

**EFFECTOS CINÉTICOS EN LA MARCHA HUMANA PRODUCIDOS POR
SUPERFICIES CON MOVIMIENTOS LATERALES ARMÓNICOS**

ING. BRYAN CASTILLO TORRES

Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ingeniería

Tutor:

PETER THOMSON, PhD.

JOHANNIO MARULANDA, PhD.



UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA

SANTIAGO DE CALI

2022

Resumen

Recientemente la literatura expone, con cierta validez, la hipótesis de una gran regeneración urbana a nivel global. Lo cual ha generado una revolución en el diseño y la construcción de estructuras civiles, sumado con la incursión progresiva de materiales cada vez más resistentes y livianos en la Industria de la Construcción ha llevado a que estructuras como graderías, losas, escaleras y en especial puentes peatonales presenten una alta susceptibilidad a la acción de cargas dinámica, donde la fuente más frecuente de excitación es la inducida por la actividad humana. Estas dos características han desencadenado situaciones que limitan la serviciabilidad de las estructuras como en el renombrado caso del Puente Millennium donde las cargas de marcha de los peatones se acoplaron dinámicamente con el contenido frecuencial de la estructura en la dirección lateral generando amplificaciones no deseadas que llevaron al cierre solo dos días posterior a su apertura. Esta situación despertó el interés en la comunidad científica por determinar las causas y el entendimiento de este fenómeno, el cual se relaciona con los efectos de acoplamiento de la Interacción existente entre Humano-Estructura (IHE).

Los fenómenos adaptativos de la marcha humana ante vibraciones en estructuras civiles, debido a la sincronización dinámica entre estos, es uno de los aspectos de la IHE que se denominan habitualmente como *Efectos Lock-In*. En general, existen dos aspectos importantes en los efectos de la IHE en este tipo de estructuras. El primero considera cambio en las propiedades dinámicas, debido a la presencia adicional de masa no estacionaria sobre la misma. El segundo aspecto se refiere a los grados de acoplamiento existentes entre las personas que transitan, así como entre éstas y la estructura. Aunque su investigación en los últimos años ha aumentado considerablemente, estos aspectos aún no se han detallado y atendido completamente.

Por lo descrito anteriormente, esta investigación se enfocó, en primer lugar, en desarrollar una plataforma dinámica biaxial para la evaluación de las cargas inducidas por la marcha humana denominada Marco de Pruebas para Interacción Humano-Estructura (MP-IHE). Posteriormente, se desarrolló una campaña experimental para la evaluación de las cargas inducidas por la marcha humana bajo movimientos sinusoidales laterales con desplazamientos entre $5.0 \rightarrow 50 \text{ mm}$ y un contenido frecuencial de $0.7 \rightarrow 1.3 \text{ Hz}$, alcanzando resultados comparables de otras investigaciones con plataformas dinámicas laterales. Adicionalmente, el MP-IHE permitió la adquisición de las cargas verticales de marcha durante los movimientos laterales impuestos, sobre las cuales no se tenía registro en la literatura bajo esta condición, donde se calcularon amplificaciones de estas fuerzas de hasta un 30% y cambios en su contenido frecuencial, en comparación con las cargas de marcha sobre superficie rígida.

Palabras clave: Interacción Humano-Estructura, cargas antrópicas, marcha humana, sincronización, vibraciones estructurales.

Contenido

Resumen.....	iii
Contenido.....	iv
Listado de tablas	v
Listado de figuras.....	vi
Capítulo 1. Problema de investigación.....	10
1.1 Descripción.	10
1.2 Formulación.	12
1.3 Objetivos.	13
1.4 Justificación.	13
Capítulo 2. Marco de referencia.....	15
2.1 Antecedentes y Estado del arte.	15
Capítulo 3. Montaje Experimental.....	26
3.1 Componentes del MPE-IHE.....	27
3.2 Evaluación numérica.....	31
3.3 Implementación Experimental e Instrumentación.....	32
3.4 Pruebas Experimentales sobre ME-IHE.....	34
Capítulo 4. Pruebas Experimentales.....	37
4.1 Sujetos de prueba (SP).	37
4.2 Periodos de soporte y elevación de la Marcha humana.....	38
4.3 Correlación entre la Marcha humana y las superficies flexibles.....	43
4.4 Cargas inducidas por la marcha humana.....	45
Conclusiones	49
Referencias	50
ANEXO No.1	65
ANEXO No.2	90

