. No caso da Figura 3.3, o eixo z é perpendicular ao plano que contém os eixos x e y, com o sentido positivo dado pela "regra da mão direita". Além do estabelecimento do sistema de coordenadas e posição das câmeras com relação a este, o *software* determina o volume de controle. A Figura 3.4 apresenta a saída visual da calibração do sistema comercial pelo *software* integrado, na qual podem ser visualizados os eixos do sistema de referência adotado, os quatro alvos refletores posicionados sobre a estrutura de calibração e a posição das câmeras.

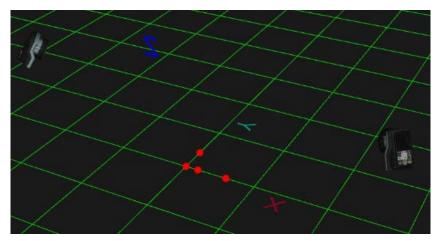


Figura 3.4: Calibração do sistema comercial de câmeras. Em vermelho, os alvos refletores posicionados na estrutura de calibração. Fonte: *Software* do sistema comercial de câmeras.

3.1.1.3 Monitoramento 3D pelo sistema comercial de câmeras

Depois de calibrado, o sistema comercial de câmeras possibilita a identificação e acompanhamento de movimentos dentro do volume de controle estabelecido. O erro associado às medições é da ordem de décimos de milímetros e é calculado automaticamente pelo *software* do sistema.

O monitoramento de um corpo através desse sistema é feito pelo rastreamento de alvos reflexivos fixados no objeto de interesse, capazes de refletir radiação infravermelha e, desta forma, captados pelas câmeras do sistema comercial. Esses alvos podem ser bidimensionais (fitas adesivas reflexivas) ou tridimensionais, que possuem diversos formatos, em geral esféricos, conforme ilustrado na Figura 3.5.



Figura 3.5: Alvos do sistema comercial de câmeras.

Assim, dado um corpo de interesse dotado de alvos reflexivos, seu movimento 3D pode ser acompanhado pelo sistema comercial de câmeras gerando como resultado as séries temporais (por exemplo, de deslocamento) desses alvos em cada uma das direções consideradas.

3.1.2 Sistema de câmeras convencionais

O sistema convencional de câmeras foi concebido pelo autor desta dissertação, com base nos fundamentos teóricos explicitados nas seções 2.1 a 2.4, ou seja, levando em consideração os aspectos teóricos de processamento e análise de imagens e vídeos digitais para a escolha das câmeras, das técnicas a serem empregadas e das rotinas numéricas necessárias para a tarefa de identificação de alvos e monitoramento do corpo de interesse através desses.

Assim como o sistema comercial de câmeras, o conjunto de monitoramento convencional é constituído de duas câmeras digitais coloridas, como as utilizadas em circuitos de segurança, conectadas a uma placa de aquisição de imagens instalada em um micro-computador. Rotinas numéricas, desenvolvidas em ambiente Matlab[®] pelo próprio autor, foram utilizadas para o processamento *offline* dos *frames* gerados pelo monitoramento. A seção 3.2 apresenta, em detalhes, a metodologia utilizada para ambos os sistemas de câmeras.

3.1.2.1 As câmeras do sistema de câmeras convencionais

As câmeras do sistema convencional trabalham nas bandas visíveis do espectro de energia eletromagnética e possuem como principais vantagens a facilidade de utilização, baixo custo relativo e grande oferta de marcas e modelos no mercado.

Apesar do modelo utilizado permitir filmagem colorida, optou-se pela utilização de monitoramento em escala de cinza. A Figura 3.6 ilustra o modelo de câmera utilizado nos ensaios e a Tabela 3.2 suas especificações técnicas.



Figura 3.6: Câmera do sistema convencional.

Tabela 3.2: Especificações técnicas das câmeras do sistema convencional.

Especificações	Descrição
<u>Câmeras</u>	
Dimensões	(75 x 50 x 58)mm, 0,305kg
Resolução	540 linhas em color, 600 linhas em P&B
	Controle automático de ganho
Sensor CCD color	1/3 "
Placa de Vídeo	
Taxa de aquisição máxima (fps)	16 canais, 120fps ^(*)
<u>Lentes</u>	
Foco ajustável	2,8mm a 12,0mm

^(*) Dos 16 canais, apenas 4 foram habilitados permitindo taxa de aquisição de 30fps.

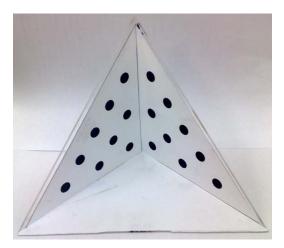
3.1.2.2 Calibração do sistema de câmeras convencionais

A calibração do sistema de câmeras convencionais consiste basicamente no emprego da Transformação Linear Direta, apresentada na seção 2.3, cujo produto é uma aplicação matemática que permite relacionar os sistemas de coordenadas de um objeto e sua respectiva imagem em *pixels*. Este método utiliza um determinado número de pontos de controle de um objeto de referência para efetuar a calibração

de uma região, sobre a qual poderá haver monitoramento de movimentos com a respectiva mensuração dos mesmos.

O objeto de referência a ser utilizado depende da extensão espacial da região que se quer calibrar. Para os Experimentos 1 e 2 foi utilizado como corpo de calibração a estrutura ilustrada à esquerda na Figura 3.7, composta por três faces triangulares, perpendiculares duas a duas, dotado de dezoito círculos pretos de 10,0mm de diâmetro, dispostos em dois conjuntos adjacentes de nove círculos, sobre um fundo branco. Para os demais ensaios realizados no âmbito desta dissertação, foi utilizada a estrutura apresentada à direita na Figura 3.7. Para efeitos de exemplificação dos procedimentos de calibração do conjunto de câmeras convencionais, será utilizado o primeiro dos corpos de referência.

Uma característica comum às estruturas de referência utilizadas é o contraste criado para facilitar a identificação das regiões escuras e sua segregação com relação ao restante da imagem, através dos procedimentos de morfologia matemática, dilatação e/ou erosão, limiarização automática pelo Método de Otsu, binarização e aplicação de filtro mediana. Salienta-se que cada imagem obtida pelo sistema de câmeras convencionais foi previamente processada para eliminação dos efeitos de distorção radial, conforme o procedimento descrito no item 2.3.1.2.



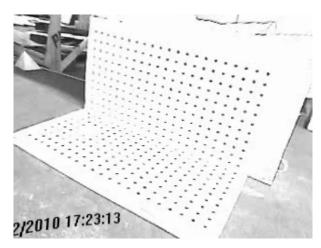


Figura 3.7: Corpos de referência utilizados na calibração das câmeras convencionais. À esquerda, a estrutura de calibração usada nos Experimentos 1 e 2. À direita, a empregada nos demais ensaios.

Como exemplo de resultado desta sequência de procedimentos, na Figura 3.8 é apresentada uma imagem com círculos brancos sob fundo preto, a partir da qual é possível a identificação do centro de área de cada círculo, ou seja, a determinação das coordenadas dos pontos de controle no sistema de coordenadas da imagem, em *pixels*. Cabe ressaltar que, conforme explicitado nas seções 2.4.1 e 2.4.2, são necessários, no mínimo, seis pontos de controle para calibração de câmeras utilizando o Método DLT. Um número maior de pontos de controle é, em geral, empregado a fim de gerar redundância de informações e aumentar a precisão da calibração.

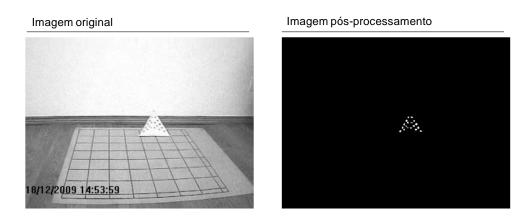


Figura 3.8: Exemplo de identificação dos pontos de controle presentes em uma estrutura de calibração, através de técnicas de processamento de imagem.

Esse processo é aplicado a todos os *frames* de calibração obtidos a partir das duas câmeras. Além disso, a localização espacial real de cada ponto de controle é conhecida dado que seu posicionamento é controlado, instante a instante, através do *grid* sob o qual se encontra. Portanto, para cada posição do corpo de calibração, torna-se automática a determinação das coordenadas de cada um desses dezoitos pontos de controle no sistema de referência do objeto.

Com isso, para cada câmera, *frame* a *frame*, estão determinadas as coordenadas dos pontos de controle nos sistemas de referências da imagem em *pixels* e do objeto, condição necessária e suficiente para a determinação dos parâmetros DLT apresentados na seção 2.4.1. O cálculo destes parâmetros, através da resolução do

sistema de equações (2.28) apresentado na página 44, estabelece de maneira unívoca a transformação entre esses sistemas de coordenadas, o que corresponde à chamada calibração de câmeras.

Cabe salientar que o volume de controle calibrado corresponde à região coberta pelas consecutivas posições do corpo de referência, conforme pode ser visualizado na Figura 3.9, onde em verde estão representadas as sucessivas posições do corpo de calibração, sendo a primeira delas na origem do sistema de referências da figura e as demais consecutivamente na direção paralela ao eixo y, em seu sentido crescente. O volume de controle calibrado aparece esquematicamente na Figura 3.9, em vermelho tracejado.

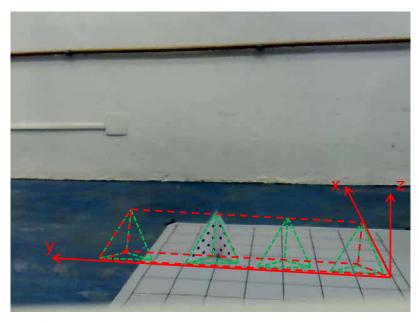


Figura 3.9: Definição do volume de controle calibrado, a partir da movimentação da estrutura de calibração.

Por fim, cabe citar que o processo de calibração é sucedido pela reconstrução tridimensional, utilizando as coordenadas dos próprios pontos de controle. Em tese, a utilização destes pontos na reconstrução 3D deveria resultar nas coordenadas reais dos mesmos, no sistema de referências do objeto. Entretanto, conforme citado anteriormente nesta seção, essas coordenadas são conhecidas. Esse procedimento

é utilizado para fins de comparação e avaliação do erro médio proveniente da calibração de câmeras, em cada ensaio.

3.1.2.3 Monitoramento 3D pelo sistema de câmeras convencionais

O monitoramento pelo sistema de câmeras convencionais é análogo ao realizado pelo sistema comercial, descrito na página 84, embora neste caso a análise não seja automática. O acompanhamento dos ensaios, utilizando as câmeras digitais convencionais, gera um vídeo que deve ser tratado a fim de isolar os alvos correspondentes do restante do *frame*. Para tanto, o contraste entre esses e o restante da imagem é uma condição imprescindível.

Após a geração de uma imagem binária contendo apenas os alvos e o *background*, utilizando os mesmos procedimentos descritos no item 3.1.2.2, são calculados os centros de área de cada alvo, no sistema de coordenadas da imagem em *pixels*. A seguir, os parâmetros DLT obtidos na calibração das câmeras são utilizados para a reconstrução tridimensional do objeto de interesse, utilizando o sistema de equações apresentado na seção 2.4.2, de modo a calcular as coordenadas dos alvos no sistema de referências real (ou do objeto).

Esse processamento é feito *offline*, ou seja, após a obtenção dos vídeos de monitoramento de cada ensaio. As análises feitas a partir daí dependem do objetivo específico de cada experimento e estão descritas nos respectivos capítulos.

Isto posto, a seção 3.2 se destina a estabelecer a metodologia que será empregada nos ensaios a fim de confrontar os resultados advindos das abordagens empregadas, utilizando os dois sistemas de câmeras e simulações numéricas e/ou resultados analíticos constantes na literatura especializada.

3.1.3 Linha flexível utilizada nos experimentos

Em todos os experimentos realizados no âmbito deste trabalho a fim de estudar a estática e o comportamento dinâmico de linhas lançadas em catenária, foi utilizada

uma mesma linha flexível, cujas principais características físicas encontram-se compiladas na Tabela 3.3. Cabe salientar que o interior dessa linha flexível foi preenchido com areia fina e as características físicas apresentadas levam esse fato em consideração essa informação.

Relativamente aos dados apresentados na Tabela 3.3, é importante citar que o comprimento da linha foi medido com uma trena (precisão de 0,5mm) e sua massa foi medida com o uso de uma balança de precisão 5g. As demais medidas métricas foram obtidas com uso de paquímetro. As rijezas axial e flexional foram avaliadas a partir de ensaios simples com massas padronizadas.

Tabela 3.3: Características físicas da linha flexível utilizada nos experimentos.

Descrição	Símbolo	Valor	Unidade
Massa linear	μ	0,1810	kg/m
Diâmetro externo	D_ext	14,0	mm
Diâmetro interno	D_{int}	7,1	mm
Rigidez axial	EA	3472,81	N
Rigidez flexional	EI	2,38.10 ⁻²	N.m ²

Em cada um dos ensaios realizados com a linha flexível, uma determinada condição de lançamento foi empregada. Dessa maneira, características como comprimento total, comprimento suspenso, ângulo de topo e ancoragem ("far" ou "near") variaram seus valores para cada um dos experimentos físicos realizados e as informações relativas a essas características são apropriadamente explicitadas na descrição dos ensaios, em seus respectivos capítulos.

3.1.4 Dispositivo atuador

Embora não tenha sido utilizado em todos os ensaios, o dispositivo atuador se configura como um equipamento essencial para os experimentos principais, sendo responsável pela imposição dos movimentos de topo à linha flexível.

O atuador foi concebido de maneira a possuir três servo-controladores capazes de permitir a imposição de movimentos independentes, nas direções paralelas aos eixos x, y e z do sistema real de coordenadas, ilustrado na Figura 2.24. No escopo da presente dissertação, dois movimentos passíveis de serem prescritos pelo equipamento são particularmente importantes: o circular e o circular acoplado a uma deriva, ambos impostos ao topo da linha, na direção vertical que a contém.

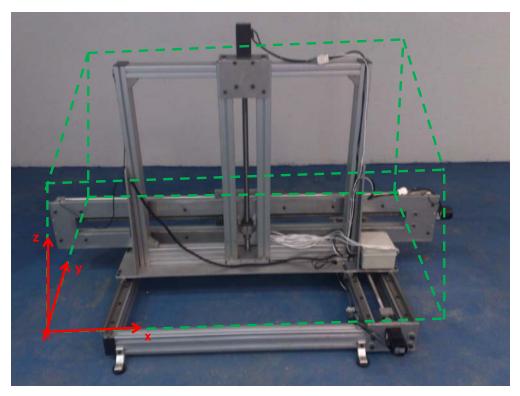


Figura 3.10: Equipamento para imposição de movimentos ao topo da linha. Em destaque, as direções passíveis de atuação do dispositivo, em vermelho; e o máximo curso dos movimentos prescritos.

O dispositivo atuador é, portanto, composto pela estrutura física em alumínio ilustrada na Figura 3.10, que possui uma placa que se movimenta ao longo dos

cursos dos eixos sem-fim do equipamento. Nos ensaios com a linha flexível, um rolamento é fixado a essa placa, de maneira a manter livre a rotação da linha no plano vertical que a contém.

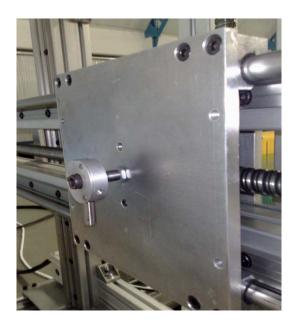


Figura 3.11: Detalhe do rolamento fixado à placa móvel do dispositivo atuador para ensaios com a linha flexível.

O movimento prescrito é imposto pelo conjunto de servo-motores, controlados por um *software* de automação. A fim de testar o funcionamento deste equipamento, bem como avaliar a precisão dos movimentos por ele impostos, foram realizados experimentos de aferição, descritos na seção 4.3.

3.2 MÉTODOS

O presente trabalho consiste em comparar resultados obtidos em ensaios físicos com aqueles advindos de simulações numéricas ou formulações analíticas constantes na bibliografia e condensadas na revisão bibliográfica.

Para fins de entendimento e familiarização com relação ao Método DLT e o processamento digital de imagens e vídeos, foram concebidos e realizados experimentos preliminares descritos no Capítulo 4.

Para cada ensaio específico, é completado o levantamento bibliográfico das teorias e experimentos relacionados, com o objetivo de promover a confrontação com os resultados dos dois sistemas de câmeras utilizados para monitoramento não-invasivo, a partir da sequência de procedimentos ilustrados na Figura 3.12.

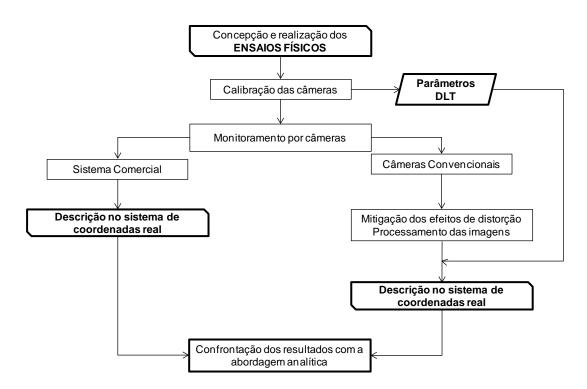


Figura 3.12: Descrição ilustrativa dos procedimentos utilizados para confrontação dos resultados obtidos nos experimentos físicos realizados.

O sistema comercial é, então, calibrado e usado para acompanhamento dos movimentos tridimensionais do objeto de interesse, resultando na série temporal de deslocamentos dos alvos nas três direções.

O mesmo ensaio deve ser monitorado pelo conjunto de câmeras convencionais, com a diferença que a calibração das câmeras é feita a partir de rotinas em Matlab[®] geradas para as finalidades específicas do experimento. A reconstrução tridimensional permite que sejam conhecidas as coordenadas dos alvos utilizados no sistema de referência do objeto, permitindo assim a confrontação com o resultado do

sistema comercial de câmeras. Os principais conceitos de processamento digital de imagens e calibração de câmeras, descritos nas seções 2.1 a 2.4 e utilizados para análise das imagens e vídeos obtidos durante os experimentos físicos, estão ilustrados na Figura 3.12, de maneira e explicitar o procedimento proposto para a análise das imagens advindas de monitoramentos dos ensaios pelo conjunto de câmeras convencionais.

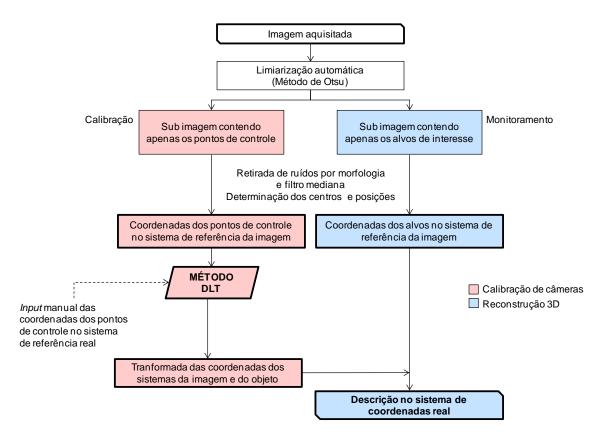


Figura 3.13: Fluxograma das etapas de processamento das imagens obtidas nos ensaios.

Os resultados percebidos pelos dois sistemas de câmeras são comparados entre si e com simulações numéricas ou formulações advindas do levantamento bibliográfico realizado anteriormente.

Os Capítulos 4 e 5 encerram a descrição da montagem e realização dos ensaios, bem como a apresentação e discussão dos resultados, sendo que aqueles referentes ao procedimento proposto serão denominados nas legendas dos gráficos por "Procedimento Proposto".

Capítulo 4

Ensaios Preliminares

4 ENSAIOS PRELIMINARES

Os ensaios preliminares foram de importância fundamental para concepção e realização dos experimentos para investigação fenomenológica dos aspectos relacionados com a estática e dinâmica de linha através de imagens digitais. O domínio das ferramentas utilizadas e dos procedimentos necessários para maior controle e rigor dos ensaios foram pontos imprescindíveis na experimentação física. Dessa maneira, foi elaborado um conjunto de ensaios com o propósito de validação do método proposto e que será apresentado ao longo deste capítulo.

4.1 EXPERIMENTO 1: PÊNDULO SIMPLES LINEARIZADO

Para o primeiro experimento de calibração foi escolhido o estudo de um pêndulo simples, dada a facilidade de concepção e realização deste ensaio, bem como a possibilidade de comparação dos resultados obtidos por processamento de imagens com os resultados analíticos clássicos. O objetivo final deste experimento é a confrontação dos períodos naturais de oscilação do pêndulo ensaiado e das séries temporais resultantes das análises dos dados obtidos. A Figura 4.1 ilustra o arranjo experimental utilizado (à esquerda, a massa concentrada aparece como um pequeno círculo cinza no meio da figura) e o modelo físico correspondente (à direita).

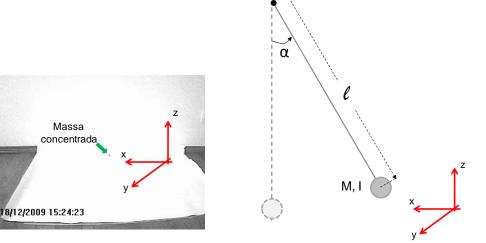


Figura 4.1: Ilustração do pêndulo simples e o modelo físico utilizado para os Experimentos 1 e 2.

4.1.1 Aparato utilizado nos Experimentos 1 e 2

O pêndulo ensaiado, cujas características físicas são apresentadas na Tabela 4.1, foi monitorado através dos sistemas de câmeras descritos nas seções 3.1.1 e 3.1.2, conforme o arranjo experimental ilustrado na Figura 4.2. O pêndulo foi construído com um pedaço de fio de *nylon* de diâmetro 0,10mm e uma massa concentrada esférica, envolta por um alvo reflexivo utilizado pelo sistema comercial de câmeras.

Tabela 4.1: Características físicas do pêndulo do Experimento 1.

Grandeza	Média ± Desvio
Comprimento (m)	1,140 ± 0,001
Massa (g)	$10,0 \pm 0,5$
Diâmetro do corpo (m)	$0,014 \pm 0,001$



Figura 4.2: Disposição dos sistemas de câmeras para o monitoramentos dos Experimento 1 e 2. No detalhe, o ajuste de paralelismo e perpendicularismo do aparato.

A calibração das câmeras convencionais foi feita através do Método DLT, descrito na seção 2.4, a partir da utilização do corpo de calibração apresentado em 3.1.2.2, monitorado em quatro posições distintas, como ilustrado na Figura 4.3.

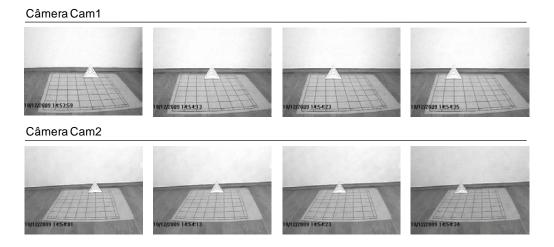


Figura 4.3: Posicionamentos do corpo de referência para calibração das câmeras convencionais utilizada nos Experimentos 1 e 2.

A calibração do sistema comercial de câmeras foi feita de acordo com os procedimentos descritos em 3.1.1.2, apresentando um erro estimado em 0,90mm e identificando automaticamente o posicionamento real das câmeras.

Cabe citar que os *frames* analisados pelo procedimento proposto (ilustrado na Figura 3.13), tanto os de calibração, quanto os relativos ao movimento do pêndulo, foram tratados previamente a fim de mitigar os efeitos da distorção radial apresentada pelo conjunto de câmeras convencionais, conforme a formulação descrita no item 2.3.1.2. Um exemplo de resultado do processo de redução dos efeitos da distorção radial está ilustrado na Figura 4.4.

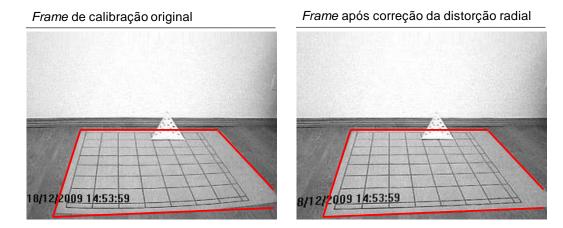


Figura 4.4: Resultado do processo de mitigação dos efeitos da distorção radial sobre uma imagem obtida por uma das câmeras digitais convencionais.