Listado de tablas

Tabla 1. Frecuencias fundamentales de la Marcha, trote y caminata rápida Humana resumidas en [56]	18
Tabla 2. Datos antropométricos de los sujetos de prueba.....	38
Tabla 3. Valores medios de soporte de pie durante paso, SP No.1.	40
Tabla 4. Valores medios de elevación de pie durante un paso, SP No.1.....	40
Tabla 5. Valores de correlación de desplazamientos CM y MP-IHE, SP No.1.....	45
Tabla 6. Valores de coeficientes de las fuerzas laterales inducidas por SP No.1.	47
Tabla 6. Valores medios de soporte de pie sobre suelo durante un paso, SP No. 1→7.	97
Tabla 7. Valores medios de suspensión de pie sobre suelo durante un paso, SP No. 1→7.	99
Tabla 8. Anexo No.2, Valores de correlación de desplazamientos CM y MP-IHE, SP No.2.	102
Tabla 9. Anexo No.2, Valores de correlación de desplazamientos CM y MP-IHE, SP No.3.	103
Tabla 10. Anexo No.2, Valores de correlación de desplazamientos CM y MP-IHE, SP No.4.	104
Tabla 11. Anexo No.2, Valores de correlación de desplazamientos CM y MP-IHE, SP No.5.	105
Tabla 12. Anexo No.2, Valores de correlación de desplazamientos CM y MP-IHE, SP No.6.	106
Tabla 13. Anexo No.2, Valores de correlación de desplazamientos CM y MP-IHE, SP No.7.	107
Tabla 15. Anexo No.2, Valores de coeficientes de las fuerzas laterales inducidas por SP No.2.....	109
Tabla 16. Anexo No.2, Valores de coeficientes de las fuerzas laterales inducidas por SP No.3.....	110
Tabla 17. Anexo No.2, Valores de coeficientes de las fuerzas laterales inducidas por SP No.4.....	112
Tabla 18. Anexo No.2, Valores de coeficientes de las fuerzas laterales inducidas por SP No.5.....	113
Tabla 19. Anexo No.2, Valores de coeficientes de las fuerzas laterales inducidas por SP No.6.....	115
Tabla 20. Anexo No.2, Valores de coeficientes de las fuerzas laterales inducidas por SP No.7.....	116

Listado de figuras

Figura 1. Puentes peatonales con efectos de Interacción Humano-Estructura en la Literatura; a) Puente Millennium; b) Puente Solferino; c) Puente del Aeropuerto de Changi; d) Puente de Pedro e Inês; e) Le Ponte del Mare; f) Puente Goodwill.....	11
Figura 2. Fuerza de reacción del suelo (GRF) durante la marcha humana [145].	16
Figura 3. Comparación de la Marcha – Sujeto sano vs Discapacitado de rodilla [146]; a) Longitud de paso vs Velocidad; b) Tiempo de soporte vs Velocidad; c) Tiempo de balanceo vs Velocidad; d) Fuerza de amplitud de peatón vs Velocidad.....	17
Figura 4. Ilustración de las tres componentes de GRF debido a la Marcha Humana: Lateral, Longitudinal y Vertical [146].	17
Figura 5. Puentes peatonales; a) Puente de Broughton [46], UK; b) Puente de Toda-Park [22], Japón.	18
Figura 6. Puente Millennium; a) ilustración; b) Prueba de carga	19
Figura 7. Puente Solferino; a) Ilustración; b) Prueba de carga.	19
Figura 8. Puente peatonal Eeklo [163]; a) Esquema vista superior puente Eeklo; b) Fotografía lateral; c) Fotografía lateral de viga de carga principal; d) Sensor inercial y marcadores; e) Prueba de carga antrópica por multitud.	20
Figura 9. Estudio experimental de fuerzas laterales inducidas por peatones [168]; a) Montaje experimental durante el ensayo; b) montaje experimental antes de ensayo.	21
Figura 10. Figura 16. Montaje experimental Ingólfsson et al. [69], [98]; a) Descripción de componentes del sistema experimental; b) Vista esquemática del montaje experimental y en operación.	22
Figura 11. Montaje experimental Carroll et. al. [64]; a) Vista tridimensional del montaje experimental; b) Sistema de movimiento sinusoidal lateral; c) sistema de medición de carga vertical y lateral; d) descripción de los componentes del sistema experimental lateral.....	23
Figura 12. Figura 18. Montaje experimental Bocian et al. [60], [81], [170], [171]; a) Esquema de montaje experimental; b) Ilustración de montaje experimental en operación.	24
Figura 13. Montaje experimental Haowen et. al. [78]; a) Descripción montaje experimental a. Lateral, b. Longitudinal, c. sistema de celdas de carga vertical, d. sistema de celdas de carga Lateral, e. plantillas de adquisición de carga antrópica marca: Novel Loadsol; b) Resultados experimentales de marcha de sujetos de prueba.	25
Figura 14. Montaje experimental; a) Vista isométrica; b) vista frontal.	26
Figura 15. Simulador Sísmico de la EICG-Universidad del Valle; a) Esquemático; b) Bucla de control	27
Figura 16. Sistema de soportes laterales.	28
Figura 17. Caminadora SOLE F63; a) Imagen comercial de Caminadora SOLE-F63; b) Caminadora SOLE-F63 modificada.	29
Figura 18. Sistema de adquisición de carga; a) Celda DYLY-102 200 kg-f; b) Celda Omega LC703-200 lb-f; c) Celda DYLY-102 50 kg-f; d) Celdas laterales montaje experimental; e) Celdas longitudinales y verticales montaje experimental; f) Esquemático montaje experimental.	30
Figura 19. Sistema hidráulico vertical; a) Esquemático de un módulo de carga; b) Montaje experimental de Modulo de carga; c) Servoválvula KBS y Sensor de presión en montaje experimental; d) esquemático parcial de sistema hidráulico.....	31

Figura 20. Dinámica montaje estructural; a) Modo No.1→232.4 Hz; b) Modo No.2→234.4 Hz; c) Modo No.3→244.16 Hz; d) Modo No.4→255.5 Hz; 5) Modo No.5→267.1 Hz;	32
Figura 21. Montaje experimental construido; a) Vista isométrica; b) Vista frontal.....	33
Figura 22. Tablero Electrónico de Conexiones de ME-IHE.	34
Figura 23. Acelerómetro; a) Acelerómetro ENDEVCO; b) Módulo de acondicionamiento de señal. ...	34
Figura 24. Barridos lineales 0.1→3.0 Hz de la Base→Treadmill con desplazamiento variable 1.0→5.0 mm; a) Barrido No.1; b) Barrido No.2; c) Barrido No.3; d) Barrido No.4.	35
Figura 25. Transmisibilidad Base→Treadmill; a) Barrido No.1; b) Barrido No.2; c) Barrido No.3; d) Barrido No.4.	35
Figura 26. Barridos lineales 0.1→3.0 Hz de la Base→Soporte lateral con desplazamiento variable 1.0→5.0 mm; a) Barrido No.1; b) Barrido No.2; c) Barrido No.3; d) Barrido No.4.	36
Figura 27. Transmisibilidad Base→Soporte lateral; a) Barrido No.1; b) Barrido No.2; c) Barrido No.3; d) Barrido No.4.	36
Figura 28. Montaje de ensayos de la marcha humana, sujeto de prueba No.1; a) Vista isométrica; b) Vista lateral; c) Vista posterior.....	37
Figura 29. Registro visual de un paso de marcha sobre superficie rígida SP No.1.	38
Figura 30. Análisis de la variabilidad de los tiempos de soporte y suspensión de pasos de marcha, SP-No.1; a) Tiempos de suspensión; b) Tiempos de soporte.....	39
Figura 31. Tiempos de soporte y elevación de pie para un paso de marcha – SP No.1; a) Periodo de Soporte vs Frecuencias de excitación lateral para un paso de marcha; b) Periodo de Suspensión vs Frecuencias de excitación lateral para un paso de marcha.	41
Figura 32. Periodo de soporte vs frecuencias de excitación por SP; a) Desp. 5 mm; b) Desp. 10 mm; c) Desp. 20 mm; d) Desp. 30mm; e) Desp. 50 mm.....	42
Figura 33. Periodo de elevación vs frecuencias de excitación por SP; a) Desp. 5 mm; b) Desp. 10 mm; c) Desp. 20 mm; d) Desp. 30mm; e) Desp. 50 mm.....	43
Figura 34. Proceso de Binarización de fotogramas, SP No.1.....	44
Figura 35. Desplazamientos en pixeles del CM y del MP-IHE, SP No.1.....	44
Figura 36. Superficies de correlaciones entre desplazamientos del CM y MP-IHE, SP No.1.....	45
Figura 37. Fuerzas laterales inducidas por la marcha, SP No.1.....	46
Figura 38. Datos en frecuencia de las fuerzas laterales inducidas por la marcha, SP No.1.....	46
Figura 39. Superficies de los valores de coeficientes de las fuerzas laterales inducidas por SP No.1.....	47
Figura 40. Fuerzas verticales inducidas por la marcha, SP No.1.	48
Figura 41. Datos en frecuencia de las fuerzas verticales inducidas por la marcha, SP No.1.	48
Figura 42. Anexo No.2 - SP No.2, Tiempos de soporte y elevación de pasos de marcha; a) Tiempos de soporte; b) Tiempos de elevación.	91
Figura 43. Anexo No.2 - SP No.3, Tiempos de soporte y elevación de pasos de marcha; a) Tiempos de soporte; b) Tiempos de elevación.	92
Figura 44. Anexo No.2 - SP No.4, Tiempos de soporte y elevación de pasos de marcha; a) Tiempos de soporte; b) Tiempos de elevación.	93
Figura 45. Anexo No.2 - SP No.5, Tiempos de soporte y elevación de pasos de marcha; a) Tiempos de soporte; b) Tiempos de elevación.	94
Figura 46. Anexo No.2 - SP No.6, Tiempos de soporte y elevación de pasos de marcha; a) Tiempos de soporte; b) Tiempos de elevación.	95
Figura 47. Anexo No.2 - SP No.7, Tiempos de soporte y elevación de pasos de marcha; a) Tiempos de soporte; b) Tiempos de elevación.	96