4.1.2 Abordagem analítica: modelo físico para o pêndulo simples

Seja um corpo rígido de massa concentrada M e momento de inércia I, suspenso por um fio inextensível de massa desprezível. Seja ℓ a distância entre o ponto de suspensão do fio e o centro de gravidade do corpo rígido em questão. Adotando como referência o sistema fixo de eixos coordenados da Figura 4.1, pode-se inferir que as energias cinética T e potencial U do pêndulo, quando deslocado de um ângulo α de sua posição de energia mínima (paralelamente ao campo gravitacional) são dadas, respectivamente, pelas equações (4.1) e (4.2) expressas a seguir.

$$T = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \dot{\alpha}^2 \tag{4.1}$$

$$U = M \cdot g \cdot l \cdot (1 - \cos \alpha) \tag{4.2}$$

Supondo ausência de forças dissipativas e ausência de quaisquer perturbações externas, o teorema da conservação de energia leva em conta o fato de que a soma das energias cinética e potencial é constante em função do tempo e da posição do pêndulo. Além disso, adota-se como hipótese que o mesmo encontra-se confinado no plano vertical xz. Assim:

$$\frac{1}{2} \cdot I \cdot \dot{\alpha}^2 + M \cdot g \cdot l \cdot (1 - \cos \alpha) = constante$$
 (4.3)

Derivando a expressão (4.4) com relação a α chega-se à clássica equação diferencial que rege o movimento do pêndulo simples.

$$\ddot{\alpha} + \frac{M \cdot g \cdot l}{l} \cdot sen\alpha = 0 \tag{4.4}$$

A equação (4.5) é não-linear e é possível analisar o caso de movimentos de baixa amplitude, ou seja, aqueles restritos à vizinhança da posição de equilíbrio vertical do pêndulo (α <<1), de maneira que $sen\alpha \approx \alpha$:

$$\ddot{\alpha} + \frac{M \cdot g \cdot l}{l} \cdot \alpha = 0 \tag{4.5}$$

Por fim, tomando por hipótese que a massa do corpo suspenso está concentrada no seu centro de gravidade, então $I = \frac{1}{2} \cdot M \cdot l^2$ e (4.5) se reduz a:

$$\ddot{\alpha} + \frac{g}{l} \cdot \alpha = 0 \tag{4.6}$$

De onde se conclui que, para o modelo físico descrito, o período de oscilação T do pêndulo simples é dado por:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}} \tag{4.7}$$

O pêndulo utilizado no Experimento 1 foi construído de forma que l=1,140m, assim o período teórico de oscilação T_t do pêndulo ensaiado deve ser, aproximadamente, 2,143s.

Tomando como referência o sistema de eixos apresentado na Figura 4.1, é possível deduzir que as máximas amplitudes teóricas que podem ser alcançadas pelo pêndulo, em relação à sua posição de equilíbrio, são $A_x = l \cdot sen\alpha$, $A_y = 0$ e $A_z = l \cdot (1-cos\alpha)$, respectivamente nas direções paralelas a x, y e z. O ângulo inicial α conferido ao pêndulo como condição inicial foi de aproximadamente 4,0° ± 0,5°, conforme inferido a partir do aparato montado para esse experimento e ilustrado na Figura 4.5, as máximas amplitudes teóricas passíveis de serem alcançadas pelo pêndulo são dadas na Tabela 4.2.



Figura 4.5: Pêndulo simples utilizado nos Experimentos 1 e 2.

Tabela 4.2: Máximas amplitudes teóricas do pêndulo do Experimento 1.

Abordagem	Direção x	Direção y	Direção z
Média (m)	0,080	0,000	0,003
Mínima (m)	0,060	0,000	0,002
Máxima (m)	0,099	0,000	0,004

É importante notar que os valores apresentados na Tabela 4.2 para os deslocamentos na direção z, paralela ao campo gravitacional, são diminutos em relação às amplitudes na direção x. Além disso, esses valores são da mesma ordem de grandeza que os erros de calibração do sistema comercial de câmeras (1mm) e consideravelmente menores que o diâmetro da massa ensaiada (14mm). Essa constatação sugere que apenas as oscilações na direção x podem ser comparadas através da metodologia utilizada, nas condições específicas deste ensaio.

4.1.3 Resultados do sistema comercial de câmeras

O sistema comercial de câmeras gera como saída um arquivo digital de texto contendo a série temporal do corpo ensaiado em cada uma das direções, no sistema de referência global obtido após o processo de calibração. A Figura 4.6 apresenta graficamente estas séries temporais e os respectivos espectros de potência. A taxa de aquisição utilizada foi de 30Hz, a mesma do conjunto de câmeras convencionais.

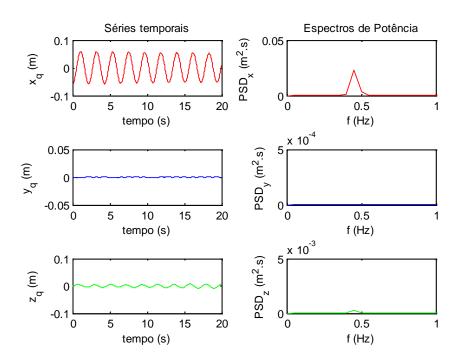


Figura 4.6: Séries temporais e espectros de potência do pêndulo ensaiado no Experimento 1 – sistema comercial de câmeras.

Os valores referentes à análise no tempo dos dados obtidos pelo sistema comercial de câmeras estão compilados na Tabela 4.3, onde são apresentados, para cada direção, os valores máximo, mínimo, médio, a amplitude média calculada e o período de oscilação. O índice subscrito "q" será utilizado para designar grandezas medidas com este sistema de câmeras.

Tabela 4.3: Análise temporal do Experimento 1 – sistema comercial de câmeras.

	Direção x _q	Direção y _q	Direção z _q
Máximo (m)	0,059	0,008	0,001
Mínimo (m)	-0,060	-0,008	-0,002
Média (m)	0,000	0,000	0,000
Amplitude Média (m)	0,059	0,008	0,002
Período T _q (s)	2,226	2,226	1,054

A partir dos espectros de potência (PSD) dos sinais da Figura 4.6, é possível notar que as frequências onde se encontram os picos de oscilação nas direções x_q e z_q são muito próximas, embora haja uma quantidade muito maior de energia envolvida nas oscilações em x_q , como era de se esperar baseado na abordagem analítica feita para o pêndulo simples descrita na seção 4.1.2.

Por outro lado, o período de oscilação na direção z_q é aproximadamente metade daquele observado para as demais direções, visto que enquanto o pêndulo percorre um ciclo completo na direção x_q , são realizadas duas oscilações verticais, no mesmo intervalo de tempo. A diferença apresentada é de cerca de 5,3%.

4.1.4 Resultados obtidos a partir do procedimento proposto

Após o processamento dos *frames* de monitoramento obtidos para este ensaio, a partir dos procedimentos descritos na seção 3.2, foram obtidas as séries temporais da massa concentrada do pêndulo para cada uma das direções consideradas na Figura 4.1. A Figura 4.7 apresenta graficamente essas séries temporais, bem como seus respectivos espectros de potência. O índice subscrito "p" será utilizado para designar grandezas medidas no sistema de câmeras convencionais.

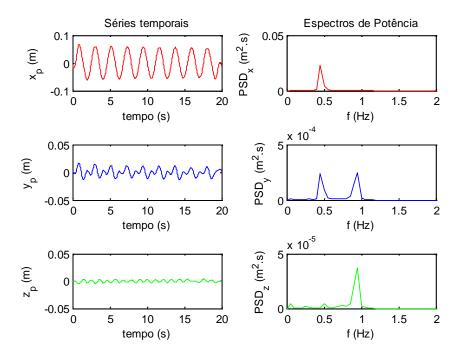


Figura 4.7: Séries temporais e espectros de potência do pêndulo ensaiado no Experimento 1 – sistema de câmeras convencionais.

Posteriormente à obtenção das séries temporais, foram efetuadas análises nos domínios do tempo e da frequência para os conjuntos de dados provenientes do monitoramento pelas câmeras convencionais após a aplicação do Método DLT. Os resultados dessas análises estão compilados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Análise temporal do Experimento 1 – conjunto de câmeras convencionais.

	Direção x _p	Direção y _p	Direção z _p
Máximo (m)	0,066	0,017	0,127
Mínimo (m)	-0,061	-0,013	0,069
Média (m)	0,000	0,000	0,000
Amplitude Média (m)	0,063	0,015	0,029
Período T _p (s)	2,222	1,053 e 2,222	1,053

Da Tabela 4.4 é possível depreender que a análise efetuada foi capaz de perceber a diferença esperada entre os períodos de oscilação nas direções x_p e z_p , embora com uma discrepância da ordem de 5,2%. Esse resultado pode estar associado aos pequenos deslocamentos na direção paralela a z_p , comparativamente à x_p , em conjunto com imprecisões intrínsecas ao processo de calibração e com a estrutura empregada, cujo procedimento é bastante sensível à discretização em *pixels*. Para verificar esta hipótese, foi realizado um novo experimento com o pêndulo, descrito na seção 4.2, onde o ângulo inicial conferido ao pêndulo é maior que os limites impostos pela linearização efetuada na formulação desenvolvida na seção 4.1.2. Com isso, espera-se atingir uma amplitude vertical da mesma ordem de grandeza que a apresentada na direção x_p , permitindo assim avaliar se a diferença apresentada pode ser resultante de imprecisões numéricas. Além disso, o corpo de calibração foi modificado, de maneira utilizar que a estrutura ilustrada do lado direito da Figura 3.7.

Por outro lado, a análise dos espectros de potência da Figura 4.7 corrobora a asserção feita anteriormente acerca da distribuição de energia em cada uma das direções: a energia associada aos movimentos na direção x_p são muito mais elevadas que nas demais. Convém, porém, notar a presença de dois picos de energia na direção y_p , um em 0,5Hz e o outro em 1,0Hz.

As análises comparativas entre as diversas abordagens utilizadas são apresentadas na seção 4.1.5, na qual são feitas as confrontações cabíveis.

4.1.5 Comparação dos resultados obtidos no Experimento 1

A despeito do cuidado experimental em posicionar as origens dos sistemas de coordenadas reais, do sistema comercial de câmeras e do conjunto de câmeras convencionais, em um mesmo ponto, existe uma dificuldade intrínseca em realizar essa tarefa. Além disso, é difícil sincronizar manualmente o início do monitoramento por esses dois conjuntos de câmeras. Com isso, a representação gráfica conjunta das séries temporais resultantes permite a percepção de pequenas defasagens entre os sinais. Os deslocamentos horizontais relativos referem-se ao fato de que não foi possível garantir o início concomitante dos monitoramentos pelos dois

conjuntos de câmeras, enquanto que as defasagens verticais são devidas à impossibilidade prática em se garantir a coincidência espacial dos sistemas de coordenadas.

A Figura 4.8 reúne as séries temporais nas direções x, y e z do pêndulo ensaiado neste experimento e seus respectivos espectros de potência. Para a confecção desse gráfico foi utilizado o valor médio das amplitudes calculadas pela abordagem analítica (Tabela 4.2).

É possível notar, ainda, que os deslocamentos na direção y são relativamente próximos entre si e muito menores que as amplitudes percebidas na direção x. É importante salientar que, idealmente, o pêndulo oscilaria apenas no plano vertical xz, de modo que sua amplitude em y deveria ser nula. Efeitos como a rotação da massa do pêndulo e a condição inicial imposta ao mesmo podem ser explicações possíveis para esse comportamento.

Ainda com relação à Figura 4.8, verifica-se que nenhum dos dois sistemas de câmeras é capaz de identificar corretamente as amplitudes do movimento vertical assumido pelo pêndulo, embora ambos consigam caracterizar, com pequenas discrepâncias, o período de oscilação nesta direção.

Com relação às amplitudes verticais percebidas, a diferença apresentada por ambos os sistemas de câmeras se deve ao fato de o deslocamento teórico esperado ser da ordem de poucos milímetros, ou seja, da mesma ordem de grandeza do erro associado à calibração do sistema comercial e cerca de dez vezes menor que o diâmetro da massa utilizada. Imprecisões deste tipo comprometem sobremaneira as análises dos movimentos nessa direção. Entretanto, é importante notar que a metodologia empregada apresenta divergências consideráveis com relação aos resultados do sistema comercial, em termos de amplitude e energia associado aos movimentos nesta direção. Tal fato pode estar associado com a qualidade da calibração efetuada. Novos experimentos, descritos nas seções 4.2 a 4.5, serão realizados a fim de verificar esta hipótese, utilizando a estrutura de calibração apresentada à direita da Figura 3.7.

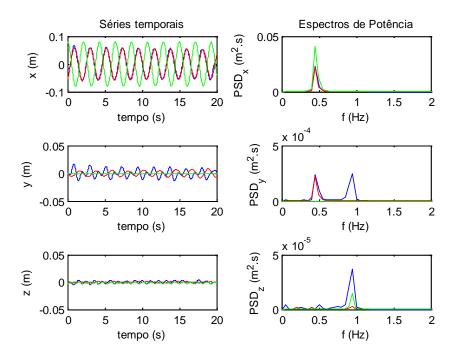


Figura 4.8: Séries temporais dos deslocamentos em x, y e z do pêndulo do Experimento 1 e os respectivos espectros de potência para as três abordagens utilizadas.

Em azul, os resultados obtidos pelo procedimento proposto; em vermelho, os do sistema comercial de câmeras; em verde, o analítico.

As demais análises comparativas que serão apresentadas ao longo da presente seção referem-se apenas aos deslocamentos paralelos à direção x definida na Figura 4.1, dado o pretenso confinamento do pêndulo ao plano vertical xz e as incertezas quanto aos valores encontrados para as oscilações verticais.

Conforme mencionado no início deste capítulo, o principal objetivo do experimento com o pêndulo simples é a comparação dos resultados obtidos para o período de oscilação e para a amplitude do movimento.

A Tabela 4.5 apresenta os valores calculados para o período de oscilação do pêndulo do Experimento 1, na direção x, através das abordagens consideradas. É possível perceber que os períodos calculados pela metodologia proposta e pela análise temporal da série temporal resultante do sistema comercial diferem em cerca de 0,1% entre si. Além disso, ambas são da ordem de 3,7% maiores que o valor teórico esperado, mostrando a compatibilidade que se pode alcançar com a metodologia proposta, quando os deslocamentos são muito maiores que os erros associados.

Tabela 4.5: Comparação dos períodos de oscilação do pêndulo na direção x, para as três abordagens utilizadas – Experimento 1.

Abordagem	Período de oscilação T (em s)	Diferença percentual ^(*)
Analítica	2,143	-
Sistema comercial de câmeras	2,226	3,87%
Procedimento proposto	2,222	3,69%

^(*) A diferença percentual será sempre calculada tomando por base o período de oscilação teórico.

Deslocamentos na direção y consomem parte da energia que seria utilizada para oscilações nas outras direções. Assim, a abordagem analítica considera implicitamente que existe mais energia associada aos movimentos em x e z e, portanto, as velocidades atingidas devem ser maiores.

Além disso, o desenvolvimento teórico do pêndulo simples, efetuado na seção 4.1.2, considera que não existe dissipação de energia. Entretanto, ambos os sistemas de câmeras percebem o movimento realmente adquirido pelo pêndulo, sobre o qual atua a resistência do ar e atritos no apoio. Essa dissipação, embora pequena, diminui a velocidade máxima atingida pela massa concentrada.

Essas duas considerações podem explicar, isoladamente ou em conjunto, as diferenças apresentadas entre o valor teórico esperado para o período de oscilação e os resultados provenientes das outras duas abordagens.

A outra análise que deve ser feita diz respeito à comparação das amplitudes resultantes das três abordagens utilizadas neste trabalho. A Tabela 4.6 apresenta os valores dessas amplitudes, na direção x, compilando os resultados já apresentados anteriormente. O gráfico ilustrado na Figura 4.9 permite comparar visualmente estes resultados, possibilitando verificar a existência de uma faixa de amplitudes comuns às três abordagens. Note-se que, ao contrário das demais análises efetuadas, as séries temporais a que se referem os gráficos dessa figura não estão centrados.

Tabela 4.6: Amplitude do pêndulo na direção x – Experimento 1.

Abordagem	A _x (m) ¹¹
Analítica	0,080 ± 0,020
Sistema comercial de câmeras	0,059 ± 0,001
Procedimento proposto	0,061 ± 0,004

A interpretação do gráfico da Figura 4.9 deve levar em consideração o significado de cada elemento do mesmo: a linha em vermelho representa a mediana de cada amostra (sinal), os limites inferior e superior de cada "caixa" do *box plot* são, respectivamente, o primeiro e terceiro quartis¹² (ou seja, a "caixa" contém os 50% valores centrais) e os traços horizontais em preto abaixo e acima da "caixa" indicam os valores mínimo e máximo da série, nesta ordem.

Abordagem analítica: a incerteza é devida a possíveis variações na condição inicial. Sistema comercial: erro associado à calibração, calculado pelo *software*. Procedimento proposto: o erro leva em consideração a incerteza relativa ao método (item 3.1.2.2) e o desvio padrão associado ao cálculo da amplitude média (Tabela 4.4).

¹² A mediana é o valor que divide uma amostra ordenada em duas partes iguais. Analogamente, se uma amostra ordenada for dividida em quatro partes iguais, dá-se o nome de quartil a cada uma delas. Assim, o primeiro quartil contém 25% das observações, o segundo quartil coincide com a mediana e o terceiro quartil contém 75% dos elementos da amostra.

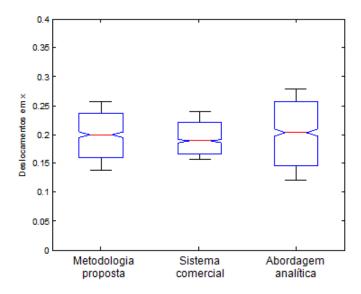


Figura 4.9: Comparação gráfica das amplitudes na direção x para as três abordagens utilizadas.

4.1.6 Discussões acerca do Experimento 1

O experimento com o pêndulo simples linearizado permitiu a confrontação entre os valores teóricos e os resultados provenientes do sistema comercial de câmeras e da aplicação do procedimento de análise de imagens das câmeras convencionais proposto neste trabalho, utilizando processamento digital de imagens e vídeos e calibração de câmeras seguida de reconstrução tridimensional.

A condição inicial imposta ao pêndulo, respeitando a aproximação analítica para pequenos ângulos, levou a resultados consideravelmente divergentes com relação às outras duas abordagens, principalmente por não levar em conta as perdas de energia associadas à resistência do ar e às oscilações do mesmo fora do plano vertical.

Além disso, o ângulo inicial conferido ao pêndulo implicou em amplitudes verticais teóricas diminutas, da mesma ordem de grandeza do erro associado aos outros dois sistemas, não permitindo a análise comparativa que se desejava efetuar e, portanto, restringindo a confrontação de resultados aos deslocamentos na direção paralela ao eixo x. A fim de promover a análise nas demais direções é proposta a realização de um novo ensaio com o pêndulo, sem a linearização promovida no Experimento 1 e utilizando a estrutura de calibração apresentada à direita na Figura 3.7.

A maior contribuição deste ensaio reside na boa adequação entre os resultados dos dois sistemas de câmeras utilizados, mostrando as virtudes que a metodologia proposta parece apresentar desde que os deslocamentos medidos não sejam na mesma ordem de grandeza que as incertezas associadas. Novos experimentos serão concebidos, realizados e analisados a fim de corroborar essa asserção.

4.2 EXPERIMENTO 2: PÊNDULO SIMPLES NÃO-LINEARIZADO

Para o segundo experimento preliminar foi utilizado novamente o aparato experimental ilustrado na Figura 4.5 e que serviu aos propósitos do ensaio descrito e discutido na seção 4.1. As duas diferenças fundamentais foram: o comprimento do pêndulo – que passou a ser 0,929m para o Experimento 2; e a utilização de outra estrutura de calibração – a ilustrada à direita da Figura 3.7.

A repetição foi motivada pelos pequenos deslocamentos verticais assumidos pela massa concentrada, devidos à condição inicial angular imposta ao pêndulo no Experimento 1. O objetivo desse segundo ensaio com o pêndulo é aumentar o ângulo conferido ao mesmo de maneira a propiciar oscilações verticais passíveis de serem reconhecidas pelos sistemas de câmeras, sem que os erros e incertezas inerentes a estes interfiram nos resultados das medições.

4.2.1 Resultados da simulação computacional

A fim de manter as análises feitas para o Experimento 1, o equacionamento teórico foi mantido, a menos da linearização realizada anteriormente. A equação diferencial que rege o movimento do pêndulo passa a ser a (4.4), cuja resolução numérica foi realizada através de simulação computacional utilizando o pacote S*imMechanics* do Matlab[®]. A Figura 4.10 ilustra o diagrama de blocos utilizado nessa simulação.

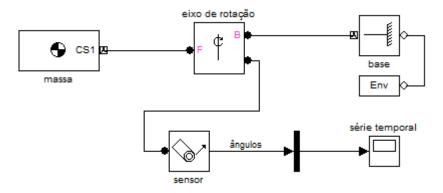


Figura 4.10: Diagrama de blocos para o pêndulo do Experimento 2.

Os modelos físicos a que se referem a equação (4.4) e o diagrama da Figura 4.10 são idênticos. Para visualizar a correspondência existente é necessário o entendimento de cada um dos blocos que compõem o diagrama. O bloco "massa" armazena as propriedades físicas do pêndulo (massa, inércia, centro de gravidade e posição em que é conectado), "eixo de rotação" contém a informação acerca do eixo sobre o qual ocorre a rotação do pêndulo (no caso, o eixo y) e em "base" é possível indicar o ponto ao qual o pêndulo se conecta. A intensidade do campo gravitacional local, bem como seu sentido e direção de atuação, é considerada em "Env". Entre a "massa" e a "base" é colocado um "sensor" que calcula os ângulos a serem armazenados em uma "série temporal", através da integração numérica da Equação (4.4) pelo Método de Runge-Kutta (função ode45 do Matlab[®]), usualmente utilizado para resolução de equações diferenciais na forma $\frac{dx}{dt} = f(x,t)$.

Para o Experimento 2, o ângulo inicial conferido ao pêndulo foi de 12,0° ± 0,5°, garantido pela imposição de um deslocamento inicial da massa concentrada de 0,200m em uma direção paralela ao eixo x. A Figura 4.11 apresenta as séries temporais dos deslocamentos nas três direções para o pêndulo sob essa condição inicial, obtidas a partir de simulações computacionais, bem como seus respectivos espectros de potência.

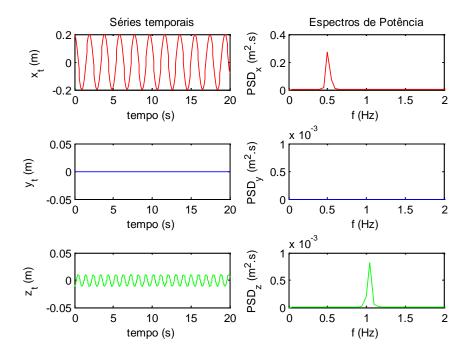


Figura 4.11: Séries temporais e espectros de potência do pêndulo ensaiado no Experimento 2 – abordagem analítica (simulação numérica).

A análise das séries temporais da Figura 4.11 possibilitou o cálculo das grandezas constantes da Tabela 4.7, na qual podem ser visualizados os deslocamentos teóricos nas direções x e z, bem como os respectivos períodos de oscilação. Salienta-se que o modelo teórico empregado não considera oscilações fora do plano vertical que pretensamente contém o pêndulo. O índice subscrito "t" é utilizado para designar grandezas calculadas pela abordagem analítica.

Tabela 4.7: Análise temporal do Experimento 2 – simulação computacional.

	Direção x _t	Direção z _t
Máximo (m)	0,020	0,010
Mínimo (m)	-0.020	-0,012
Média (m)	0,000	0,000
Amplitude Média (m)	0,020	0,011
Período T _t (s)	2,003	0,954

Os espectros de potência da Figura 4.11 permitem visualizar que grande parte da energia envolvida no movimento pendular está associada aos deslocamentos na direção x_t . Espera-se, portanto, que estes sejam de amplitude muito superior às oscilações verticais, embora estas devam ser identificadas pelo sistema comercial e através da metodologia proposta de análise por imagens. É possível notar, também por essa figura, que os períodos de pico nas direções x_t e z_t guardam a esperada relação existente entre os períodos de oscilação para estas duas direções, fato corroborado pelos valores apresentados na Tabela 4.7.

4.2.2 Resultados do sistema comercial de câmeras

A saída do sistema comercial de câmeras consiste nas séries temporais do alvo posicionado sobre o pêndulo, cujos gráficos podem ser visualizados na Figura 4.12, onde também estão ilustrados seus respectivos espectros de potência. A análise no tempo e na frequência dessas séries temporais possibilitou a confecção da Tabela 4.8, na qual constam os valores das grandezas que caracterizam os movimentos nas três direções e seus respectivos períodos de oscilação.

Visualmente, é possível perceber pela Figura 4.12 dois resultados importantes, suportados pelos valores apresentados na Tabela 4.8: a já mencionada relação entre os períodos de pico dos espectros das séries temporais das direções x_q e z_q e a grande diferença entre a energia associada às oscilações na direção x_q , comparativamente às outras direções. Cabe ressaltar, entretanto, que a despeito dessa diferença as amplitudes percebidas pelo sistema comercial são cerca de dez vezes superiores ao erro associado à calibração do mesmo, de maneira que é esperado que exista maior coerência entre os valores obtidos e os encontrados através da simulação computacional realizada para resolução da equação diferencial que rege o pêndulo não-linearizado. A comparação dos resultados pelas três abordagens utilizadas é feita na seção 4.2.4.

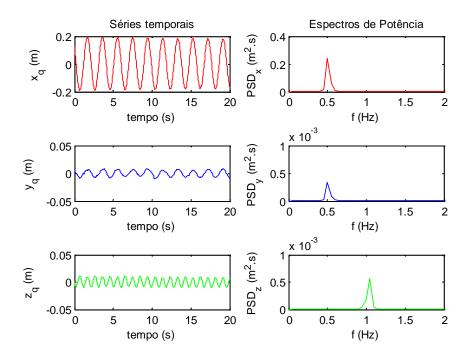


Figura 4.12: Séries temporais e espectros de potência do pêndulo ensaiado no Experimento 2 – sistema comercial de câmeras.

Tabela 4.8: Análise temporal do Experimento 2 – sistema comercial de câmeras.

	Direção x _q	Direção y _q	Direção z _q
Máximo (m)	0,195	0,009	0,012
Mínimo (m)	-0,191	-0,010	-0,010
Média (m)	0,001	0,000	0,000
Amplitude Média (m)	0,194	0,010	0,011
Período T _q (s)	2,003	2,003	0,954

Além das séries temporais nas três direções, a Figura 4.12 apresenta também os seus respectivos espectros de potência, provenientes da análise de resultados do sistema comercial. É possível notar que as quantidades de energia associadas aos movimentos nas direções y_q e z_q são desprezíveis em relação à energia relacionada aos deslocamentos do pêndulo em x_q .

4.2.3 Resultados obtidos a partir do procedimento proposto

A apresentação dos resultados advindos do procedimento de análise proposto para uso do sistema de câmeras convencionais mantém a mesma formatação utilizada nas demais abordagens: apresentação gráfica das séries temporais nas três direções e os respectivos espectros de potência (Figura 4.13) e os valores das principais grandezas associadas às oscilações do pêndulo (Tabela 4.9).

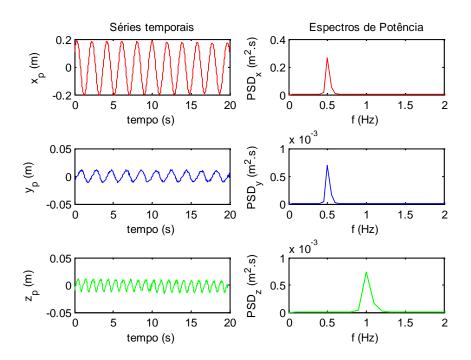


Figura 4.13: Séries temporais e espectros de potência do pêndulo ensaiado no Experimento 2 – sistema de câmeras convencionais.

As séries temporais para os deslocamentos na direção y_p e z_p apresentadas na Figura 4.13 parecem apresentar amplitudes relativamente maiores que as obtidas para o pêndulo linearizado, fato corroborado pelos valores constantes na Tabela 4.9, provenientes da análise temporal das posições do pêndulo utilizadas neste ensaio.

Tabela 4.9: Análise temporal do Experimento 2 – conjunto de câmeras convencionais.

	Direção x _p	Direção y _p	Direção z _p
Máximo (m)	0,189	0,012	0,012
Mínimo (m)	-0,206	-0,012	-0,015
Média (m)	0,000	0,000	0,000
Amplitude Média (m)	0,198	0,012	0,013
Período T _p (s)	2,000	2,000	1,000

Os espectros de potência relativos aos movimentos do pêndulo nas direções y_p e z_p apresentam picos visualmente destacados, guardando exatamente a relação esperada. Entretanto, os valores exatos apresentados pelos períodos de pico sugerem que a resolução espectral esteja baixa, resultante do baixo tempo de aquisição dos sinais temporais. A seção 4.2.4 é destinada a comparar os resultados das três abordagens utilizadas neste ensaio.

4.2.4 Comparação dos resultados obtidos no Experimento 2

A Figura 4.14 apresenta os gráficos com as séries temporais de deslocamento nas três direções, obtidos a partir das três abordagens utilizadas neste trabalho. É possível verificar, nesta figura, diferenças nas fases devidas ao início dos monitoramentos, que são assíncronos. Dada a impossibilidade prática em estabelecer a coincidência espacial dos eixos referenciais, optou-se por centrar os sinais de modo a possibilitar a comparação visual dos resultados obtidos. A partir da Figura 4.14 foi possível calcular os períodos de oscilação e as amplitudes do movimento adquirido pelo pêndulo, através da análise temporal dos gráficos nela contidos, cujos valores apresentados anteriormente são compilados nas tabelas apresentadas nos itens 4.2.4.1 e 4.2.4.2, onde são confrontados os resultados obtidos pelas três abordagens, para as direções x e z.

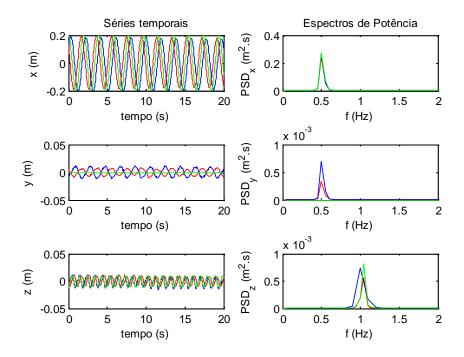


Figura 4.14: Séries temporais e espectros de potência em x, y e z do pêndulo do Experimento 2. Em azul, os resultados obtidos pelo procedimento proposto; em vermelho, os do sistema comercial de câmeras; em verde, a simulação computacional.

Ressalta-se que o objetivo principal da repetição do ensaio com o pêndulo simples é a verificação da possibilidade em se medir os deslocamentos verticais da massa concentrada, para uma condição inicial angular com ordem de grandeza superior à dos erros e incertezas inerentes ao experimento e às calibrações de câmeras efetuadas, e permitir o confronto dos resultados obtidos pelas três abordagens utilizadas. As análises para os eixos x e z são feitas separadamente e encontram-se, respectivamente, nos itens 4.2.4.1 e 4.2.4.2. Os deslocamentos na direção do eixo y, perpendicular ao plano vertical, só podem ser comparados a partir dos resultados provenientes do sistema comercial de câmeras e das rotinas utilizadas para avaliar os dados resultantes do conjunto de câmeras convencionais. Isso porque a abordagem analítica considerou o confinamento do pêndulo ao plano vertical.

4.2.4.1 Comparação dos movimentos no eixo x para o Experimento 2

Os principais resultados obtidos a partir das análises no domínio da frequência e do tempo, relativas aos movimentos nas direções paralelas ao eixo x, são apresentados respectivamente nas tabelas Tabela 4.10 e Tabela 4.11.

As diferenças de fases apresentadas graficamente nas séries temporais da Figura 4.14, devidas ao início assíncrono dos monitoramentos a partir dos dois conjuntos de câmeras, não interferem nas análises dos movimentos realmente percebidos: o sistema comercial e o conjunto de câmeras convencionais não apresentaram diferenças significativas para o período do pêndulo ensaiado, mesmo quando comparados entre si ou com o valor obtido através de simulação numérica. Esse resultado já era esperado, dadas as aderências percebidas anteriormente, para esta direção, a partir das análises efetuadas no Experimento 1.

Tabela 4.10: Períodos de oscilação do pêndulo na direção x – Experimento 2.

Abordagem	Período de oscilação T (em s)	Diferença percentual	
Simulação computacional	2.003	-	
Sistema comercial de câmeras	2,003	0,00%	
Procedimento proposto	2,000	0,01%	

Além da coerência apresentada entre os períodos de oscilação do pêndulo na direção x, é possível também perceber grande adequação entre os resultados apresentados para as amplitudes máximas atingidas nesta direção, tanto através da Figura 4.14, quanto dos valores apresentados na Tabela 4.11. Para a simulação computacional, foi considerado que o maior erro associado ao procedimento realizado é devido às incertezas relativas à condição inicial conferida ao pêndulo.

Tabela 4.11: Amplitude do pêndulo na direção x – Experimento 2.

Abordagem	A _x (m)
Simulação computacional	0,200 ± 0,011
Sistema comercial de câmeras	0,198 ± 0,001
Procedimento proposto	0,194 ± 0,003

É possível visualizar graficamente a coerência entre os resultados obtidos para as abordagens utilizadas a partir dos espectros de potência para essa direção apresentados na Figura 4.14, e é possível notar a aderência entre os picos de energia. Outra possibilidade é a utilização de um gráfico do tipo *Box plot*, como o da Figura 4.15. Entretanto, a motivação para a repetição do ensaio com o pêndulo foi a confrontação desses mesmos resultados com relação aos movimentos percebidos para o eixo z, o que é feito a seguir.

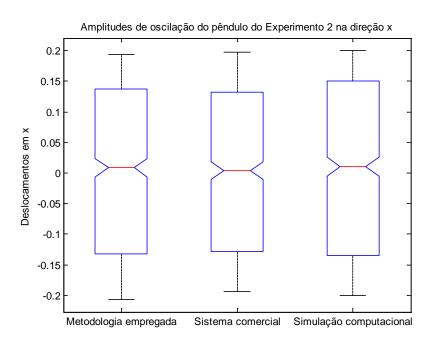


Figura 4.15: Comparação gráfica dos deslocamentos verticais percebidos pelo pêndulo do Experimento 2, para cada uma das abordagens consideradas.

4.2.4.2 Comparação dos movimentos no eixo z para o Experimento 2

Conforme mencionado anteriormente, os movimentos percebidos para as oscilações verticais do pêndulo utilizado no Experimento 1 guardavam importantes diferenças entre os resultados obtidos pelas três abordagens consideradas nesta dissertação. As hipóteses levantadas para explicar essas discrepâncias estavam relacionadas às amplitudes diminutas esperadas teoricamente e a qualidade da calibração efetuada para as câmeras convencionais. A fim de verificar essas afirmações, foram promovidas as alterações já explicitadas em termos de condição angular inicial conferida ao pêndulo e de troca da estrutura de calibração.

As modificações propostas impactaram diretamente nos resultados obtidos para essa direção, conforme pode ser visualizado graficamente na Figura 4.14. A fim de permitir comparações mais adequadas que a inspeção visual dos gráficos, foram realizadas análises nos domínios do frequência e do tempo, a fim de extrair informações referentes aos períodos e amplitudes percebidas em cada abordagem nas oscilações do pêndulo em cada direção considerada.

Os valores encontrados para os períodos de pico dos movimentos em direções paralelas ao eixo, a partir dos espectros de potência da Figura 4.14, são apresentados na Tabela 4.12, através da qual é possível notar o aumento considerável na aderência entre os resultados percebidos. As discrepâncias, anteriormente, eram da ordem 3,7% e diminuíram para níveis irrisórios, sendo que novamente o sistema comercial percebeu um período de oscilação idêntico ao esperado teoricamente.

Além da comparação dos períodos de oscilação, outra análise passível de ser efetuada se refere às amplitudes máximas médias alcançadas pelo pêndulo e percebidas pelos sistemas de câmeras. A Tabela 4.13 apresenta esses valores, juntamente com os erros e incertezas associados.

Tabela 4.12: Períodos de oscilação do pêndulo na direção z – Experimento 2.

Abordagem	Período de oscilação T (em s)	Diferença percentual
Simulação computacional	0,954	-
Sistema comercial de câmeras	0,954	0,00%
Procedimento proposto	1,000	0,06%

Tabela 4.13: Amplitude do pêndulo na direção z – Experimento 2.

Abordagem	A _z (m)
Simulação computacional	0,011 ± 0,003
Sistema comercial de câmeras	0,011 ± 0,001
Procedimento proposto	0,013 ± 0,003

Os resultados obtidos para as amplitudes verticais alcançadas pelo pêndulo do Experimento 2 mostraram melhor adequação entre si, melhorando sobremaneira a percepção dessas oscilações pelos sistemas de câmeras. A fim de facilitar a comparação foi confeccionada a Figura 4.16, apresentando esses resultados na forma de um *box plot*.

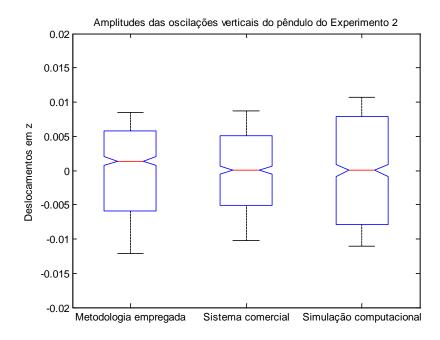


Figura 4.16: Comparação gráfica dos deslocamentos verticais percebidos pelo pêndulo do Experimento 2, para cada uma das abordagens consideradas.

4.2.5 Discussões acerca do Experimento 2

O Experimento 1, onde foi utilizado o modelo linearizado de um pêndulo, permitiu a comparação dos resultados obtidos apenas em uma direção. Frente aos objetivos desta dissertação, era imprescindível verificar se a metodologia empregada seria capaz de perceber movimentos bi ou tridimensionais em uma linha flexível sujeita a um movimento prescrito em seu topo. Dessa maneira, o Experimento 2 foi concebido com este propósito.

Sob as hipóteses de que os resultados anteriormente obtidos haviam sido prejudicados pela qualidade da calibração de câmeras efetuada e pelas oscilações diminutas adquiridas pelo pêndulo, dada a condição angular inicial a ele imposta, o ensaio foi refeito, desta vez com a utilização de outra estrutura de calibração. Além disso, o ângulo inicial conferido à massa concentrada do pêndulo foi triplicado.

Essas duas alterações foram suficientes para que os objetivos deste ensaio fossem alcançados. Os resultados obtidos para as direções x e z foram coerentes entre si e guardaram considerável adequação. A rotina computacional confeccionada recebe

como entrada os vídeos das câmeras convencionais e extrai informações dos mesmos a respeito dos movimentos em cena. Os resultados obtidos, e a confrontação deste com as demais abordagens, permitem assegurar que o programa desenvolvido em ambiente Matlab[®] é adequado para os objetivos deste trabalho.

O próximo ensaio tem por objetivo a aferição do dispositivo atuador descrito na seção 3.1.4 e que será utilizado para a imposição de movimentos à linha flexível dos experimentos principais. Os testes efetuados nesse equipamento visam confrontar o movimento imposto (conhecido) e o percebido pelo sistema comercial, a fim de confrontações futuras. Os movimentos impostos ao equipamento foram, todos, em duas dimensões.

4.3 EXPERIMENTO 3: AFERIÇÃO DO DISPOSITIVO ATUADOR

O Experimento 3 foi concebido com a finalidade de testar o funcionamento do dispositivo atuador, além de avaliar a precisão dos movimentos prescritos pelo mesmo. Para tanto, foram realizados três experimentos de aferição (A, B e C), monitorados pelo sistema comercial de câmeras, com as características explicitadas na Tabela 4.14. Os objetivos destes ensaios eram testar o funcionamento do equipamento e avaliar qual o nível de acurácia existente entre o movimento imposto pelo atuador e o percebido pelo sistema comercial de câmeras, apenas para fins de calibração do primeiro.

Tabela 4.14: Características dos movimentos impostos ao dispositivo atuador para fins de aferição do mesmo com a utilização do sistema comercial de câmeras.

	Movimen	to circular	Movimento de	e deriva em x
	Raio (mm)	Período (s)	Amplitude (mm)	Período (s)
Experimento 3A	50,0	5,0	0,0	-
Experimento 3B	50,0	5,0	50,0	5,0
Experimento 3C	50,0	5,0	100,0	40,0

4.3.1 Aparato utilizado no Experimento 3

Para os ensaios que compõem este experimento, foram utilizados dois dos equipamentos descritos na seção 3.1: o sistema comercial de câmeras e o dispositivo atuador. Como o principal objetivo é avaliar a adequação entre o movimento imposto por um e o percebido pelo outro, não se fez necessária a utilização do conjunto de câmeras convencionais. Com isso, buscou-se criar uma base de comparação para os ensaios principais.

O arranjo experimental utilizado nos Experimentos 3A, 3B e 3C está ilustrado na Figura 4.17, na qual é possível visualizar o dispositivo atuador, composto pela estrutura metálica anteriormente apresentada na Figura 3.10. Na Figura 4.17, é possível visualizar, sobre a estrutura metálica do atuador, a placa (quadrada) através da qual o movimento é. Sobre essa placa, foi afixado um alvo reflexivo, como os descritos no item 3.1.1.2 e ilustrados na Figura 3.5. Esse alvo foi rastreado pelo sistema comercial de câmeras, a partir da imposição dos movimentos constantes na Tabela 4.14.



Figura 4.17: Arranjo experimental para os ensaios de aferição do dispositivo atuador.

4.3.2 Resultados obtidos no Experimento 3A

Conforme apresentado anteriormente na Tabela 4.14, para o Experimento 3A houve a prescrição de um movimento circular de 50,0mm de raio e período 5,0s, sem deriva.

Na Figura 4.18 estão ilustrados graficamente os registros temporais do alvo posicionado sobre o dispositivo atuador nas três direções e seus respectivos espectros de potência.

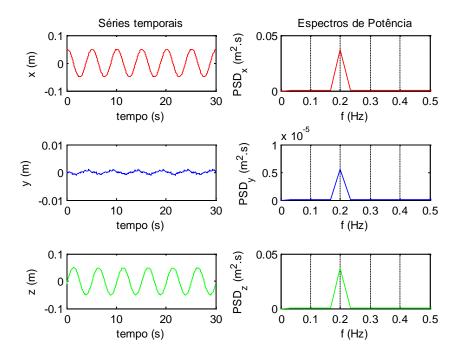


Figura 4.18: Resultados obtidos no experimento 3A – sistema comercial de câmeras. Séries temporais e espectros de potências nas três direções, relativos ao ensaio de movimentação livre do atuador: movimento circular de raio 50,0mm e frequência 0,2Hz.

As análises temporal e espectral dos dados a que se referem os gráficos apresentados na Figura 4.18 possibilitaram a confecção da Tabela 4.15, na qual estão explicitados os valores de amplitude média e frequência dos movimentos detectados nas direções x, y e z.

Tabela 4.15: Amplitudes e frequências percebidas pelo sistema comercial de câmeras, a partir do movimento prescrito pelo dispositivo atuador no Experimento 3A.

Direção	Amplitude ^(*) (mm)	Frequência (Hz)
Eixo x	49,5 ± 0,5	0,2
Eixo y	1.0 ± 0.3	0,2
Eixo z	49.3 ± 0.5	0,2

^(*) Nesse caso, a amplitude corresponde ao valor médio entre os extremos máximo e mínimo das posições atingidas pelo alvo.

Os valores apresentados na Tabela 4.15 em adição à Figura 4.18, na qual pode ser visualizada a trajetória do alvo nas direções x e z, permitem concluir que o movimento percebido pelo sistema comercial de câmeras, ilustrado na Figura 4.19, é circular de raio (49.4 ± 0.5) mm e frequência 0.2Hz (correspondendo a um período de 5.0s), mostrando grande adequação entre o movimento prescrito pelo atuador e o percebido pelo sistema comercial, com diferença da ordem de 1.0%.

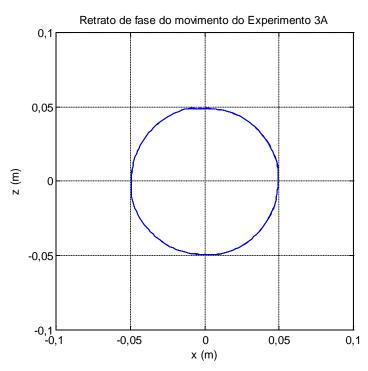


Figura 4.19: Visualização do movimento detectado no plano xz pelo sistema comercial de câmeras no Experimento 3A.

4.3.3 Resultados obtidos no Experimento 3B

Para o segundo experimento de aferição do dispositivo atuador, foi prescrito ao alvo reflexivo um movimento circular de raio 50,0mm e período 5,0s em adição a um movimento de deriva em uma direção paralela ao eixo x, de amplitude 50,0mm e período 5,0s.

Teoricamente, o movimento resultante dessa composição implicaria em uma trajetória elíptica de eixo menor 50,0mm, eixo maior 100,0mm e período 5,0s. A fim

de verificar essa asserção, foram confeccionados os gráficos da Figura 4.20, onde estão ilustradas as séries temporais e os respectivos espectros de potência do movimento percebido pelo sistema comercial de câmeras, nas três direções. A partir destes, foi possível construir a Tabela 4.16 com a compilação das principais características desses movimentos, resultante da análise dos dados provenientes do sistema comercial de câmeras.

Da Figura 4.20 é possível depreender que as oscilações na direção x têm, aproximadamente, o dobro da amplitude e mesma freqüência que as vibrações na direção z. Essa constatação é corroborada pelo pico no espectro de potência em x, que é cerca de quatro vezes mais intenso que na direção z.

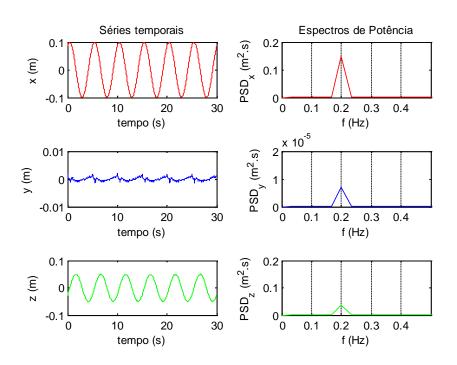


Figura 4.20: Resultados obtidos no experimento 3B – sistema comercial de câmeras. Séries temporais e espectros de potências nas três direções, relativos ao ensaio de movimentação livre do atuador: movimento circular de raio 50,0mm e período 5s em adição a um movimento de deriva em x de amplitude 50,0mm e período 5s.

Como resultado, o movimento percebido pelo sistema comercial é coerente com aquele prescrito pelo dispositivo atuador, com diferenças da ordem de 1,0% em cada uma das direções, conforme pode ser percebido a partir da análise da Tabela 4.16 e da visualização da trajetória do alvo na Figura 4.21. Conforme esperado, as

oscilações da direção y, perpendicular ao plano vertical da placa móvel do atuador, são diminutas com relação às percebidas nas demais direções.

Tabela 4.16: Amplitudes e frequências percebidas pelo sistema comercial de câmeras, a partir do movimento prescrito pelo dispositivo atuador no Experimento 3B.

Direção	Amplitude (mm)	Frequência (Hz)
Eixo x	$99,3 \pm 0,5$	0,2
Eixo y	$1,7 \pm 0,3$	0,2
Eixo z	$49,4 \pm 0,5$	0,2

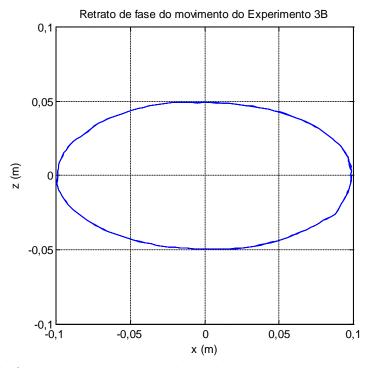


Figura 4.21: Trajetória do movimento detectado no plano xz pelo sistema comercial de câmeras no Experimento 3B.

4.3.4 Resultados obtidos no Experimento 3C

O último movimento prescrito, para fins de aferição do dispositivo atuador, refere-se à composição de um movimento circular, de raio 50,0mm e período 5,0s, e um movimento de deriva na direção x de amplitude 100,0mm e período 40,0s. Teoricamente, é de se esperar que o movimento resultante tenha amplitude variável no tempo com máximos e mínimos dependentes da fase entre os movimentos componentes. Por outro lado, o tempo de aquisição do movimento foi de 30,0s, insuficiente para uma oscilação completa do movimento de deriva, sendo necessário levar esse fato em consideração para as análises que serão feitas.

As séries temporais nas três direções, bem como seus respectivos espectros de potência, estão ilustradas graficamente na Figura 4.22, a partir da qual é possível verificar as diminutas oscilações na direção perpendicular ao movimento prescrito, como esperado.

Em adequação ao que era previsto teoricamente, picos de energia aparecem na frequência de 0,2Hz, além de outro ressalto, mais intenso, em 0,033Hz, aproximadamente. Este último é resultado do tempo de aquisição ser 25% menor que o período do movimento de deriva. Dessa maneira, o pico de energia mais saliente aparece nessa freqüência e não em 0,025Hz (correspondente ao período de 40,0s), como seria de se esperar se o tempo de aquisição do sinal tivesse sido maior que o período da deriva. É possível notar, a partir dos valores constantes na Tabela 4.17, que existem pequenas diferenças entre o movimento prescrito e o percebido pelo sistema comercial de câmeras.

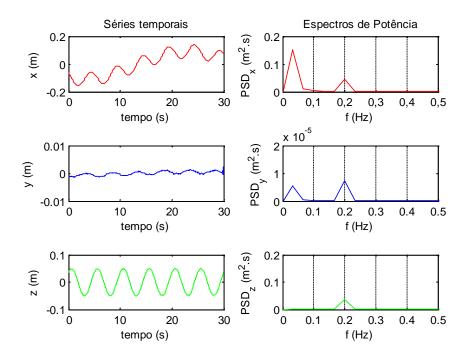


Figura 4.22: Resultados obtidos no experimento 3C – sistema comercial de câmeras. Séries temporais e espectros de potências nas três direções, relativos ao ensaio de movimentação livre do atuador: movimento circular de raio 50,0mm e período 5s em adição a um movimento de deriva em x de amplitude 100,0mm e período 40,0s.

Por fim, a Figura 4.23 apresenta a trajetória do movimento detectado. A partir dele, é possível verificar a coerência dos valores expressos na Tabela 4.17. Cabe reiterar que o movimento prescrito foi monitorado por um tempo inferior ao período de deriva imposto, o que implica na trajetória aberta possível de ser visualizada na trajetória da Figura 4.23.

Tabela 4.17: Amplitudes e frequências percebidas pelo sistema comercial de câmeras, a partir do movimento prescrito pelo dispositivo atuador no Experimento 3A.

Direção	Amplitude (mm)	Frequência (Hz)
Eixo x	147,3 ± 0,8	0,033 e 0,2
Eixo y	1.8 ± 0.3	0,2
Eixo z	$49,4 \pm 0,5$	0,2

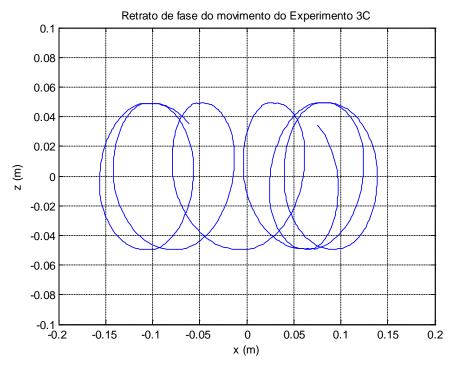


Figura 4.23: Trajetória do movimento detectado no plano xz pelo sistema comercial de câmeras no Experimento 3C.

4.3.5 Discussões acerca dos Experimentos 3A, 3B e 3C

Relativamente aos principais objetivos dos ensaios de aferição do dispositivo atuador, é possível concluir que não existem discrepâncias significativas entre os movimentos prescritos pelo equipamento e aqueles percebidos pelo sistema comercial de câmeras. Dessa maneira, é possível tomar os resultados deste último como base de comparação para os próximos ensaios entre eventuais valores teóricos esperados e as análises decorrentes da metodologia sugerida com a utilização do conjunto de câmeras convencionais.

As demais conclusões acerca desse pequeno conjunto de experimentos são pontuais e relacionadas às características intrínsecas de cada um deles, tendo sido discutidas, mesmo que sucintamente, nas seções em que os mesmos foram descritos.

Os próximos ensaios, descritos nas seções 4.4 e 4.5, têm como objetivo principal a comparação dos movimentos percebidos pelos sistemas de câmeras utilizados no

escopo deste trabalho com os esperados teoricamente ou através de simulação computacional. Para ambos os ensaios será utilizada a linha flexível descrita na seção 3.1.3, tornando esses experimentos os mais importantes para que os objetivos principais desta dissertação sejam alcançados, ou seja, a identificação geométrica de linhas sob configuração inicial de catenária e a análise de suas respostas dinâmicas frente a uma excitação externa em seu topo. Na tentativa de melhorar os resultados obtidos na direção y, perpendicular ao plano vertical em que pretensamente a linha permanece confinada, a região a ser calibrada será reduzida a vizinhanças do TDP.

4.4 EXPERIMENTO 4: ESTÁTICA DE UMA LINHA FLEXÍVEL

Para o Experimento 4 foi utilizada a linha flexível descrita na seção 3.1.3, com monitoramento através dos dois sistemas de câmeras anteriormente apresentados. As principais características físicas da linha utilizada encontram-se compiladas na Tabela 3.3.

O objetivo desse ensaio é identificar a geometria adquirida pela linha flexível, quando se encontra em equilíbrio estático, monitorando dois conjuntos de oito alvos cada nela posicionados. Esses alvos, dispostos regularmente ao longo da linha, podem ser visualizados na Figura 4.24, onde é possível distinguir um conjunto de fitas adesivas pretas (rastreadas pelo conjunto de câmeras convencionais) e um arranjo de esferas reflexivas (apropriadas para monitoramento pelo sistema comercial de câmeras). É importante salientar que essa disposição não permite a comparação absoluta das séries temporais de cada alvo, dado que cada conjunto de câmeras monitora diferentes alvos, em diferentes posições. Por outro lado, é de se esperar que essas características não interfiram significativamente na geometria estática da linha flexível ensaiada.

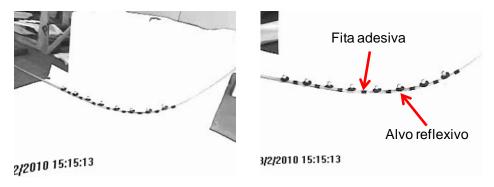


Figura 4.24: Linha flexível utilizada no Experimento 4, monitorada pelo conjunto de câmeras convencionais.

4.4.1 Aparato utilizado no Experimento 4

A montagem do aparato experimental para este ensaio contou com a linha flexível, lançada em catenária direta com comprimento total de 6,980m, pretensamente confinada no plano vertical xz, com um pequeno trecho repousando sobre o solo e a extremidade oposta fixada ao rolamento do dispositivo atuador, conforme ilustrado em detalhe na Figura 4.25.

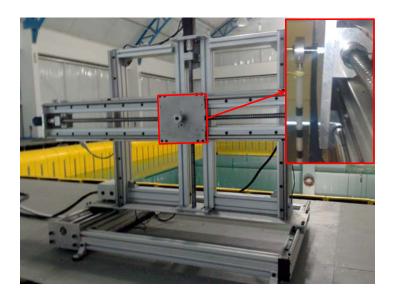


Figura 4.25: Detalhe da fixação da linha flexível ao dispositivo atuador através de um rolamento que permite a rotação da mesma no plano vertical que a contém.

A calibração das câmeras do sistema comercial para a região de interesse do ensaio foi feita conforme explicitado no item 3.1.1.2. Para a calibração das câmeras convencionais foi novamente utilizada a estrutura apresentada na Figura 3.7 (lado direito), monitorada em duas posições distintas, separadas de 40,0mm na direção do eixo y, conforme o esquema ilustrado na Figura 4.26. A rotina numérica de análise confeccionada para este ensaio permitia o reconhecimento de 48 pontos de controle a cada *frame* de calibração, sendo 32 em um plano paralelo ao plano xz e outros 16 no plano xy. Conforme discutido na seção 2.4.1, o Método DLT exige a identificação de, no mínimo, seis pontos de controle para a calibração. O resultado desse processo foi a determinação dos onze parâmetros DLT de calibração, definidos em 2.4.1, para cada uma das câmeras convencionais. A região calibrada abrangia uma região de 0,80m de comprimento (direção x), 0,12m de largura (direção y) e 0,50m de altura (direção z), suficiente para encerrar os alvos dispostos sobre a linha, mesmo quando sujeita às movimentações impostas, situação discutida na seção 4.5.

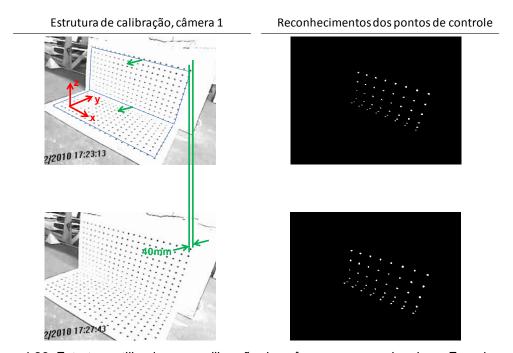


Figura 4.26: Estrutura utilizada para calibração das câmeras convencionais no Experimento 4, disposta em duas posições distintas, separadas por 40mm paralelamente ao eixo y e os respectivos pontos de controle reconhecidos.

Após a calibração, a linha flexível foi fixada ao dispositivo atuador e lançada sob catenária direta, de maneira que a região que continha os alvos permaneceu dentro

do volume calibrado, de acordo com o esquema ilustrado, sem escala, na Figura 4.27. É importante notar, a partir desta figura, que a linha foi ancorada em uma posição "near", ou seja, apenas um pequeno trecho da mesma repousava sobre o solo, proporcionalmente ao seu comprimento total. A importância dessa informação será explicada adiante, na seção 4.4.3, onde são discutidos os resultados obtidos neste ensaio. Cabe ressaltar que a linha flexível foi monitorada concomitantemente, por dez segundos a 30Hz, usando o conjunto de câmeras convencionais e também o sistema comercial. Esse intervalo de tempo é mais que suficiente para os propósitos deste experimento.

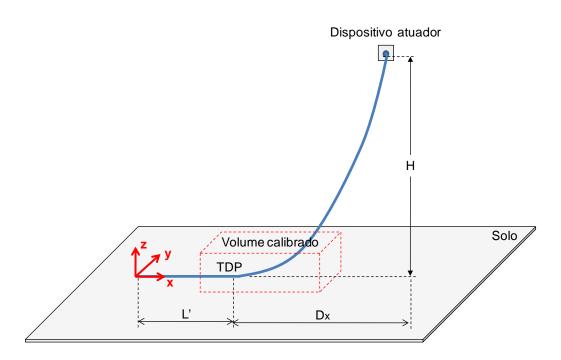


Figura 4.27: Esquema ilustrativo, sem escala, do arranjo experimental utilizado para os ensaios estáticos e dinâmicos da linha flexível.

Em destaque, a região calibrada.

Findo o monitoramento da linha flexível, cada *frame* obtido pelas câmeras convencionais foi processado automaticamente, com uso de limiarização, binarização, aplicação de filtro mediana e abertura. Após esses procedimentos, a imagem resultante continha dezesseis alvos, conforme pode ser visualizado na Figura 4.28. Os centros de área de cada um deles foram determinados, em

coordenadas da imagem. A seguir, as posições referentes aos alvos do sistema comercial foram automaticamente descartadas.

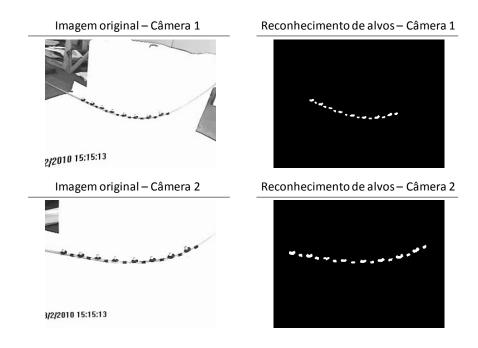


Figura 4.28: Imagens originais e reconhecimento, por processamento digital, dos alvos dispostos sobre a linha do Experimento 4, para ambas as câmeras convencionais utilizadas.

Após a segmentação dos alvos com relação ao restante da imagem, os mesmos foram isolados um a um e seus centros de área calculados em coordenadas da imagem, em *pixels* (SCP). Foi considerado, por hipótese, que esse centro de área coincide com o centro de massa da região delimitada pelo alvo, a menos de um raio da linha. Conhecidas as posições de cada alvo no SCP e os parâmetros DLT obtidos na calibração das câmeras foi possível a determinação de suas coordenadas no sistema de referências do objeto.

4.4.2 Resultados obtidos no Experimento 4

Após a determinação das coordenadas reais dos alvos dispostos sobre a linha flexível, foi feita a comparação gráfica das mesmas com os resultados advindos do

sistema comercial de câmeras, conforme ilustrado na projeção dos alvos sobre o plano xz (Figura 4.29) e sobre o plano yz (Figura 4.30).

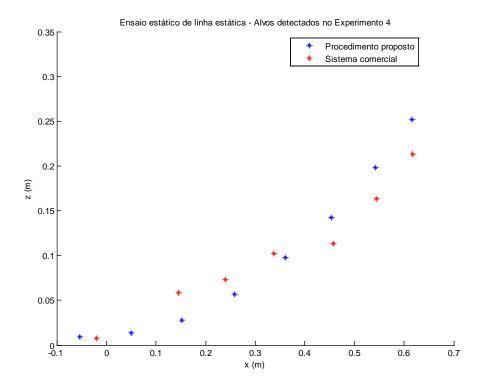


Figura 4.29: Identificação das posições dos alvos posicionados sobre a linha flexível, lançada em catenária direta do Experimento 4 – plano xz.

A fim de facilitar a compreensão do texto que se segue e das análises ulteriores, adotar-se-á a seguinte nomenclatura: o alvo mais próximo ao TPD será sempre denominado alvo 1. Os demais, em direção ao topo da linha, receberão numeração consecutiva e crescente.

É importante notar que o sistema comercial de câmeras não foi capaz de identificar corretamente um dos alvos (o número 2), que foi retirado das análises gráficas. Além disso, o conjunto de câmeras convencionais não percebeu deslocamentos significativos da linha fora do plano vertical que a contém, como era esperado. A Figura 4.30 ilustra os alvos corretamente identificados, por ambos os conjuntos de câmeras, no plano yz. É possível visualizar, nesta figura, a ausência do alvo 2, não reconhecido pelo sistema comercial, bem como um deslocamento lateral

considerável de três dos alvos (numerados de 3 a 5) percebido por esse mesmo sistema.

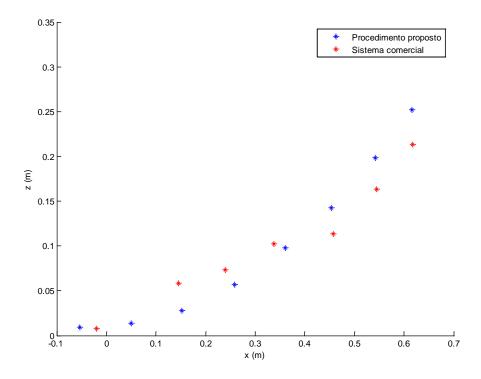


Figura 4.30: Identificação das posições dos alvos posicionados sobre a linha flexível, lançada em catenária direta do Experimento 4 – plano yz.

Após a identificação dos alvos e de suas respectivas coordenadas reais, foi feita uma interpolação numérica dos mesmos, para cada um dos sistemas de câmeras, através da equação clássica da catenária dada pela Equação (2.59). A Figura 4.31 ilustra graficamente essa aproximação. Essa interpolação foi feita apenas para a projeção dos mesmos no plano xz, até que a projeção dos alvos sobre o solo, na direção x, fosse igual a 2,401m, valor numericamente igual ao medido para o parâmetro Dx da Figura 4.27, na qual estão ilustradas as características físicas da linha ensaiada. Esse valor foi escolhido a fim de propiciar a comparação da cota máxima percebida por ambos os sistemas de câmeras com a altura do topo da linha com relação ao topo, que neste ensaio foi H = 5,355m. Para esse valor de projeção sobre o eixo x, a metodologia empregada calculou uma cota vertical de 5,335m, diferindo do valor medido em 0,37%, enquanto que o sistema comercial percebeu uma cota de 5,501m, uma diferença de 2,76% com relação ao parâmetro H. Este

último resultado pode ser explicado com o uso da Figura 4.29, na qual podem ser visualizadas as já citadas diferenças entre os alvos percebidos pelo sistema comercial e a interpolação numérica para a melhor catenária passando por esses pontos. É possível notar, assim, "descontinuidades" entre os conjuntos de alvos de 3 a 5 e 6 a 8. A simulação numérica realizada foi feita com o uso do programa Anflex, que leva em consideração as rijezas axial e flexional da linha ensaiada.

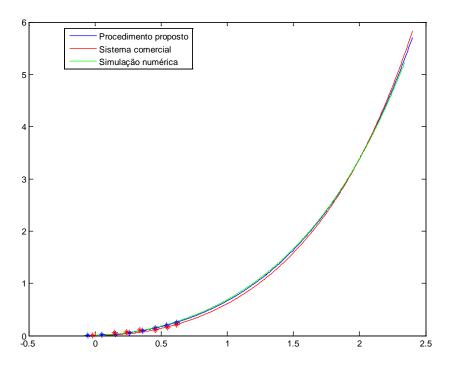


Figura 4.31: Aproximação gráfica por catenária dos alvos reconhecidos pelos sistemas de câmeras. Os asteriscos representam os alvos reconhecidos e as linhas cheias suas respectivas aproximações pela equação da catenária por meio de interpolação numérica.

A interpolação dos alvos pela clássica equação da catenária gerou os aqui denominados parâmetros livres da catenária, definidos no final da seção 2.5.2. Os valores encontrados para esses parâmetros estão compilados na Tabela 4.18, onde é possível visualizar a comparação percentual dos mesmos, tomando como referência os valores esperados teoricamente (simulação computacional).

Tabela 4.18: Valores dos parâmetros livres da linha flexível lançada em catenária no Experimento 4.

Abordagem	а	Δ%(*)	С	k	Δ%
Simulação computacional	1,109	-	0,000	-0,902	-
Sistema comercial	1,151	3,79%	-0,033	-0,863	-4,32%
Procedimento proposto	1,095	-1,26%	-0,040	-0,904	0,22%

^(*) Diferença percentual calculada com relação aos resultados da abordagem analítica. Não é definido para o parâmetro "C" dado que seu valor teórico é nulo.

É possível verificar, a partir da Tabela 4.18 e da Figura 4.31, que existe maior aderência entre os valores dos parâmetros livres obtidos através de simulação numérica e dos calculados a partir da metodologia empregada. Esse resultado não era de todo esperado, dada a acurácia normalmente apresentada pelo sistema comercial. Entretanto, a citada "descontinuidade" apresentada pelos alvos, em sua identificação por esse sistema, pode ter sido responsável pelas discrepâncias nos valores desses parâmetros.

4.4.3 Discussões acerca do Experimento 4

O Experimento 4, embora preliminar, atendeu a um dos principais objetivos do presente texto: a identificação geométrica de uma linha flexível, através do processamento e análise de imagens.

O sistema comercial de câmeras utilizado para monitoramento dos ensaios é uma das formas utilizadas para confronto dos resultados obtidos com as câmeras convencionais e a metodologia proposta. Em geral, esse sistema apresenta resultados bastante coerentes com o esperado, embora possam ocorrer desvios significativos na identificação da posição de um ou mais alvos, como ocorreu nesse experimento. A falta de identificação de um dos alvos, em adição à aparente identificação incorreta de outros três alvos, sugere que não foram garantidas condições ideais para utilização desse sistema de câmeras: o fabricante recomenda

que os alvos sejam dispostos, preferencialmente, sobre um fundo escuro, a fim de facilitar o processo de limiarização, evitando que outras regiões da imagem sejam erroneamente interpretadas como alvos. A despeito dos resultados do sistema comercial foi possível compará-los com as análises teórica e por processamento de imagens. Para o Experimento 4, as discrepâncias nos valores dos parâmetros livres da catenária, obtidos a partir deste conjunto de câmeras, foram da ordem de 4%, quando comparados com as demais abordagens.

Por outro lado, os resultados advindos da metodologia proposta, após o tratamento e análise dos vídeos obtidos a partir das câmeras digitais convencionais, mostraram grande acurácia frente ao que era esperado teoricamente. A simulação computacional realizada levou em consideração as rijezas axial e flexional da linha, além de suas demais características físicas e geométricas e condição de lançamento, o que torna ainda mais relevante o resultado obtido. O parâmetro livre da catenária definido por $a=\frac{\mu}{T_0}$, o mais importante em termos geométricos, apresentou valores bem próximos para essas abordagens. A diferença de cerca de 1,26% pode ser devida a diversos fatores tais como a discretização da linha para efeitos de simulação, desvios intrínsecos ao processo de calibração e à própria aproximação dos alvos por uma catenária, entre outros.

Cabe ressaltar que a estrutura de calibração utilizada, bem como a decisão de restringir a região calibrada, principalmente na direção paralela ao eixo y, parece ter sido fundamental para a grande aderência observada.

4.5 EXPERIMENTO 5: DINÂMICA DE UMA LINHA FLEXÍVEL

Outro ensaio com a linha flexível foi realizado concomitantemente ao experimento anterior, utilizando os mesmos materiais, equipamentos e a calibração das câmeras. A separação em dois experimentos distintos é meramente fundamentada no tipo de análise realizada em cada caso. Para os testes aqui realizados, foi proposta uma matriz de ensaios a partir da imposição de movimentos harmônicos ao topo da linha flexível descrita na seção 3.1.3, prescritos pelo dispositivo atuador apresentado na

seção 3.1.4. Cada experimento realizado consistiu em movimentos circulares caracterizados pelas suas amplitudes e períodos. Além disso, foi efetuado um teste em que o movimento circular era realizado conjuntamente com deriva na direção do plano vertical que continha a linha estaticamente. Os ensaios, portanto, eram pretensamente bidimensionais. A Tabela 4.19 apresenta a matriz de ensaios utilizadas no Experimento 5.

Tabela 4.19: Matriz de ensaios do Experimento 5, efetuado com a linha flexível.

	Movimen	to circular	Movimento de	e deriva em x
	Raio (mm)	Período (s)	Amplitude (mm)	Período (s)
Experimento 5A	50,0	1,0	-	-
Experimento 5B	50,0	2,0	-	-
Experimento 5C	50,0	5,0	-	-
Experimento 5D	50,0	5,0	50,0	5,0
Experimento 5E	100,0	2,0	-	-
Experimento 5F	100,0	5,0	-	

Os ensaios relativos ao Experimento 5 são importantes no contexto do presente trabalho, pois foram realizados em condições semelhantes às que se pretende utilizar para os ensaios finais. Por esse motivo, esse conjunto de experimentos deve fornecer subsídios para proporcionar um entendimento mais abrangente das condições necessárias para a realização dos testes finais. Entretanto, dado o caráter preliminar destes ensaios e a fim de não sobrecarregar o texto com a grande quantidade de resultados gerados, apenas o Experimento 5A, cujas características estão compiladas na Tabela 4.19, será aqui descrito e suas análises apresentadas.

Para cada condição ensaiada, foram gerados dois vídeos digitais, a partir do conjunto de câmeras digitais convencionais. A cada *frame*, para ambos os vídeos, as técnicas de processamento digital de imagens aplicadas tinham por objetivo o

descolamento dos alvos do restante da imagem, a fim de propiciar a determinação de seus centros de área para posterior análise. Impôs-se a condição de reconhecimento de todos os alvos, em todos os *frames*, de maneira a permitir o confronto das séries temporais a serem determinadas com as advindas do sistema comercial. A Figura 4.32 ilustra uma sequência de *frames*, com a respectiva aplicação dessas técnicas, a fim de exemplificar esse procedimento.

Após a segmentação dos alvos e a determinação das coordenadas de cada um dos alvos dispostos sobre a linha, *frame* a *frame*, os resultados obtidos foram compilados e organizados de maneira a propiciar a confecção dos gráficos relativos às análises que se seguem e que são apresentadas na seção 4.5.1.

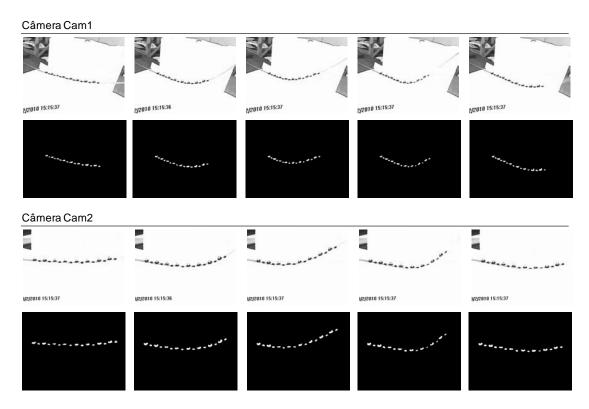


Figura 4.32: Exemplo de sequência de *frames*, obtidos a partir das câmeras convencionais, com o respectivo reconhecimento de alvos pelo procedimento proposto.

4.5.1 Resultados obtidos no Experimento 5

Diversos tipos de análises podem ser feitos com resultados provenientes de experimentos dinâmicos de linhas monitoradas por câmeras digitais. Dentre eles, é possível citar a análise das séries temporais de todos ou alguns alvos e o estudo do comportamento da linha em termos da geometria assumida pela mesma ao longo do tempo. A fim de separar os resultados desses dois tipos de análise, a presente seção será dividida em dois itens: o primeiro (4.5.1.1) para confrontar as séries temporais dos alvos 1, 5 e 8, e o segundo (4.5.1.2) destinado a avaliar o comportamento da linha como um todo, a partir do estudos das elásticas por ela assumidas ao longo do tempo. As comparações constantes desses itens são feitas a partir dos resultados provenientes dos dois sistemas de câmeras utilizados para monitoramento do ensaio.

4.5.1.1 Comparação das séries temporais de alvos isolados

As séries temporais de alvos isolados foram construídas a partir de suas coordenadas reais obtidas após a aplicação das técnicas de processamento de imagens descritas anteriormente sobre cada *frame* dos vídeos de monitoramento conseguidos com o uso das câmeras convencionais. A comparação é feita com os resultados provenientes do sistema comercial.

As figuras a seguir contêm as séries temporais e os respectivos espectros de potência construídos para a visualização gráfica dos resultados obtidos a partir do Experimento 5A. Os alvos escolhidos para análise foram o alvo 1 (Figura 4.33), o alvo 5 (Figura 4.35) e o alvo 8 (Figura 4.36), de maneira que o alvo 1 era o que se encontrava mais próximo do TDP e o alvo 8 o mais próximo do dispositivo atuador. As escalas foram mantidas as mesmas em todos os gráficos de uma mesma direção a fim de permitir a comparação alvo a alvo.

Qualitativamente, é possível depreender a partir dessas figuras um aumento nas máximas amplitudes alcançadas por um alvo, conforme o mesmo se encontra mais afastado do TDP. Para as três direções é possível perceber que quanto maior os deslocamentos, maior a adequação entre as curvas obtidas, confirmando a hipótese feita anteriormente de que a percepção de movimentos é tanto melhor quanto mais

suas amplitudes se afastam dos erros inerentes ao processo de calibração das câmeras. Como consequência, a aderência entre os resultados obtidos é maior para o alvo 8, mais suscetível ao movimento imposto ao topo da linha.

Além disso, os espectros de potência mostram claramente que a energia associada às oscilações é coerentemente maior para os alvos mais afastados do TDP. Assim, os espectros relativos às séries temporais do alvo 8 são os que apresentam picos de energia mais destacados.

A linha flexível ensaiada foi excitada harmonicamente a 1,0Hz e picos de energia podem ser verificados nessa frequência nos espectros de potência de todas as figuras, ainda que o procedimento proposto só tenha sido capaz de perceber essa freqüência, nos mesmos níveis que o sistema comercial, para os movimentos dos alvos 5 e 8.

Embora a linha estivesse pretensamente confinada a um plano vertical e o movimento bidimensional prescrito pelo dispositivo atuador tenha se dado apenas nesse plano, é possível perceber deslocamentos sutis na direção y. Essa movimentação pode ser visualizada a partir da série temporal relativa a essa direção ou através de seu respectivo espectro de potência. Para essa direção, os deslocamentos percebidos por ambos os sistemas parecem guardar maior aderência entre si.

A despeito dos ruídos presentes em todas as séries temporais e as defasagens devidas ao início dos monitoramentos, os deslocamentos percebidos por ambos os sistemas de câmeras são compatíveis entre si, tanto em termos de período de oscilação, quanto em amplitude. Mais uma vez, essa adequação é mais acentuada para o alvo 8.

Por fim, é interessante notar a excitação de um super-harmônico em 2,0Hz, visível nos gráficos construídos para os alvos 5 e 8. Esse tipo de resposta foi percebido por ambos os sistemas de monitoramento utilizados. A presença desse super-harmônico pode também ser notada a partir das séries temporais, dado que, como resposta ao movimento imposto à linha, era esperado que os gráficos relativos aos deslocamentos temporais de cada alvo tivessem um aspecto aproximadamente sinusoidal.

A partir desse ponto, serão tecidos comentários específicos sobre os movimentos de cada alvo, a partir da análise de suas respectivas séries temporais e os espectros de potência a elas relacionados.

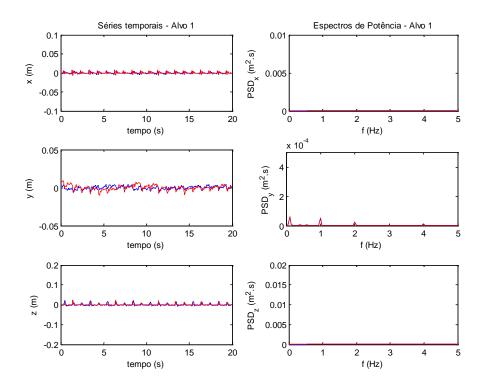


Figura 4.33: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 1 da linha utilizada no Experimento 5.

Em azul, os resultados obtidos por processamento de imagens; em vermelho, os resultados do sistema comercial.

Conforme mencionado anteriormente, o alvo 1 se encontrava próximo ao TDP, no equilíbrio estático. Dessa maneira, era de se esperar que este fosse o alvo sujeito aos menores deslocamentos nas direções em que o movimento foi prescrito. Uma inspeção visual da Figura 4.33 aponta para movimentações diminutas nas três direções. Os espectros de potência corroboram essa afirmação, sendo que apenas para a direção y aparecem picos discretos no espectro, ainda sim só percebidos pelo sistema comercial. Novamente, cabe citar que as escalas utilizadas para a construção dos gráficos desta seção foram mantidas constantes, o que inviabiliza a percepção visual de picos diminutos com relação às utilizadas. Apenas a título ilustrativo e apenas para este caso, as escalas foram modificadas a fim de mostrar

que, mesmo para deslocamentos diminutos, ambos os sistemas de câmeras foram capazes de perceber movimentações deste alvo. Como era esperado, as principais aderências entre ambos os sistemas ocorrem nas direções x e z, tanto para as séries temporais, quanto para os espectros de potência. No caso destes últimos, é possível perceber, ainda, o aparecimento de picos na frequência de 1,0Hz, referente à excitação no topo, e de super-harmônicos desta.

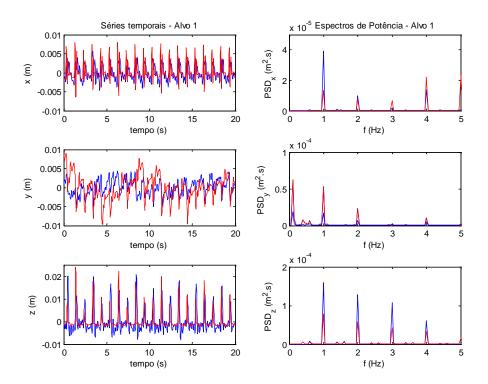


Figura 4.34: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 1 da linha utilizada no Experimento 5, com modificação das escalas. Em azul, os resultados obtidos por processamento de imagens; em vermelho, os resultados do sistema comercial.

Relativamente à Figura 4.34 é interessante notar a presença de diversos picos no espectro de potência, bem como as frequências em que eles ocorrem. Por sua importância destacada, as discussões relativas a esses resultados serão feitas na seção 5.4, onde são tecidos comentários sobre os ensaios finais. O fenômeno que se deseja discutir foi percebido também nos ensaios finais, embora de maneira mais atenuada.

O alvo 5, disposto aproximadamente ao centro da região monitorada da linha flexível, apresentou deslocamentos relativamente maiores que os do alvo 1, de maneira que, mesmo mantidas fixas as escalas dos gráficos, é possível visualizar, a partir da Figura 4.35, que ambos os sistemas de câmeras foram capazes de perceber movimentações com amplitudes semelhantes, para cada uma das direções, mas principalmente para aquelas em que o movimento de topo foi prescrito. A aderência mais acentuada ocorreu para a direção x e uma inspeção visual da série temporal é capaz de confirmar essa asserção. Além disso, o seu respectivo espectro de potência aponta para dois picos discretos nas frequências de 1,0Hz e 2,0Hz, sendo que a primeira delas era esperada, visto que se refere à imposição de movimento no topo, e a segunda parece ser devida a uma excitação de harmônicos superiores da linha. A fim de avaliar essa afirmação, foi feita uma análise dos modos de vibrar da linha ensaiada, a partir da técnica conhecida como WKB. É possível encontrar a formulação utilizada em Pesce; Martins (2006), que leva em consideração pequenas perturbações em torno da configuração estática de equilíbrio da linha para determinação de seus modos naturais de vibrar. A implementação dessa técnica, para os fins desta análise, foi feita através de uma rotina numérica criada para este fim. O resultado dessa análise, para os primeiros dez modos de vibrar da linha ensaiada, é apresentado na Tabela 4.20.

Tabela 4.20: Dez primeiros modos de vibrar da linha flexível, calculados a partir da técnica WKB.

	Modos de vibrar									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frequência (Hz)	0,48	0,95	1,42	1,90	2,37	2,85	3,32	3,80	4,27	4,75

Os resultados obtidos pela técnica WKB não são exatos, visto que se configuram como uma aproximação analítica para a solução do problema. Dessa maneira, a freqüência de 2,0Hz, que aparece de forma recorrente nos espectros de potência referentes às séries temporais do Experimento 5A, parece estar excitando o 4º modo

de vibrar da linha ensaiada. Este fato ajudaria a explicar os resultados das análises para o alvo 8, apresentados mais adiante nesta mesma seção.

Ainda com relação ao alvo 5, é possível perceber que o sistema comercial percebe oscilações na direção y maiores que as verificadas a partir do processamento das imagens provenientes das câmeras convencionais, conforme pode ser verificado a partir de seu espectro de potência na Figura 4.35. Nesta mesma figura, é possível notar que, para a direção z, ambos os sistemas identificaram um pico de energia acentuado na freqüência de 2,0Hz, mesmo que o movimento prescrito tenha sido a 1,0Hz. Novamente a manutenção das escalas pode ter ocultado picos em torno da excitação promovida na linha.

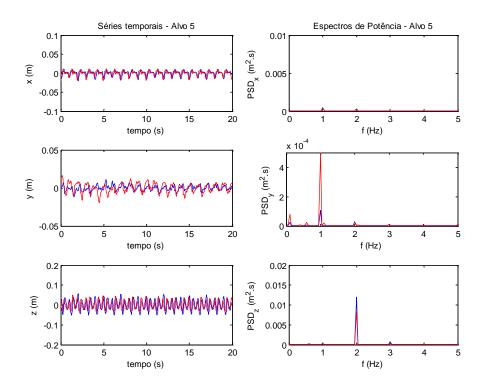


Figura 4.35: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 5 da linha utilizada no Experimento 5.

Em azul, os resultados obtidos por processamento de imagens; em vermelho, os resultados do sistema comercial.

Dada sua disposição sobre a linha, o alvo 8 foi o mais sujeito às excitações efetuadas no topo da linha. Dessa maneira, era de se esperar que esse alvo respondesse dinamicamente de forma mais acentuada que os demais, hipótese

corroborada pelos gráficos da Figura 4.36. A partir das séries temporais dessa figura, é possível notar visualmente uma aderência extremamente significante para os movimentos percebidos por ambos os sistemas para as direções x e z. Os picos de energia dos espectros referentes a essas direções confirmam essa aderência em termos quantitativos.

A despeito do alto nível de compatibilidade apresentado entre os resultados de ambos os sistemas de câmeras, uma observação importante deve ser feita: as amplitudes máximas atingidas nas direções x e, principalmente, z são destacadamente maiores que as esperadas. A amplitude do movimento prescrito ao topo da linha, neste ensaio, foi de 0,050m; entretanto, ambos os sistemas perceberam movimentações verticais do alvo 8 com aproximadamente o dobro da amplitude máxima esperada. Essa observação reforça a hipótese de que um dos modos de vibrar da linha, possivelmente o quarto, tenha sido excitado, de modo que a linha estivesse sujeita a fenômenos ressonantes.

Outro ponto interessante a ser notado refere-se aos deslocamentos percebidos por ambos os sistemas para a saída lateral da linha, com relação ao plano vertical a que ela estava pretensamente confinada: embora as amplitudes pareçam visualmente compatíveis entre si, o espectro de potência aponta para uma inversão das quantidades de energia relativamente aos picos a que elas se associam. Em outras palavras, a despeito das energias despendidas para os deslocamentos na direção y serem aproximadamente iguais, elas foram percebidas em diferentes frequências: o sistema comercial identificou que a maior parte da energia está associada à frequência do movimento prescrito, enquanto que a análise feita a partir do conjunto de câmeras convencionais aponta que a maior quantidade de energia está relacionada com o super-harmônico a 2,0Hz. Não é possível, entretanto, afirmar qual das análises apresenta maior coerência em termos dinâmicos.

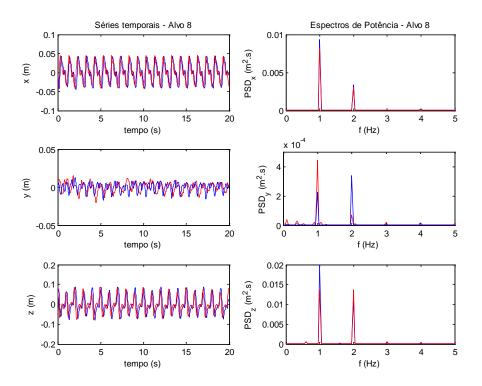


Figura 4.36: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 8 da linha utilizada no Experimento 5.

Em azul, os resultados obtidos por processamento de imagens; em vermelho, os resultados do

sistema comercial.

4.5.1.2 Comparação no domínio do tempo das geometrias assumidas pela linha

Alternativamente ao estudo dos deslocamentos de cada alvo isoladamente, é possível analisar a movimentação da linha como um todo, em seu trecho monitorado. Para avaliar a resposta dinâmica da linha, frente à excitação de topo prescrita, foi construída a Figura 4.37, na qual podem ser visualizadas as elásticas adquiridas pela linha. Cada uma das elásticas se refere à geometria adquirida pela linha e percebida pelos sistemas de câmeras utilizados, em cada um dos 600 frames empregados nas análises efetuadas para o Experimento 5.

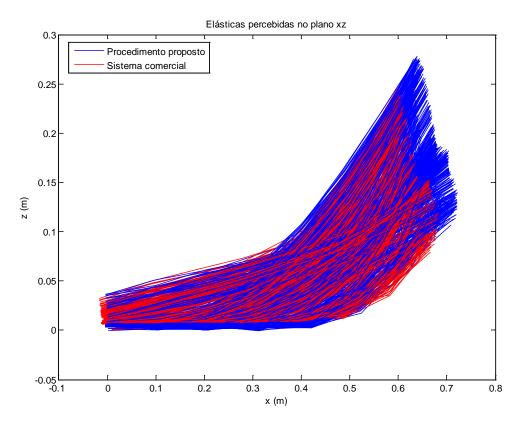


Figura 4.37: Geometria adquirida pela linha ensaiada, ao longo do tempo, a partir da percepção dos sistemas de câmeras utilizados no monitoramento do Experimento 5.

A partir da inspeção visual da Figura 4.37, é possível perceber que as adequações anteriormente citadas, com relação à percepção de ambos os sistemas de câmeras para cada um dos alvos dispostos sobre a linha, são confirmadas quando se analisa todo o trecho monitorado. Além disso, alguns aspectos importantes da Figura 4.37 são passíveis de serem visualizados:

- As elásticas se referem a alvos distintos, conforme ilustrado na Figura 4.24.
 Por esse motivo, as elásticas percebidas pelas câmeras convencionais parecem espacialmente deslocadas em relação ao eixo x;
- A extremidade esquerda das elásticas está relacionada à posição no alvo 1 e, portanto, sujeita a menores deslocamentos verticais que alcançaram, no máximo, 0,025m, conforme ilustrado na Figura 4.34;

 É possível perceber a adequação existente entre as amplitudes máximas atingidas pela extremidade direita quando se analisa a evolução da elástica no. Essa amplitude é da ordem de 0,020m para ambas as análises.

4.5.2 Discussões acerca do Experimento 5

O Experimento 5, embora pertencente a um conjunto de ensaios preliminares, foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho, visto ter demonstrado que a metodologia proposta para processamento e análise de vídeos provenientes de câmeras digitais convencionais é capaz de identificar corretamente a geometria assumida por uma linha, quando está é excitada harmonicamente em seu topo.

Essa conclusão é possível a partir das análises efetuadas e da confrontação realizada com o sistema comercial de câmeras.

A grande adequação entre os resultados obtidos estimulou a realização dos ensaios finais descrito no Capítulo 5, dando suporte prático à sua concepção.

Com relação aos estudos promovidos, considerando-se isoladamente os alvos dispostos sobre a linha, é importante notar que o conjunto de câmeras convencionais apresenta resultados mais próximos aos do sistema comercial quando os deslocamentos dos alvos são maiores que os erros inerentes à calibração das câmeras. Por este motivo, a aderência entre as amplitudes percebidas foi menor para o alvo 1 e para as saídas laterais da linha na direção y. A despeito dessa afirmação, cabe salientar, conforme citado anteriormente, que um importante resultado relativo a esse alvo requer uma análise mais detalhada, a qual é feita na seção 5.4.

Por outro lado, como um único alvo pouco interfere na evolução temporal das elásticas percebidas, esta última análise, sucintamente discutida no item 4.5.1.2, mostrou considerável aderência para os resultados provenientes dos sistemas de monitoramento.

4.6 DISCUSSÕES ACERCA DOS EXPERIMENTOS PRELIMINARES

Cada um de ensaios, aqui denominados Experimentos Preliminares, tiveram suas conclusões específicas tecidas nas respectivas seções em que foram apresentados e discutidos. A presente seção tem por objetivo explicitar as conclusões gerais do Capítulo 4, sem que sejam esmiuçados pontos específicos de cada ensaio.

Essas conclusões serviram de subsídio para a concepção e realização dos ensaios principais, que serão discutidos e analisados no próximo capítulo e, dentre elas, podem-se citar:

- No início do Capítulo 3, foram apresentadas duas estruturas de calibração, ilustradas na Figura 3.7. Nos Experimentos 1 e 2, foi utilizado o corpo de calibração apresentado do lado esquerdo desta figura. Os demais empregaram a outra estrutura ilustrada nessa figura (lado direito). Os resultados obtidos nos ensaios que utilizaram a segunda estrutura apresentaram maior aderência e menores incertezas associadas ao processo de calibração. Assim, a escolha por essa estrutura de calibração, para uso nos experimentos finais, parece natural;
- Ainda com respeito à calibração, a sequência de ensaios discutida permitiu concluir que os resultados obtidos a partir da metodologia proposta para processamento e análise de imagens guardam maior adequação com os advindos do sistema comercial quando a região calibrada não é muito mais extensa que os movimentos que se deseja avaliar;
- Deslocamentos diminutos, da ordem de 0,005m, foram passíveis de reconhecimento por ambos os sistemas, embora os resultados, nesse caso, não guardem a mesma aderência que as percebidas para oscilações de maiores amplitudes. Uma maneira de se evitar tais discrepâncias é aproximar as câmeras convencionais da linha a ser ensaiada, restringindo seu campo visual às proximidades dos alvos monitorados. Com isso, a região calibrada e monitorada passa a ser mais discretizada em termos de *pixels*, aumentando a precisão da calibração e no monitoramento em si;
- Em alguns dos casos estudados, apenas duas abordagens foram utilizadas,
 de maneira que, nos casos em que a aderência de resultados apresentava-se

baixa, não era possível uma discussão mais aprofundada ou uma decisão por qual sistema apresentava resultados mais coerentes com a realidade física. Propõe-se, assim, que as discussões e análises a serem realizadas para os ensaios finais sejam passíveis de confrontação com resultados analíticos ou obtidos através de simulações computacionais, por exemplo, através da utilização do Anflex;

- As análises realizadas ao longo do presente capítulo permitiram a discussão e confrontação dos resultados obtidos em relação a, pelo menos, duas abordagens distintas. Para os próximos ensaios, pretende-se utilizar três tipos de comparação;
- Os próximos ensaios devem demonstrar uma qualidade importante: a repetibilidade. Uma das condições necessárias a experimentações físicas é a possibilidade de sua repetição, sob as mesmas condições;
- No Experimento 5, uma condição inesperada foi percebida durante as análises: a excitação de modos de vibrar da linha flexível. Será feito o uso da técnica WKB anteriormente à definição da matriz de ensaios, a fim de que os movimentos prescritos ao topo da linha sejam realizados em freqüências distintas das que excitariam modos de vibrar da mesma;
- Outra conclusão importante está relacionada às séries temporais obtidas e confrontadas a partir dos resultados advindos dos dois sistemas de câmeras: foram utilizados dois conjuntos distintos de alvos, para percepção pelos conjuntos de câmeras. Tal fato inviabiliza a comparação quantitativa direta dos resultados obtidos. Sugere-se, assim, a utilização singular dos alvos do sistema comercial. Para que isso seja possível é necessário que haja uma inversão nos níveis de cores do objeto de interesse e do background da imagem. Assim, será imprescindível a completa troca de contrastes, de modo que o fundo da cena, anteriormente clara, seja o mais escuro possível a fim de permitir a identificação de alvos reflexivos;
- O foco dos experimentos finais será dado à análise dinâmica da linha, através da confrontação dos resultados obtidos pela metodologia empregada, com os advindos do sistema comercial, bem como os gerados através de simulação computacional (Anflex).

Capítulo 5

Ensaios com a Linha Flexível

5 ENSAIOS COM A LINHA FLEXÍVEL

Os ensaios físicos principais para o atendimento pleno dos objetivos desta dissertação serão descritos ao longo do presente capítulo. Os resultados obtidos anteriormente, bem como suas discussões e conclusões, principalmente as apresentadas na seção 4.6, foram imprescindíveis para a concepção e realização do conjunto de experimentos que serão aqui expostos.

Mais uma vez, o objetivo é identificar geometricamente a elástica assumida pela linha flexível e avaliar as séries temporais de alvos nela dispostos. A confrontação dos resultados obtidos será feita com aqueles advindos do sistema comercial e de simulações numéricas utilizando o Anflex. Cabe reiterar que a linha flexível utilizada foi a mesma dos experimentos anteriores, cujas características físicas estão compiladas na Tabela 3.3.

Ao contrário dos demais ensaios, algumas condições de preparação e execução dos experimentos tiveram características distintas e estão descritas em detalhes na seção 5.2. Dentre as modificações efetuadas podem-se citar, principalmente, o uso do mesmo tipo de alvo para os dois sistemas de câmeras, a inversão de contrastes e a utilização de movimentos de topo usuais em experimentos para avaliar a dinâmica de linhas, a fim de guardar semelhança física com situações reais de mares típicos.

5.1 O APARATO UTILIZADO NO EXPERIMENTO COM LINHA FLEXÍVEL

O monitoramento do experimento final contou novamente com os dois sistemas de câmeras. Respeitando as características técnicas das câmeras digitais convencionais utilizadas, foi feita a tentativa de aproximá-las o máximo possível da linha flexível, de maneira a restringir o campo visual da cena monitorada, conforme pode ser visualizado na Figura 5.1, na qual é possível conferir as posições dos dois

sistemas de câmeras com relação à linha flexível, a presença dos sete alvos reflexivos nela dispostos e um trecho da mesma repousando sobre o solo. A outra extremidade da linha flexível foi fixada ao rolamento existente no dispositivo atuador. As características geométricas da linha lançada sob configuração de catenária direta estão compiladas na Tabela 5.1.

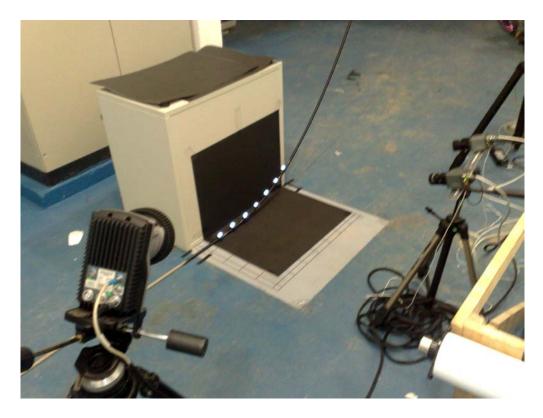


Figura 5.1: Arranjo do aparato junto ao solo para a execução do experimento final com linha flexível. É possível notar a disposição dos dois conjuntos de câmeras frente à cena de monitoramento e a condição estática da linha com os alvos nela dispostos.

Tabela 5.1: Características geométricas da linha lançada em catenária direta.

Símbolo	Descrição	Valor medido
D _x	Projeção horizontal do trecho suspenso	2,525m
L	Comprimento total da linha	16,097m
Ľ'	Comprimento sobre o solo	9,730m
Н	Projeção vertical do trecho suspenso	5,220m

Embora a Figura 5.1 ilustre a posição final das câmeras utilizadas no monitoramento dos ensaios finais, a calibração das câmeras antecedeu essa configuração final. A preparação e montagem do ensaio e detalhes da calibração das câmeras estão descritos na seção 5.2.

5.2 PREPARAÇÃO DO ENSAIO E CALIBRAÇÃO DAS CÂMERAS

Após a montagem da linha junto ao dispositivo atuador e seu lançamento em catenária direta sobre o solo a fim de avaliar sua configuração inicial, o conjunto foi desmontado para permitir a calibração das câmeras. Foi utilizada a estrutura de calibração apresentada na Figura 3.7 (lado direito). As condições de paralelismo e perpendicularismo dessa estrutura foram garantidas com o auxílio de um calibrador de nível automático, com precisão de 0,05°, que também pode ser visualizado na Figura 5.2.

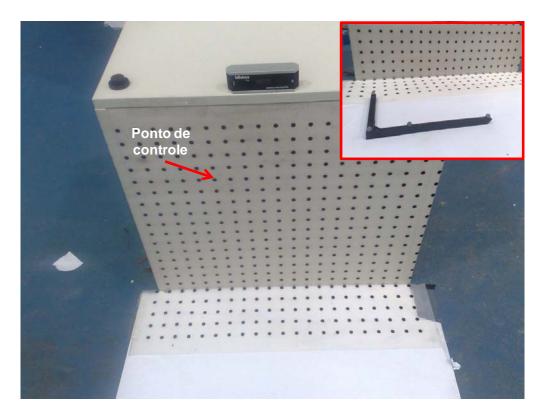


Figura 5.2: Preparação da estrutura de calibração utilizada nos ensaios finais. No detalhe, o posicionamento da estrutura de referência do sistema comercial.

Alguns cuidados essenciais tiveram que ser tomados a fim de facilitar a análises dos resultados obtidos na calibração e no monitoramento. As distâncias entre os círculos pretos presentes na estrutura de calibração, bem como seus diâmetros, foram medidos com o uso de um paquímetro. É possível visualizar a estrutura de referência utilizada para a calibração na Figura 5.2. No canto superior direito desta aparece, em detalhe, o posicionamento da estrutura de referência do sistema comercial de câmeras, com o objetivo de garantir, com o máximo de acurácia possível, a coincidência entre os centros dos sistemas de coordenadas dos dois conjuntos de câmeras.

Após a colocação da estrutura de referência no campo visual das câmeras utilizadas, foi feita a calibração das câmeras do sistema comercial, cujos resultados aparecem ilustrados na Figura 5.3. O passo seguinte foi a calibração das câmeras convencionais.

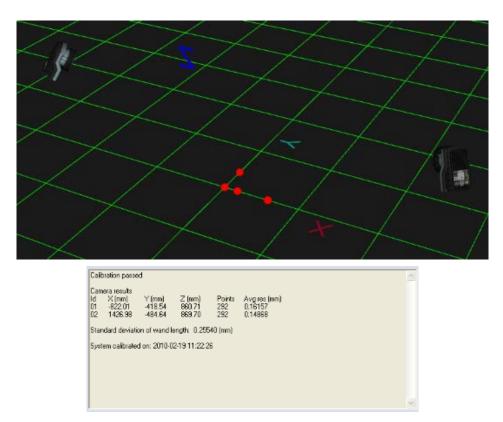


Figura 5.3: Resultados da calibração das câmeras do sistema comercial para o experimento final. Note-se a posição das câmeras, relativamente aos alvos reflexivos sobre a estrutura de referência (pontos vermelhos), e os resultados apontando erros médios da ordem de 0,2mm.

O procedimento de calibração das câmeras convencionais seguiu os passos descritos anteriormente no item 3.1.2.2, sob as mesmas condições dos Experimentos 4 e 5, conforme explicitado na seção 4.4.1. Resumidamente, a calibração ocorreu a partir do monitoramento da estrutura de referência colocada em duas posições distintas, separadas entre si por 100,0mm na direção y. Dos pontos de controle dispostos sobre a estrutura de calibração, foi feita a identificação de 42 deles a cada *frame* das câmeras convencionais. Destes, 28 pontos de controle estavam dispostos sobre o plano paralelo a xz e os 14 restantes no plano perpendicular. A Figura 5.4 ilustra, a título de exemplo, o resultado da identificação dos pontos de controle dispostos sobre o corpo de calibração, para as duas câmeras. As imagens resultantes (pontos brancos sobre fundo preto) foram obtidas a partir da aplicação de técnicas de processamento de imagem, já citadas anteriormente.

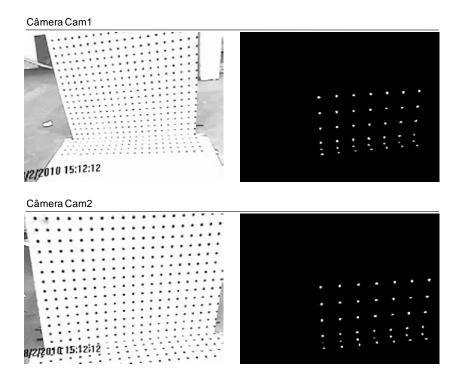


Figura 5.4: Identificação dos pontos de controle utilizados para a calibração das câmeras convencionais pelo Método DLT.

Após a identificação dos pontos de controle, foi possível estabelecer suas coordenadas, em *pixels*, no sistema de referência da imagem. Dado que suas coordenadas no sistema real são conhecidas *a priori*, foi possível calcular os onze parâmetros DLT para as câmeras convencionais, a partir do equacionamento apresentado na seção 2.4.1. A determinação desses parâmetros encerra a calibração propriamente dita. O volume calibrado compreende uma região de comprimento 0,80m (eixo x), largura 0,18m (eixo y) e 0,50m de altura (eixo z).

O passo seguinte foi a execução do experimento físico. A matriz de ensaios concebida para os experimentos finais contou com repetições em três séries de uma movimentação prescrita ao topo pelo dispositivo atuador. Conforme citado anteriormente, optou-se pela imposição de um movimento (circular) ao topo da linha. Essa escolha representa, na prática, a simulação de um acoplamento, por exemplo, de movimentos de *heave* (translação ao longo da direção vertical, paralela ao eixo z) e *surge* (translação ao longo da direção longitudinal, paralela ao eixo x) de uma unidade flutuante à qual uma linha real estivesse conectada. A Figura 5.5 ilustra os seis graus de liberdade de uma embarcação.

Com base em uma escala 1:100 (em unidades de comprimento), a representação de um mar típico, com ondas de amplitude A de 4,0m e período de pico T_p igual a 8,0s, equivale a um movimento circular de raio 0,020m e período 0,80s.

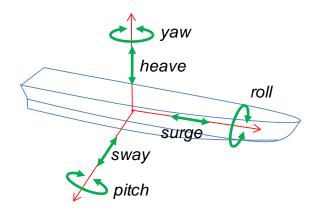


Figura 5.5: Os seis graus de liberdade de uma embarcação. Elaboração própria.

Definidas as condições do ensaio, o mesmo foi executado, com monitoramento a partir dos sistemas de câmeras. Os vídeos de monitoramento foram, então, processados e os alvos dispostos sobre a linha separados do restante da imagem. *Frame* a *frame*, foram determinadas as coordenadas de cada alvo no sistema de coordenadas da imagem. Os parâmetros DLT foram, então, utilizados para a reconstrução tridimensional, a partir da identificação dos alvos pelas duas câmeras convencionais, de acordo com os procedimentos descritos na seção 2.4.2.

5.3 RESULTADOS OBTIDOS NO EXPERIMENTO COM LINHA FLEXÍVEL

Determinadas as séries temporais de deslocamentos dos alvos dispostos sobre a linha flexível ensaiada, para ambos os sistemas de câmeras, tornou-se possível a compilação e organização dos resultados obtidos neste ensaio. Para cada uma das séries, um trecho de 20,0s de monitoramento foi utilizado para as análises, perfazendo um total de 600 *frames* por sistema.

Os resultados provenientes de cada análise são apresentados alvo a alvo (seções 5.3.1 a 5.3.3) e para o trecho de linha monitorado como um todo (seção 5.3.4). Para os estudos isolados dos alvos, optou-se pela análise dos elementos extremos (alvos 1 e 7, respectivamente o mais próximo e o mais afastado do TDP) e daquele localizado mais ao centro (alvo 4). No caso dessas análises, são sempre apresentados três conjuntos de seis gráficos. Cada conjunto corresponde a uma das repetições efetuadas e os gráficos contêm as séries temporais e seus respectivos espectros de potência para cada uma das três direções consideradas. São discutidos aspectos pontuais de cada repetição e, em seguida, uma análise do comportamento médio geral apresentado pelos alvos. No estudo das geometrias adquiridas pela linha ao longo dos ensaios, são tecidas as considerações pertinentes para o trecho monitorado, compreendendo os sete alvos utilizados.

Assim, as confrontações cabíveis foram feitas a partir das percepções dos movimentos pela metodologia já apresentada, utilizando as câmeras convencionais, bem como pelo sistema comercial, além de comparações com as simulações numéricas realizadas com o auxílio do programa Anflex. A Figura 5.6 ilustra a

configuração inicial da linha a partir da simulação realizada via Anflex e a Tabela 5.2 apresenta as principais características geométricas provenientes da análise estática fornecida por esse programa.

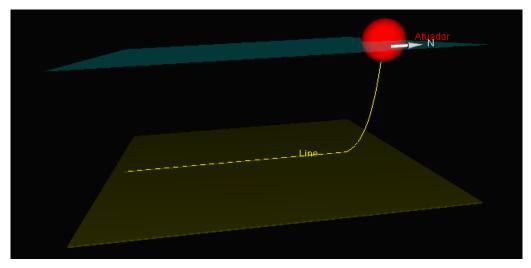


Figura 5.6: Configuração geométrica inicial da linha, resultante da simulação numérica realizada com auxílio do Anflex.

É possível comparar as medidas efetuadas para os parâmetros geométricos de lançamento da linha (Tabela 5.1) com os provenientes da análise estática através do Anflex (Tabela 5.2). A adequação existente entre os mesmos era esperada, dada a descrição do seu funcionamento, apresentado no ANEXO A.

Os resultados apresentados a seguir, ao longo deste capítulo, permitem uma avaliação qualitativa e visual dos gráficos confeccionados para confrontação dos resultados obtidos pelas diferentes abordagens. A fim de mostrar que os experimentos realizados são passíveis de repetibilidade e demonstrar que a análise visual é corroborada quantitativamente, o ANEXO B apresenta os resultados estatísticos (valores médios, máximos, mínimos e desvios-padrões dos sinais temporais) resultantes das análises efetuadas.

Cabe ressaltar, ainda, que os experimentos foram realizados através da imposição de um movimento circular de 0,020m de raio e período de 0,80s. Assim, espera-se que as amplitudes máximas atingidas sejam da ordem do raio do movimento prescrito e os períodos de picos dos espectros de potência ocorram a uma

frequência de 1,25Hz. As escalas do gráfico foram mantidas constantes em todos os gráficos de maneira a propiciar as comparações pertinentes, inclusive de alvo para alvo.

Tabela 5.2: Características geométricas da linha lançada em catenária direta, provenientes da análise estática via Anflex.

Símbolo	Descrição	Valor calculado
D	Projeção horizontal total	12,245m
L	Comprimento total da linha	16,097m
θ	Ângulo de topo (wrt horizontal)	82,80
Н	Projeção vertical do trecho suspenso	5,220m
D_x	Projeção horizontal do trecho suspenso	1,983m
L _c	Comprimento suspenso	5,916m

5.3.1 Comparação dos resultados obtidos para o alvo 1

Conforme a nomenclatura utilizada nos experimentos com linhas ao longo desta dissertação, o alvo 1 se configura como o mais próximo ao TDP. Desta forma, é de se esperar que este seja o alvo que apresente os menores deslocamentos. Essa afirmação pode ser comprovada visualmente a partir das séries temporais das figuras 5.7, 5.8 e 5.9.

Com relação a esses registros temporais, é possível perceber que as três abordagens (procedimento proposto, sistema comercial e simulação computacional via Anflex) percebem oscilações compatíveis entre si nas direções x e z. Por outro lado, a simulação computacional aponta para saídas laterais da linha (na direção y) mais acentuadas que as demais abordagens. A despeito de perceberem menores deslocamentos laterais da linha, as demais abordagens indicam claramente que os picos de energia nesta direção são condizentes com a frequência do movimento prescrito.

Ainda com relação às figuras 5.7, 5.8 e 5.9, as escalas utilizadas nos gráficos não permitem a percepção visual de picos de energia nos espectros referentes às séries temporais nas direções x e z. A impossibilidade em se analisar adequadamente as séries temporais e os espectros de potência do alvo 1 nessas direções, motivou uma análise em separado dos mesmos, que é apresentada na seção 5.4, conjuntamente com a recuperação de informações relativas aos gráficos da Figura 4.34, referentes aos deslocamentos percebidos para este alvo no Experimento 5.

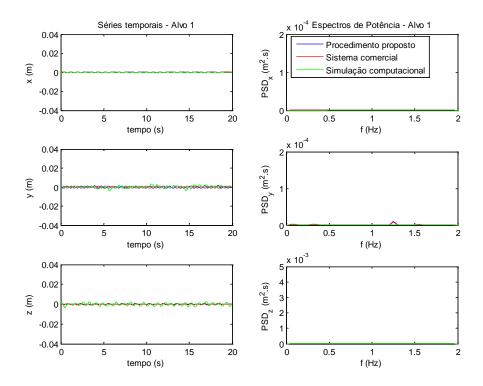


Figura 5.7: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 1 da linha utilizada – Experimento final, primeira repetição.

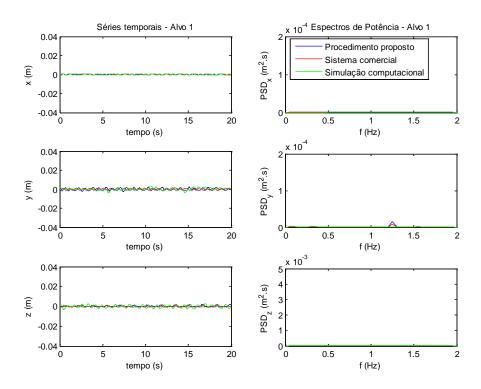


Figura 5.8: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 1 da linha utilizada – Experimento final, segunda repetição.

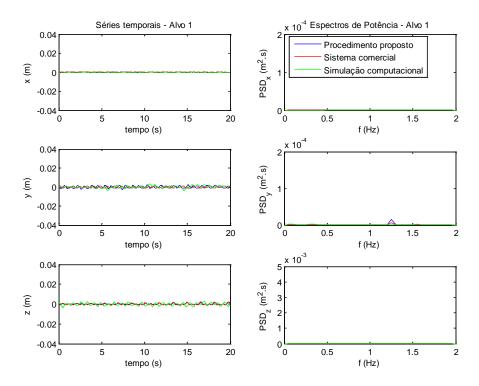


Figura 5.9: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 1 da linha utilizada – Experimento final, terceira repetição.

5.3.2 Comparação dos resultados obtidos para o alvo 4

Por sua posição sobre a linha, o alvo 4 tende a apresentar movimentos mais pronunciados que os do alvo 1. Essa afirmação pode ser comprovada a partir da inspeção visual das séries temporais de deslocamentos ilustradas nas figuras 5.10, 5.11 e 5.12. Cabe reforçar o fato de que o ensaio foi feito com três repetições. Na primeira delas, cujos resultados encontram-se graficamente ilustrados na Figura 5.10, os deslocamentos percebidos pelas três abordagens são muito semelhantes entre si para as direções x e z, a menos das respectivas fases. Essa percepção qualitativa é confirmada pela análise de seus respectivos espectros de potência, onde aparecem picos pronunciados em 1,25Hz, conforme esperado. Assim como ocorreu para o alvo 1, os deslocamentos laterais do alvo 4 se apresentam mais pronunciados nos resultados advindos da simulação computacional. Tal fato pode estar associado à modelagem do atrito existente entre a linha e o solo utilizada no modelo desenvolvido para o Anflex.

As demais repetições – segunda e terceira – também são compatíveis com o que era esperado para o movimento que foi prescrito ao topo da linha. Entretanto, apresentam sutis discrepâncias com relação à primeira repetição do ensaio. Esse fato pode ser percebido através nas séries temporais, nas três direções da figuras 5.11 e 5.12. Nelas, além dos aspectos apontados para a primeira repetição, é possível perceber a presença de outro pico no espectro de potência, aproximadamente em 0,6Hz, menos pronunciado que o em 1,25Hz. Aquele pico está associado à excitação de um sub-harmônico da linha, que foi percebido de forma mais acentuada para a direção y, segundo o procedimento proposto. Esse comportamento pode estar associado ao próprio mecanismo de resposta, que não é bem estabelecido em termos da previsão de sua ocorrência.

Além disso, embora os resultados provenientes dos sistemas de câmeras tenham guardado um bom nível de aderência entre si com relação aos deslocamentos verticais do alvo 4, o mesmo não ocorreu com a simulação numérica que aponta menores amplitudes desses movimentos.

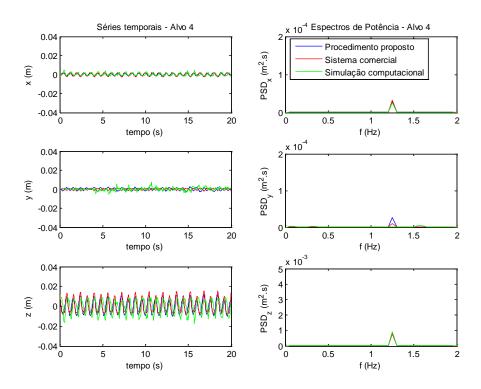


Figura 5.10: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 4 da linha utilizada — Experimento final, primeira repetição.

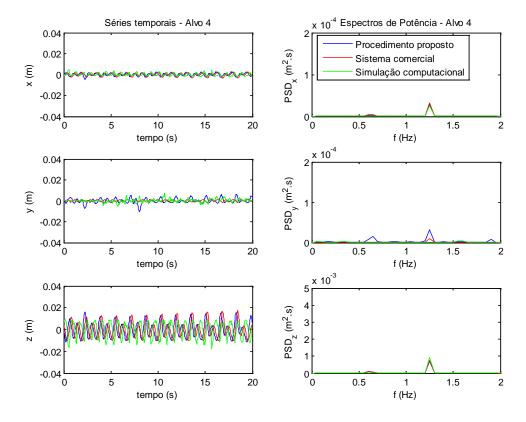


Figura 5.11: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 4 da linha utilizada – Experimento final, segunda repetição.

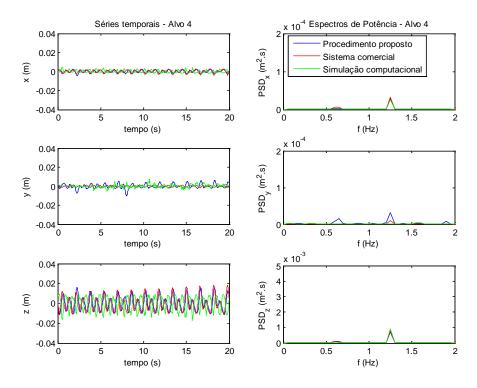


Figura 5.12: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 4 da linha utilizada – Experimento final, terceira repetição.

5.3.3 Comparação dos resultados obtidos para o alvo 7

Algumas das constatações realizadas para o alvo 4, são passíveis de serem novamente percebidas nas análises para o alvo 7. Primeiramente, aparecem discrepâncias sutis entre os resultados da primeira repetição com relação às demais, que podem ser decorrentes de diferenças nas condições iniciais dos ensaios, não sendo *a priori* suficientes para descartar a hipótese de repetibilidade do experimento.

Com relação à primeira das repetições, também é possível perceber grande adequação entre as séries temporais nas três direções para as abordagens utilizadas. Adicionalmente, o mesmo nível de aderência pode ser notado para seus respectivos espectros de potência, tanto em termos de amplitude de pico, quanto de frequência em que ocorrem, conforme pode ser visualizado nos gráficos da Figura 5.13. Mais uma vez, a simulação apresentou maiores deslocamentos laterais relativos da linha, embora sem perceber as oscilações na freqüência de 1,25Hz. Os dois sistemas de câmeras foram capazes de perceber oscilações sintonizadas na

frequência do movimento imposto ao topo da linha. É possível visualizar também que as saídas laterais da linha, percebidas pelo procedimento proposto, apresentaram amplitudes mais elevadas que as demais abordagens (sistema comercial e Anflex). Esse resultado é, portanto, compatível com os obtidos para os demais alvos.

Convém notar que, assim como ocorreu nas análises do alvo 4, o espectro de potência apresenta pequenos picos em torno de uma frequência aproximadamente igual à metade daquela na qual a linha foi excitada. Esses picos podem ser visualizados nas figuras 5.14 e 5.15. Os demais resultados são compatíveis entre si e coerentes com o que se esperava pela posição desse alvo na linha, tanto nas análises temporais, quanto nas realizadas no domínio da frequência.

Um último ponto cabe ser destacado: a inspeção das séries temporais dos movimentos verticais percebidos pelas três abordagens, em todas as repetições realizadas, possibilita a visualização de amplitudes próximas a 0,020m, compatíveis com o raio do movimento circular imposto ao topo da linha. Apesar de ser um resultado esperado, é possível concluir que as condições sob as quais os ensaios foram realizados sofreram melhorias significativas com relação aos experimentos preliminares, sendo que o procedimento proposto foi capaz de perceber movimentos de baixa amplitude, relativamente aos erros e incertezas associados ao processo de calibração das câmeras convencionais.

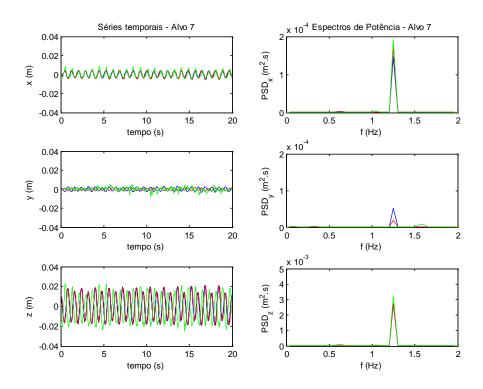


Figura 5.13: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 7 da linha utilizada – Experimento final, primeira repetição.

Em azul, resultados obtidos com o procedimento proposto; em vermelho, com o sistema comercial; em verde com a simulação computacional.

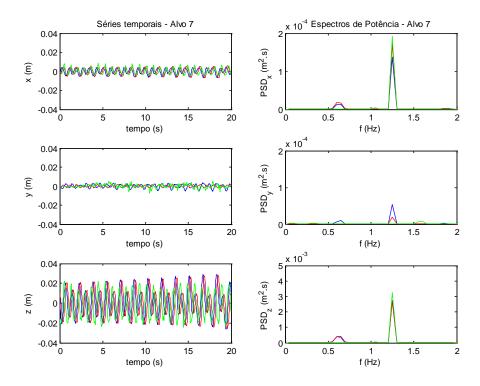


Figura 5.14: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 7 da linha utilizada – Experimento final, segunda repetição.

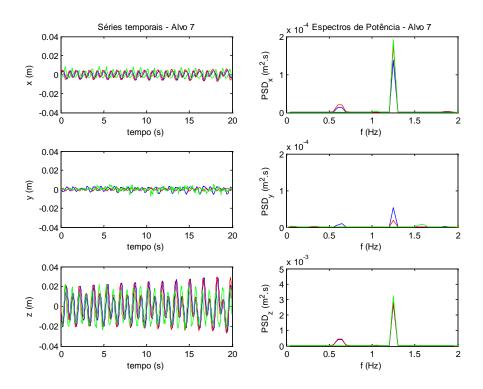


Figura 5.15: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 7 da linha utilizada — Experimento final, primeira repetição.

Em azul, resultados obtidos com o procedimento proposto; em vermelho, com o sistema comercial; em verde com a simulação computacional.

5.3.4 As geometrias assumidas pela linha

A partir dos resultados obtidos para cada alvo isoladamente, é possível realizar uma análise no domínio do tempo, considerando as elásticas assumidas pela linha flexível na região calibrada. A confrontação, nesse caso, é feita somente com o uso dos resultados advindos do sistema comercial de câmeras. As figuras 5.16, 5.17 e 5.18 ilustram a evolução temporal das geometrias adquiridas pelo conjunto de alvos dispostos sobre a linha.

Um primeiro ponto a ser destacado, passível de inspeção visual pela Figura 5.16, refere-se à interpretação errônea de dois alvos pelo sistema comercial. Esse tipo de situação ocorreu também no Experimento 4, descrito e discutido na seção 4.4. O fato desse tipo de problema não ter sido verificado nas demais repetições exclui qualquer possibilidade de problemas de calibração, já que todos os experimentos que compõem este ensaio foram realizados e analisados a partir da mesma

calibração. A troca de contrastes efetuada, com relação aos experimentos preliminares, a partir utilização de um fundo de cena preto afasta a possibilidade de reflexões indesejáveis que pudessem gerar perturbações às câmeras desse sistema. Não foi possível, entretanto, determinar o motivo pelo qual ocorreu esse problema de identificação de alvos. Dados os resultados coerentes obtidos para as demais repetições e o fato desses problemas serem devidos a um sistema comercial fechado, fica impraticável a apresentação de uma explicação definitiva para essa ocorrência¹³. As confrontações, portanto, serão feitas apenas para as demais repetições desse ensaio.

Conforme mencionado no parágrafo anterior, os resultados obtidos para as demais repetições, ilustrados nas figuras 5.17 e 5.18, são compatíveis entre si e guardam bastante adequação frente ao que era esperado. A partir dessas figuras, é possível perceber que próximo ao TDP os deslocamentos verticais da linha são diminutos, da ordem de 0,005m, ou seja, aproximadamente 25% da amplitude do movimento imposto à linha. Essa região compreende o alvo 1, cujos deslocamentos em amplitude são da ordem dos movimentos aqui observados. Com relação à extremidade oposta das elásticas percebidas, onde está localizado o alvo 7, é possível verificar que as amplitudes verticais alcançadas são da mesma ordem de grandeza que as do movimento prescrito à linha, ou seja, são percebidos deslocamentos verticais máximos de pouco menos de 0,020m.

¹³ O fabricante do sistema comercial foi contatado e sugeriu que o experimento fosse repetido com, pelo menos, três câmeras. Entretanto, até a finalização deste trabalho apenas duas estavam disponíveis para uso.

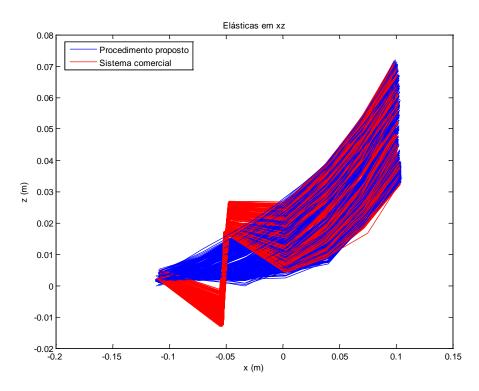


Figura 5.16: Geometria adquirida pela linha ensaiada, ao longo do tempo, a partir da percepção dos sistemas de câmeras utilizados no monitoramento do experimento final, primeira repetição.

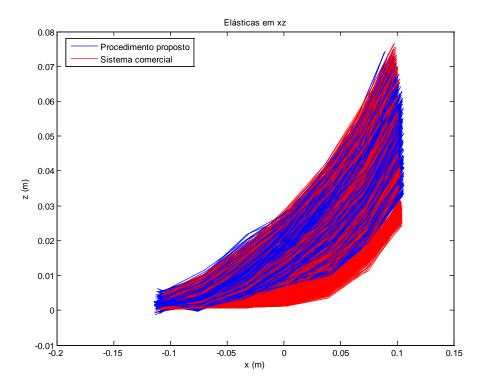


Figura 5.17: Geometria adquirida pela linha ensaiada, ao longo do tempo, a partir da percepção dos sistemas de câmeras utilizados no monitoramento do experimento final, segunda repetição.

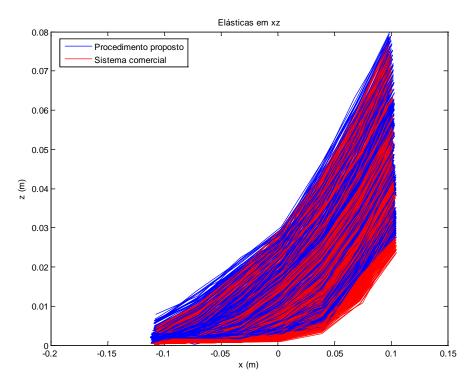


Figura 5.18: Geometria adquirida pela linha ensaiada, ao longo do tempo, a partir da percepção dos sistemas de câmeras utilizados no monitoramento do experimento final, terceira repetição.

5.4 DISCUSSÕES ACERCA DO EXPERIMENTO COM A LINHA FLEXÍVEL

Os experimentos finais realizados com a linha flexível foram extremamente importantes no âmbito deste trabalho por diversos motivos. O primeiro deles referese à adequação dos resultados obtidos, quando comparados através das abordagens utilizadas. Tanto o sistema comercial de câmeras, quanto o procedimento proposto, foram capazes de perceber deslocamentos tridimensionais da linha, em razão de sua resposta dinâmica à excitação imposta ao topo. Análises feitas a partir das figuras apresentadas nas seções 5.3.1 a 5.3.3, comprovam essa afirmação. Essa adequação entre os resultados é refletida nas séries temporais e nos seus respectivos espectros de potência. Embora a simulação computacional tenha sido capaz de perceber adequadamente os movimentos da linha no plano xz, os resultados na direção y, referentes à saída lateral da linha, merecem uma ressalva. As amplitudes dos deslocamentos nessa direção, provenientes das simulações numéricas, apresentaram-se maiores que com os valores obtidos pelos

dois sistemas de câmeras, e parecem ser resultantes da modelagem feita para o solo.

Outro ponto a ser destacado é a calibração das câmeras convencionais. As condições garantidas neste último conjunto de ensaios com respeito à iluminação, ao contraste entre alvos e *background* e à restrição do campo visual das câmeras convencionais, parecem ter sido fundamentais para o sucesso da calibração e a qualidade dos resultados obtidos.

Com relação ao comportamento da linha dentro do volume calibrado, a comparação da evolução temporal das elásticas, quando todos os alvos foram corretamente identificados, mostra novamente compatibilidade dos resultados com relação às amplitudes percebidas para a movimentação da linha e as geometrias assumidas.

Ainda com relação ao comportamento da linha, outras constatações são merecedoras de destaque. Assim como era esperado, o alvo 7 foi o que apresentou os maiores deslocamentos relativos, nas três direções. Por ser o mais afastado do TPD, esse alvo mostrou-se mais suscetível às movimentações impostas ao topo. Além disso, as três abordagens foram capazes de perceber amplitudes de oscilação vertical compatíveis com a do movimento prescrito, da ordem de 0,020m. Por outro lado, o alvo 1 foi o mais sujeito à interferências com o solo e aos efeitos da rigidez flexional, apresentando amplitudes de deslocamentos da mesma ordem de grandeza que dos erros e incertezas do processo de calibração das câmeras. A despeito disso, a compatibilidade entre os resultados apresentados pelos três métodos de análise considerados pode ser claramente percebida. Neste ponto, cabe ressaltar que os esforços promovidos para utilização dos mesmos alvos para os dois sistemas de câmeras permitiram a comparação direta dos resultados obtidos.

Conforme apresentado e discutido no item 2.6.4.3, a região próxima ao TDP é mais influenciada pela rigidez flexional da linha. Além disso, em experimentações físicas, as adjacências do *touchdown point* enfrentam dificuldades de monitoramento através de instrumentação convencional. Adicionalmente, é nesse ponto que a linha apresenta a maior curvatura e, consequentemente, os maiores esforços devidos a momentos-fletores. Todos esses aspectos apontam para a necessidade de uma análise mais detalhada dos movimentos percebidos para o alvo 1, que é apresentada na seção 5.4.1.

5.4.1 Os movimentos próximos ao TDP da linha

Diante das considerações feitas com relação ao alvo 1, estrategicamente posicionado junto ao TDP, fica justificada a importância da presente seção com relação aos objetivos deste trabalho.

A fim de discutir com maior nível de detalhes e de forma mais fundamentada os movimentos percebidos para esse alvo, as análises que se seguem são referentes aos experimentos finais (aqui representados pela terceira repetição realizada) e ao ensaio apresentado na seção 4.5 (Experimento 5). Para tanto, serão utilizadas a Figura 4.34 (repetida a seguir por conveniência sob a denominação de Figura 5.19) e a Figura 5.21 (que é uma versão da Figura 5.9, com modificação das escalas).

À primeira vista, uma análise superficial da Figura 5.19 permite concluir que a afirmação feita anteriormente com relação à aderência dos resultados percebidos pelos dois sistemas de câmeras não é absolutamente correta. É possível observar, a partir da referida figura, que ambos os conjuntos de câmeras foram capazes de reconhecer movimentos do alvo em diferentes frequências, mas com amplitudes de picos distintas. As principais discordâncias nos espectros de potência referem-se às amplitudes dos picos para as direções y e z e para a frequência de excitação da linha na direção x. Convém lembrar que no experimento a que a Figura 5.19 se refere, a linha foi excitada por um movimento de 0,050m de amplitude e freqüência de 1,0Hz.

Por outro lado, a modificação das escalas promovida para os gráficos relativos às séries temporais e aos espectros de potência do alvo 1 do Experimento 5 trouxe à tona um comportamento interessante que pode ser visualizado na Figura 5.19. Além do pico de energia esperado como resposta ao movimento imposto, os espectros apontam para a excitação de super-harmônicos em 2,0Hz, 3,0Hz, 4,0Hz e 5,0Hz. Esse tipo de comportamento, caracterizado como uma sucessão de harmônicos no espectro, pode ser encontrado em diversos trabalhos sobre dinâmica de linhas. A título de exemplo, é apresentada a Figura 5.20, retirada de Fujarra; Simos (2006). Esse trabalho trata do fenômeno de compressão dinâmica de *riser*s rígidos e flexíveis, estudado a partir de resultados numéricos e experimentais. A fim de avaliar se o comportamento percebido para o alvo 1 e ilustrado na Figura 5.19 é devido à

compressão dinâmica da linha, uma breve introdução sobre esse assunto é apresentada no item 5.4.1.1.

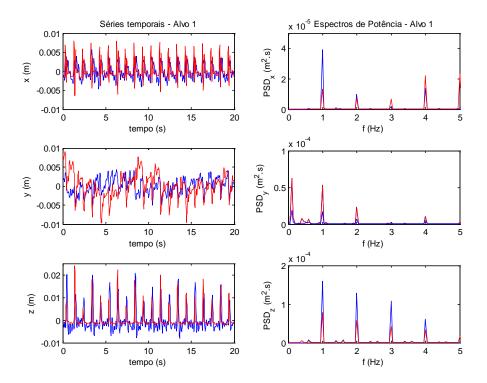


Figura 5.19: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 1 da linha utilizada no Experimento 5, com modificação das escalas.

Em azul, os resultados obtidos por processamento de imagens; em vermelho, os resultados do sistema comercial.

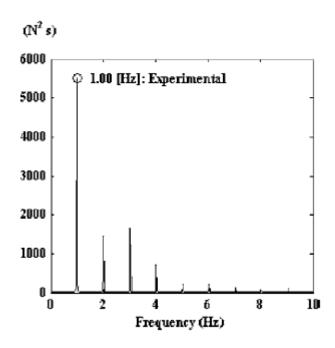


Figura 5.20: Cascata de harmônicos no espectro de potência das tensões em uma linha flexível, sujeita a compressão dinâmica.

No referido ensaio, a linha foi excitada em seu topo por um movimento de amplitude 0,100m e frequência 1,00Hz. Fonte: Extraído de Fujarra; Simos (2006).

De maneira geral, as observações feitas para a análise do alvo 1 do Experimento 5 são válidas também para os resultados obtidos nos experimentos finais, com relação ao mesmo alvo.

Entretanto, algumas observações adicionais e específicas merecem destaque. A primeira delas é a diferença apresentada para as amplitudes dos movimentos na direção y, passível de ser visualizada na Figura 5.21. Entretanto, é importante notar que essas amplitudes são da ordem de 1mm a 3mm e, portanto, muito próximas dos erros e incertezas associados à calibração das câmeras.

Para os gráficos nas direções x e z, é possível observar que os picos de amplitude de oscilação, e de energia, percebidos pelos dois sistemas de câmeras são compatíveis entre si, embora as regiões das séries temporais situadas entre os picos de amplitude guardem pouca aderência.

É importante lembrar que, nos ensaios finais, a linha foi excitada por um movimento circular de 0,020m de amplitude e frequência 1,25Hz. Dessa forma, os picos de energia nessa frequência eram esperados. Além destes, aparecem diversos outros nos espectros de potência, correspondendo a excitações de frequências sub-

harmônicas e super-harmônicas, de maneira similar à ilustrada anteriormente na Figura 5.20.

Resta, então, a verificação dos motivos pelos quais foram observados estes harmônicos nos espectros de potência do alvo 1 nos ensaios com a linha flexível.

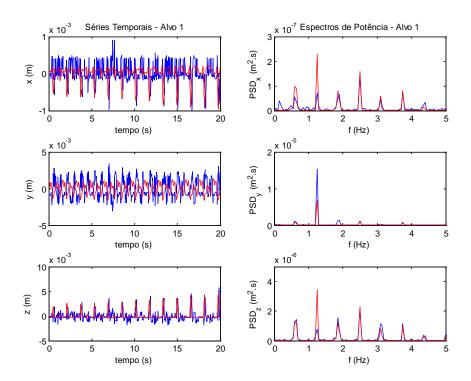


Figura 5.21: Séries temporais e respectivos espectros de potência para as direções x, y e z do alvo 1 da linha utilizada, com modificação das escalas — Experimento final, terceira repetição. Em azul, os resultados obtidos por processamento de imagens; em vermelho, os resultados do sistema comercial.

5.4.1.1 Compressão dinâmica em risers

Seja um *riser* como o ilustrado na Figura 2.23, que possui um trecho repousando sobre o leito marinho e sua extremidade superior conectada a um sistema flutuante. Considere-se que esse *riser* possua configuração quase-vertical, ou seja, que o ângulo entre a tangente à linha no topo e a direção vertical seja pequeno, de maneira que a tração no TDP seja igualmente pequena. Suponha-se que esse *riser* esteja estaticamente sujeito ao seu próprio peso submerso e sobre ele atuem a correnteza do mar e um movimento em seu topo na direção tangente à linha, causado pela unidade flutuante, sob ação de ondas locais.

Dado que a tração dinâmica $\tau(s)$ se altera ciclicamente com o tempo e que a tração T(s) no TDP é pequena, é possível que, nesta região, a primeira apresente valores negativos capazes de zerar a segunda em parte do ciclo de onda. Nestas situações, ocorre um fenômeno conhecido como compressão dinâmica, extensamente discutido em Aranha; Pinto; Silva (2001), Aranha; Pinto (2001), Ramos; Pesce (2003) e Fujarra; Simos (2006). Durante a compressão dinâmica ocorre a flambagem da linha. Ao carregamento máximo de compressão que pode suportado por um segmento de *riser* dá-se o nome de carregamento crítico (P_{cr}). Em Aranha; Pinto; Silva (2001) é proposta uma formulação analítica simples para esse carregamento crítico, dada pela Equação (5.1):

$$P_{cr}(\chi) = \omega \cdot \beta_{cr}^{2}(\chi) \cdot \sqrt{(m + m_a) \cdot EI}$$
 (5.1)

onde:

 ω é a frequência angular do movimento imposto ao topo da linha

$$\chi = \frac{q}{T_o}$$
 é a curvatura no TDP

m é a massa da linha por unidade de comprimento

ma é a massa adicional por unidade de comprimento

EA é a rigidez axial da linha

El é a rigidez flexional da linha

$$\beta_{cr}(\chi)$$
 é a menor raiz da equação $tg\alpha = \alpha + \frac{\alpha^3}{3} - \frac{\alpha^5}{\gamma^2(\chi)}$

$$\operatorname{com} \ \alpha = \frac{\beta_{cr}(\chi) \cdot \pi}{2} \,, \ \ \gamma(\chi) = \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot \chi \cdot \sqrt{\frac{EA}{(m+m_a)}} \cdot \frac{1}{\omega} \, \mathrm{e} \, \, 1 \leq \beta_{cr} \leq 2{,}984.$$

Cabe citar que valores positivos de carga crítica correspondem a compressões na linha, segundo a formulação proposta por Aranha; Pinto (2001).

Uma conseqüência importante associada à compressão dinâmica é o aparecimento de ondas de compressão que se propagam do TDP para o topo. A Figura 5.22 ilustra a propagação de ondas de compressão em um ensaio físico realizado por Fujarra; Simos (2006).

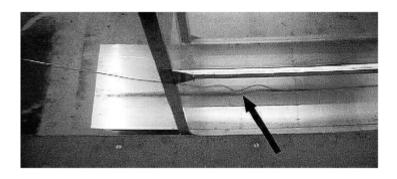


Figura 5.22: Propagação de ondas de compressão em direção ao topo de uma linha sujeita ao fenômeno de compressão dinâmica.

Fonte: Extraído de Fujarra; Simos (2006).

A sequência de harmônicos que aparece nos espectros de potência é uma indício forte de ocorrência de compressão dinâmica sobre a linha. A percepção visual das ondas de compressão, por outro lado, só pode ser notada em experimentos físicos. Assim, a forma mais consistente de avaliar a ocorrência de compressão dinâmica sobre uma linha é decorrente da sua própria definição: a verificação da existência de tensões no TDP menores que a carga crítica é conclusiva com relação à presença desse fenômeno. A Figura 5.23 ilustra um exemplo de evolução temporal das tensões normalizadas no TDP e a carga crítica do *riser*, retirada de Aranha; Pinto (2001). Os pontos nos quais as forças sobre a linha tornam-se menores que a carga crítica de compressão estão associados aos instantes em que ocorrem a compressão dinâmica, sucedida de propagação de ondas de compressão.

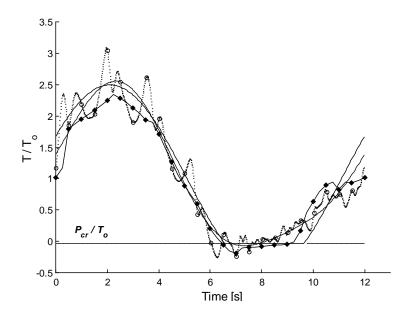


Figura 5.23: Série temporal da tração total no TDP, normalizada pela tração estática.

Linha contínua: equacionamento analítico, linha com marcadores escuros: simulação Cable (MIT), linha com marcadores claros: simulação Orcaflex, linha curva tracejada: simulação Orcaflex filtrada.

Fonte: Aranha; Pinto (2001).

5.4.1.2 Avaliação da ocorrência de compressão dinâmica nos ensaios realizados

Conforme discutido no item 5.4.1.1, a presença de uma sequência de harmônicos nos espectros de potência é indício, embora não conclusivo, de ocorrência de compressão dinâmica da linha. A fim de elucidar esse ponto da análise, foram confeccionadas as séries temporais da tração no TDP, com o uso do Anflex, para os dois casos em estudo (alvo 1 dos Experimentos 5 e Final).

A Figura 5.24 apresenta a evolução temporal das trações no TDP para o Experimento 5, bem como a carga crítica calculada ($P_{cr} = 1,528N$). A partir dessa figura, é possível perceber a ocorrência de compressão dinâmica da linha. Por outro lado, esse fenômeno não foi observado para os ensaios finais, como se pode depreender a partir da Figura 5.25. Para a linha utilizada nesse ensaio, a carga crítica calculada foi $P_{cr} = 1,905N$. Dessa forma, os picos de energia verificados na Figura 5.21 correspondem a respostas dinâmicas da linha.

.

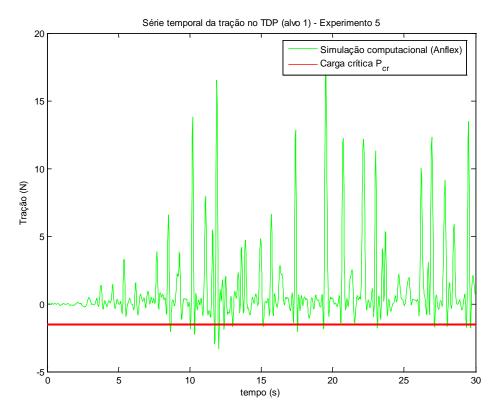


Figura 5.24: Evolução temporal da tração no TDP e carga crítica calculada – Experimento 5.

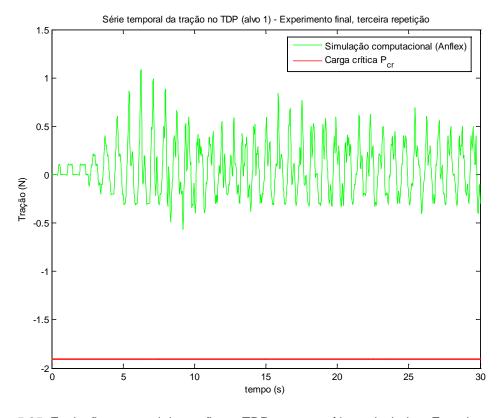


Figura 5.25: Evolução temporal da tração no TDP e carga crítica calculada – Experimento final.

Capítulo 6 Conclusões

6 CONCLUSÕES

O principal foco do presente trabalho foi o estabelecimento de um procedimento de análise por imagens, a partir da concepção e realização de experimentos físicos em uma linha flexível, monitorada com o uso de câmeras digitais, o que pode ser considerado uma forma de instrumentação pouco invasiva da dinâmica local da região próxima ao TDP. Os resultados foram obtidos a partir de técnicas de processamento de imagens e calibração de câmeras, aplicadas sobre os vídeos e imagens gerados nos ensaios.

Um ponto de destaque refere-se à consistência apresentada pelos resultados gerados, frente à confrontação efetuada com o sistema comercial de câmeras utilizado e com o levantamento bibliográfico realizado, quer por estudos analíticos, quer por simulações numéricas.

Embora seja um assunto bem estabelecido, no contexto desse trabalho, estática e dinâmica de linhas foram estudadas a partir de uma abordagem diferenciada, focada na região conhecida como *touchdown zone*. Dentre as conclusões que se pode depreender dos experimentos realizados, pode-se citar:

- Os Experimentos Preliminares apresentaram elevada importância para os estudos realizados, dado que as investigações promovidas culminaram em subsídios fundamentais para os ensaios finais. Cumpre destacar as discussões com relação à iluminação da cena monitorada, a promoção de contrastes necessária para a identificação do objeto de interesse, o tipo de estrutura de calibração mais adequada e a restrição do campo visual das câmeras;
- Ainda com relação aos Experimentos Preliminares, estes apontaram para uma boa adequação entre os resultados obtidos e os advindos do sistema comercial de câmeras, mediante a confrontação efetuada. Dessa forma, a metodologia proposta para processamento de imagens e a geração de resultados a partir do monitoramento de ensaios através de câmeras digitais

sugerem que esse tipo de procedimento se configura como uma forma alternativa de instrumentação pouco invasiva. O uso de câmeras convencionais para este fim é uma escolha mais barata, quando comparado com o sistema comercial;

- Em todos os experimentos realizados, buscou-se a identificação geométrica e a percepção tridimensional dos movimentos adquiridos pela linha. Entretanto, como as excitações promovidas foram feitas em um plano, os deslocamentos percebidos na direção perpendicular a esse plano foram diminutos com relação às demais direções. Ainda assim, os resultados obtidos para essa direção mostraram boa aderência frente às confrontações efetuadas;
- O monitoramento da linha ensaiada restringiu-se às proximidades do TDP. Essa escolha permitiu analisar aspectos relacionados à dinâmica local da linha e os resultados obtidos mostraram concordância frente ao que era esperado a partir da confrontação com o levantamento bibliográfico realizado; As séries temporais dos movimentos e seus respectivos espectros de potência, em adição ao estudo da evolução das elásticas adquiridas pela linha, foram fundamentais para a percepção dos resultados;
- A evolução dos experimentos, associada à promoção de melhorias nas condições em que foram realizados, permitiu que a metodologia empregada percebesse deslocamentos diminutos da linha, desde que suas amplitudes fossem superiores aos erros e incertezas inerentes ao processo de calibração e o método de transformação de coordenadas utilizado;
- Por fim, cabe destacar a ocorrência de compressão dinâmica da linha em um dos ensaios. Esse fenômeno foi percebido pelo sistema comercial e pelos resultados advindos da metodologia empregada, o que permitiu uma breve discussão sobre o assunto e a indicação de que o sistema aqui proposto é passível de aplicação em pesquisas, necessitando algumas melhorias que são apresentadas no Capítulo 7 como perspectivas para trabalhos futuros.

Capítulo 7 Perspectivas

7 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

A metodologia proposta para a investigação da estática e dinâmica de linhas, através do monitoramento de ensaios por câmeras, como uma alternativa menos invasiva que a apresentada por instrumentação convencional, sugere seu emprego para o estudo de outros fenômenos relacionados à Engenharia Oceânica. Tomando por base essa afirmação, podem ser sugeridos para futuros trabalhos:

- A realização de ensaios dinâmicos tridimensionais em linhas, como forma de investigação de suas respostas dinâmicas, frente a excitações mais compatíveis com os que uma unidade flutuante imprime a uma linha real;
- Os ensaios estáticos e dinâmicos de sistemas oceânicos são, geralmente, feitos em água, e não no ar como os experimentos realizados no âmbito deste trabalho. A utilização de câmeras submersas aparece como uma alternativa interessante de instrumentação desses sistemas;
- Diversos outros fenômenos específicos, além da compressão dinâmica, podem ser passíveis de investigação a partir do uso de câmeras digitais, com posterior processamento de imagens e calibração de câmeras. Como exemplo de problemas dinâmicos em linhas, pode-se citar: as vibrações induzidas por vórtices (VIV) e a coexistência de modos de vibrar em linhas flexíveis;
- Adicionalmente, com a metodologia proposta, é possível avaliar o comportamento global de uma unidade flutuante em experimentos em escala, a partir de alvos nela dispostos;
- Estudos em tanques de provas, relacionados à superfície livre do líquido e sua interação com uma unidade flutuante, embora ousados, parecem ser possíveis com a utilização de processamento digital de imagens;
- Com relação aos equipamentos e materiais empregados, algumas melhorias são passíveis de serem propostas, dentre elas: a utilização de uma estrutura de calibração confeccionada para esse fim, o emprego de um número maior de câmeras e a confecção de rotinas numéricas para calibração e processamento de dados em tempo real.

REFERÊNCIAS

ABDEL-AZIZ, Y.I.; KARARA, H.M., **Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry.** Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry, Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry, 1971, pp. 1-18.

ARANHA, J.A.P.; PINTO, M.M.O. On the Dynamic compression of risers: an analytic expression for the critical load. Applied Ocean Research, n. 23, pp. 83-91, 2001.

ARANHA, J.A.P.; PINTO, M.M.O.; SILVA, R.M.C. **Dynamic tension in risers and mooring lines: an algebraic approximation for harmonic excitation**. Applied Ocean Research, n. 23, pp. 63-81, 2001.

BARACHO, R.M.A.; CENDON, B.V.; FONSECA, F. **Um estudo para recuperação da informação em projetos de engenharia**. Enancib, Vol. 1, pp. 413-422, Marília, 2006.

BAE, Y. Importance of nonlinearities in static and dynamic analysis of marine risers. International Offshore and Polar Engineering Conference, Holanda, 1995.

BERNITSAS, M.M. **Static analysis of marine risers.** University of Michigan, EUA, 1981.

BROWN, D.C. **Decentering distortion of lenses.** Photogrammetric engineering, Vol. 7, pp. 444-462, 1966.

BROWN, D.C. **Close-range camera calibration.** Photogrammetric engineering, Vol. 37, pp. 855-866, 1971.

CHAKRABARTI, S. K. **Hydrodynamic of Offshore Structures**. Computational Mechanics Publications, Springer-Verlag, 1987.

CLARKE, T.A.; FRYER, J.G. **The development of camera calibration methods and models**. The photogrammetric Record, Vol. 16, No. 91, pp. 51-66, 1998.

DALHEIM, J. Numerical prediction of VIV on deepwater *risers* subjected to shear currents an waves. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1999.

FALTINSEN, O. et al. **Hidroelasticity in Marine Technology**. Balkena, Roterdã, Holanda, 1994.

FUJARRA, A.L.C.; SIMOS, A.N. **Dynamic compression of rigid and flexible risers: Experimental and numerical results**. Journal of Offshore Mechanics and Artic Engineering, 2006.

GONZALES, R.C.; WOODS, R.E. **Digital image processing**. Prentice Hall, 2^a edição, New Jersey, 2001.

HEIKKILÄ, J.; SILVÉN, O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. Proceedings of the 1997 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, p. 1106, IEEE Computer Society, Washington, DC, EUA, 1997.

JÄHNE, B. **Digital Image Processing**. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2002.

KIM, H.Y. Apostilas para acompanhamento da disciplina PSI5796 – Processamento e Análise de imagens e vídeos. Em http://www.lps.usp.br/~hae/apostila/index.html, 2009, site acessado em 10/08/2009.

KWON, Y.M. <u>HTTP://www.kwon3d.com/theory/dlt/dlt.html</u>, 1998, site acessado em 12/07/2009.

MARQUES, C.C.S.C. **Um sistema de calibração de câmeras**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

MARTINS, M.A.L. **Avaliação de metodologias de projeto de** *risers* **rígidos**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2008.

NÓBREGA, R.A.A. **Análise do balanceamento de imagens aplicado à fotogrametria**. Tese de doutoramento docência – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

OJANEN, H. Automatic correction of lens distortion by using digital image processing. University of New Jersey, EUA, 1999.

PESCE, C.P. Mecânica de cabos e tubos submersos lançados em "catenária": uma abordagem analítica e experimental. Tese de livre-docência, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

PESCE, C.P.; MARTINS, C.A. Riser-soil interaction: local dynamics at TDP and a discussion on the eigenvalue and the VIV problems. Journal of Offshore Mechanics and Artic Engineering, presented at OMAE (2004), Canada, 2006.

PESCE, C.P.; MARTINS, C.A. **Numerical computation of riser dynamics**. Numerical Modelling in Fluid-Structure Interactions, Cap., Vol. 42, 2005.

QUEIROZ, J.E.R.; GOMES, H.M. Introdução ao processamento digital de imagens. Revista RITA, Vol. VIII, No. 1, Brasil, 2001.

RAMOS, R.; PESCE, C.P. A stability analysis of risers subjected to dynamic compression coupled with twisting. Journal of Offhosre Mechanics and Artic Engineering, Cancun, 2003.

RIVEROS, C.A. *et al.* Response prediction of long flexible risers subject to forced harmonic vibration. Journal of Marine Science and Technology, Japan, 2009.

SANTOS, M.F.; MARTINS, C.A. Estudo da mecânica global de cabos submersos. Relatório técnico, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1999.

STAUFFER, C.; GRIMSON, W.E.L. Learning patterns of activities using real-time tracking. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

SHIGUEMOTO, D.A. *et al.* Estudo da solução do comportamento dinâmico de um *riser* rígido vertical no domínio do tempo e da frequência. PDPETRO, Campinas, 2007.

SIMOS, A.N.; FUJARRA, A.L.C.; ALVES, K.H. **Dynamic compression on rigid and flexible risers**, Part II – Comparison of theoretical and experimental results, proc. of the 22nd Offshore Mech. and Arctic Eng. Conference, Cancun, 2003.

SISTEMA COMERCIAL DE CÂMERAS. http://www.qualysis.com, 2009, site acessado em 26/01/2010.

TANAKA, R.L. **Otimização da configuração de** *risers* **rígidos**. Tese de Doutoramento, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

VAILLANT, A.G. Estudo comparativo de análise no domínio do tempo e da frequência em *risers* flexíveis. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

VALDIVIA, P.G. *et al.* **Resposta dinâmica de um** *riser* **rígido em catenária devido à excitação induzida pelo escoamento interno**. 4º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás Natural (PDPETRO), Campinas, 2007.

ZOLLNER, H.; SABLATNIG, R. Comparison of methods for geometric camera calibration using planar calibration targets. Vienna University of technology, Viena, 2003.

ANEXO A: Manual do Anflex

Modelagem do problema de análise de linhas - Anflex

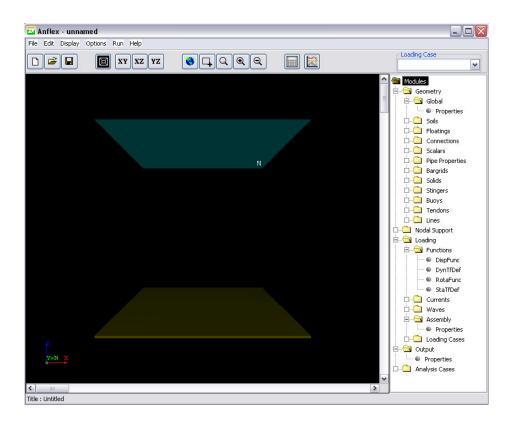
Introdução

No sistema ANFLEX¹⁴, a criação do modelo utilizado para a análise da estrutura é dividida em duas partes: (i) geração da geometria inicial e (ii) especificação dos atributos do modelo. A quantidade de dados necessária para a definição do modelo pode ser muito grande, fazendo com que a possibilidade de ocorrência de erros seja elevada. Para contornar esse problema, o sistema adota duas estratégias complementares. A primeira consiste em representar graficamente, na tela de desenho do pré-processador, os dados à medida em que estes são fornecidos ao sistema. A segunda trata da verificação automática da consistência dos dados, de maneira que estes estejam dentro dos intervalos aceitáveis e sejam coerentes com os dados relacionados.

O diálogo principal é composto por diversos elementos de interface, como botões, listas e menus, cujas funcionalidades servem tanto para a visualização quanto para a modelagem e a análise do modelo. Destacam-se, nesta interface, a tela de desenho (canvas) e a árvore de dados. Cabe ressaltar que nesta tela estão presentes todas as funções necessárias para a geração completa de um modelo multilinhas.

-

¹⁴ O Anflex é um programa da Petrobras, utilizado neste trabalho sob a égide dos convênios daquela empresa com a Universidade de São Paulo.



O nome do projeto corrente é exibido na barra de título, no topo da interface. O título do projeto é impresso na barra inferior. O projeto "vazio", carregado na execução inicial do programa, ou quando o usuário opta por um novo projeto, recebe a denominação unnamed.aml.

A árvore de dados, situada no lado direito da interface, é uma ferramenta muito útil no processo de definição do modelo de análise. Ela oferece ao usuário uma maneira muito simples e intuitiva para acessar todos os objetos pertencentes ao modelo multilinhas.

A árvore possui "galhos" principais, representando os 5 principais módulos do sistema: (i) geometria inicial, (ii) restrições de deslocamentos, (iii) condições ambientais, (iv) parâmetros para a geração de resultados e (v) análise do modelo. Estes, por sua vez, ramificam-se em galhos menores, associados aos módulos secundários, ou sustentam "folhas". As folhas expressam os objetos criados pelo usuário (i.e., embarcação, *riser*, segmento, onda etc) e são definidas a partir de cliques com o mouse sobre os galhos que as contêm. Tipicamente, o clique do botão direito do mouse, sobre galhos secundários, aciona um menu correspondente onde

o usuário pode criar novos objetos daquele módulo. De maneira semelhante, acionase, para as folhas, um menu onde o usuário pode editar, remover ou duplicar o
objeto selecionado. Alternativamente, as folhas, que representam objetos
individuais, podem ser acessadas diretamente para edição com um clique duplo
sobre a imagem (esfera cinza), situada à esquerda do nome do objeto. Em função
do papel de determinados objetos na definição do modelo, opções nas árvores
podem ser bloqueadas, ou desativadas, para o usuário como, por exemplo, a
duplicação ou a remoção dos dados de fundo e das constantes globais.

Acesso ao Arquivo de Dados

Um projeto no ANFLEX consiste de todos os arquivos necessários para o préprocessamento, análise e pós-processamento de um modelo de linhas de ancoragem e de *riser*s. No pré-processamento, o arquivo que armazena os dados necessários para a definição do modelo geométrico recebe o nome dado pelo usuário, acrescido da extensão "aml" (anflex multilinhas).

Uma vez que, durante o pré-processamento, dados do projeto podem ser alterados pelo usuário, o programa controla a condição corrente dos mesmos (modificado ou não modificado). Se o usuário tentar encerrar um projeto modificado, o sistema fará uma consulta sobre a gravação das modificações antes de finalizar a sessão.

Criação e Edição do Modelo para Análise

O sistema ANFLEX está dividido em vários módulos, a partir dos quais o modelo vai sendo gradativamente construído, para posterior análise. O sistema não faz controle sobre a ordem em que os dados são fornecidos pelo usuário. Entretanto, procedimentos que não sigam a ordem natural de especificação do modelo, como a definição de uma linha de ancoragem sem a conexão correspondente, não são permitidas pelo programa.

As funções para a especificação dos objetos pertencentes ao modelo de análise estão disponíveis nos diversos itens das árvores de dados. Basicamente, basta ao

usuário clicar com o botão direito do mouse sobre um dos objetos ou uma das pastas da árvore e, automaticamente, surgirá um menu correspondente àquele item, com as respectivas opções disponíveis naquele instante.

A seguir, é sugerida uma seqüência de procedimentos para a definição do modelo multilinhas de análise.

- Dados do plano que define o fundo do mar, das constantes de projeto e dos momentos de engastamento perfeito para elementos de pórtico;
- Propriedades de solos;
- Dados de plataformas, embarcações, monobóias e sólidos;
- Dados de conexões para linhas de ancoragem e risers;
- Propriedades físicas e geométricas de segmentos e de barras para linhas de ancoragem, risers, reticulados e stingers;
- Dados de tendões e de bóias;
- Dados de reticulados e de stingers;
- Dados de linha de ancoragem e de risers;
- Dados de escalares generalizados;
- Restrições de deslocamentos;
- Dados de funções de tempo e de deslocamento;
- Propriedades de correntes e de ondas;
- Dados de casos de carregamento;
- Dados para geração de resultados;
- Dados de casos de análise.

ANEXO B: Estatísticas do Experimento Final

Este anexo contém as estatísticas básicas (valores médios, máximos, mínimos e desvios-padrões) dos registros temporais centrados relativos aos Experimentos com Linha Flexível (Capítulo 5), cujos resultados gráficos foram apresentados e discutidos nas seções 5.3.1 a 5.3.3.

Tabela B.1: Análise temporal do Alvo 1 – Experimento Final – 1ª Repetição.

	Procedimento proposto			Sistema comercial			
	Eixo x	Eixo y	Eixo z	Eixo x	Eixo y	Eixo z	
Máximo (m)	0,2.10 ⁻³	2,0.10 ⁻³	1,0.10 ⁻³	0,1.10 ⁻³	1,0.10 ⁻³	1,0.10 ⁻³	
Mínimo (m)	-0,4.10 ⁻³	-1,0.10 ⁻³	-0,5.10 ⁻³	-0,2.10 ⁻³	-1,0.10 ⁻³	-0,5.10 ⁻³	
Média (m)	0,0.10 ⁻³						
Desvio- padrão (m)	0,1.10 ⁻³	0,7.10 ⁻³	0,3.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	0,7.10 ⁻³	0,4.10 ⁻³	

Tabela B.2: Análise temporal do Alvo 4 – Experimento Final – 1^a Repetição.

	Procedimento proposto			Sistema comercial			
	Eixo x	Eixo y	Eixo z	Eixo x	Eixo y	Eixo z	
Máximo (m)	2,0.10 ⁻³	2,5.10 ⁻³	12,1.10 ⁻³	1,7.10 ⁻³	1,1.10 ⁻³	15,3.10 ⁻³	
Mínimo (m)	- 2,3.10 ⁻³	-2,5.10 ⁻³	-9,9.10 ⁻³	-2,8.10 ⁻³	-1,6.10 ⁻³	-7,3.10 ⁻³	
Média (m)	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	
Desvio- padrão (m)	1,2.10 ⁻³	1,2.10 ⁻³	6,5.10 ⁻³	1,3.10 ⁻³	7,0.10 ⁻³	0,4.10 ⁻³	

Tabela B.3: Análise temporal do Alvo 7 – Experimento Final – 1ª Repetição.

	Procedimento proposto			Sistema comercial			
	Eixo x	Eixo y	Eixo z	Eixo x	Eixo y	Eixo z	
Máximo (m)	4,0.10 ⁻³	3,1.10 ⁻³	20,9.10 ⁻³	4,6.10 ⁻³	1,6.10 ⁻³	20,9.10 ⁻³	
Mínimo (m)	-5,0.10 ⁻³	-3,2.10 ⁻³	-19,0.10 ⁻³	-5,1.10 ⁻³	-1,6.10 ⁻³	-19,3.10 ⁻³	
Média (m)	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	
Desvio- padrão (m)	2,8.10 ⁻³	1,7.10 ⁻³	12,1.10 ⁻³	3,0.10 ⁻³	1,0.10 ⁻³	12,0.10 ⁻³	

Tabela B.4: Análise temporal do Alvo 1 – Experimento Final – 2ª Repetição.

	Procedimento proposto			Sistema comercial			
	Eixo x	Eixo y	Eixo z	Eixo x	Eixo y	Eixo z	
Máximo (m)	0,5.10 ⁻³	2,3.10 ⁻³	2,3.10 ⁻³	0,3.10 ⁻³	1,2.10 ⁻³	2,1.10 ⁻³	
Mínimo (m)	-0,5.10 ⁻³	-2,5.10 ⁻³	-1,3.10 ⁻³	-0,5.10 ⁻³	-1,4.10 ⁻³	-0,8.10 ⁻³	
Média (m)	0,0.10 ⁻³						
Desvio- padrão (m)	0,2.10 ⁻³	1,1.10 ⁻³	0,6.10 ⁻³	0,1.10 ⁻³	0,7.10 ⁻³	0,6.10 ⁻³	

Tabela B.5: Análise temporal do Alvo 4 – Experimento Final – 2ª Repetição.

	Procedimento proposto			Sistema comercial			
	Eixo x	Eixo y	Eixo z	Eixo x	Eixo y	Eixo z	
Máximo (m)	2,6.10 ⁻³	6,1.10 ⁻³	16,3.10 ⁻³	2,5.10 ⁻³	1,3.10 ⁻³	17,3.10 ⁻³	
Mínimo (m)	-4,5.10 ⁻³	-9,9.10 ⁻³	-11,4.10 ⁻³	-3,5.10 ⁻³	-1,5.10 ⁻³	-10,4.10 ⁻³	
Média (m)	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	
Desvio- padrão (m)	1,4.10 ⁻³	2,4.10 ⁻³	7,0.10 ⁻³	1,5.10 ⁻³	0,8.10 ⁻³	7,2.10 ⁻³	

Tabela B.6: Análise temporal do Alvo 7 – Experimento Final – $2^{\underline{a}}$ Repetição.

	Procedimento proposto			Sistema comercial			
	Eixo x	Eixo y	Eixo z	Eixo x	Eixo y	Eixo z	
Máximo (m)	4,4.10 ⁻³	3,3.10 ⁻³	29,1.10 ⁻³	5,9.10 ⁻³	1,7.10 ⁻³	28,3.10 ⁻³	
Mínimo (m)	- 6,6.10 ⁻³	-5,5.10 ⁻³	-26,2.10 ⁻³	-6,9.10 ⁻³	-1,9.10 ⁻³	-25,5.10 ⁻³	
Média (m)	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	
Desvio- padrão (m)	3,0.10 ⁻³	2,0.10 ⁻³	13,8.10 ⁻³	3,3.10 ⁻³	1,0.10 ⁻³	13,5.10 ⁻³	

Tabela B.7: Análise temporal do Alvo 1 – Experimento Final – 3ª Repetição.

	Procedimento proposto			Sistema comercial			
	Eixo x	Eixo y	Eixo z	Eixo x	Eixo y	Eixo z	
Máximo (m)	0,4.10 ⁻³	2,3.10 ⁻³	2,3.10 ⁻³	0,3.10 ⁻³	1,2.10 ⁻³	2,4.10 ⁻³	
Mínimo (m)	-0,5.10 ⁻³	-2,4.10 ⁻³	-1,2.10 ⁻³	-0,6.10 ⁻³	-1,2.10 ⁻³	-0,9.10 ⁻³	
Média (m)	0,0.10 ⁻³						
Desvio- padrão (m)	0,2.10 ⁻³	1,0.10 ⁻³	0,6.10 ⁻³	0,2.10 ⁻³	0,7.10 ⁻³	0,7.10 ⁻³	

Tabela B.8: Análise temporal do Alvo 4 – Experimento Final – 3ª Repetição.

	Procedimento proposto			Sistema comercial			
	Eixo x	Eixo y	Eixo z	Eixo x	Eixo y	Eixo z	
Máximo (m)	2,6.10 ⁻³	6,0.10 ⁻³	16,4.10 ⁻³	2,5.10 ⁻³	1,2.10 ⁻³	18,4.10 ⁻³	
Mínimo (m)	-4,6.10 ⁻³	-9,9.10 ⁻³	-11,4.10 ⁻³	-3,7.10 ⁻³	-1,4.10 ⁻³	-11,2.10 ⁻³	
Média (m)	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	0,0.10 ⁻³	
Desvio- padrão (m)	1,4.10 ⁻³	2,4.10 ⁻³	7,1.10 ⁻³	1,6.10 ⁻³	0,7.10 ⁻³	7,5.10 ⁻³	

Tabela B.9: Análise temporal do Alvo 7 — Experimento Final — $3^{\underline{a}}$ Repetição.

	Procedimento proposto			Sistema comercial			
	Eixo x	Eixo y	Eixo z	Eixo x	Eixo y	Eixo z	
Máximo (m)	4,4.10 ⁻³	3,3.10 ⁻³	29,1.10 ⁻³	6,1.10 ⁻³	1,6.10 ⁻³	29,3.10 ⁻³	
Mínimo (m)	6,5.10 ⁻³	-5,5.10 ⁻³	26,2.10 ⁻³	-7,1.10 ⁻³	-1,8.10 ⁻³	-26,6.10 ⁻³	
Média (m)	0,0.10 ⁻³						
Desvio- padrão (m)	2,9.10 ⁻³	2,1.10 ⁻³	13,8.10 ⁻³	3,4.10 ⁻³	1,0.10 ⁻³	14,1.10 ⁻³	