Figura 48. Anexo No.2: Periodos de soporte y elevación vs Frecuencia; [a, b]) SP No. 2; [c, d]) SP No. 3; [e, f]) SP No. 4; [g, h]) SP No. 5; [i, j]) SP No. 6; [k, l]) SP No. 7.....	101
Figura 49. Anexo No.2,Desplazamientos en pixeles del CM y del MP-IHE, SP No.2.	102
Figura 50. Anexo No.2,Superficies de correlaciones entre desplazamientos del CM y MP-IHE, SP No.2.	102
Figura 51. Anexo No.2, Desplazamientos en pixeles del CM y del MP-IHE, SP No.3.	103
Figura 52. Anexo No.2, Superficies de correlaciones entre desplazamientos del CM y MP-IHE, SP No.3.	103
Figura 53. Anexo No.2, Desplazamientos en pixeles del CM y del MP-IHE, SP No.4.	104
Figura 54. Anexo No.2, Superficies de correlaciones entre desplazamientos del CM y MP-IHE, SP No.4.	104
Figura 55. Anexo No.2, Desplazamientos en pixeles del CM y del MP-IHE, SP No.5.	105
Figura 56. Anexo No.2, Superficies de correlaciones entre desplazamientos del CM y MP-IHE, SP No.5.	105
Figura 57. Anexo No.2, Desplazamientos en pixeles del CM y del MP-IHE, SP No.6.	106
Figura 58. Anexo No.2, Superficies de correlaciones entre desplazamientos del CM y MP-IHE, SP No.6.	106
Figura 59. Anexo No.2, Desplazamientos en pixeles del CM y del MP-IHE, SP No.7.	107
Figura 60. Anexo No.2, Superficies de correlaciones entre desplazamientos del CM y MP-IHE, SP No.7.	107
Figura 61. Anexo No.2, Fuerzas laterales inducidas por la marcha, SP No.2.	108
Figura 62. Anexo No.2, Datos en frecuencia de las fuerzas laterales inducidas por la marcha, SP No.2.	108
Figura 63. Anexo No.2, Superficies de los valores de coeficientes de las fuerzas laterales inducidas por SP No.2.	109
Figura 64. Anexo No.2, Fuerzas laterales inducidas por la marcha, SP No.3.	109
Figura 65. Anexo No.2, Datos en frecuencia de las fuerzas laterales inducidas por la marcha, SP No.3.	110
Figura 66. Anexo No.2, Superficies de los valores de coeficientes de las fuerzas laterales inducidas por SP No.3.	110
Figura 67. Anexo No.2, Fuerzas laterales inducidas por la marcha, SP No.4.	111
Figura 68. Anexo No.2, Datos en frecuencia de las fuerzas laterales inducidas por la marcha, SP No.4.	111
Figura 69. Anexo No.2, Superficies de los valores de coeficientes de las fuerzas laterales inducidas por SP No.4.	112
Figura 70. Anexo No.2, Fuerzas laterales inducidas por la marcha, SP No.5.	112
Figura 71. Anexo No.2, Datos en frecuencia de las fuerzas laterales inducidas por la marcha, SP No.5.	113
Figura 72. Anexo No.2, Superficies de los valores de coeficientes de las fuerzas laterales inducidas por SP No.5.	113
Figura 73. Anexo No.2, Fuerzas laterales inducidas por la marcha, SP No.6.	114
Figura 74. Anexo No.2, Datos en frecuencia de las fuerzas laterales inducidas por la marcha, SP No.6.	114
Figura 75. Anexo No.2, Superficies de los valores de coeficientes de las fuerzas laterales inducidas por SP No.6.	115

Figura 76. Anexo No.2, Fuerzas laterales inducidas por la marcha, SP No.7.	115
Figura 77. Anexo No.2, Datos en frecuencia de las fuerzas laterales inducidas por la marcha, SP No.7.	116
Figura 78. Anexo No.2, Superficies de los valores de coeficientes de las fuerzas laterales inducidas por SP No.7.	116
Figura 79. Anexo No.2, Fuerzas verticales inducidas por la marcha, SP No.2.....	117
Figura 80. Anexo No.2, Datos en frecuencia de las fuerzas verticales inducidas por la marcha, SP No.2.	117
Figura 81. Anexo No.2, Fuerzas verticales inducidas por la marcha, SP No.3.....	118
Figura 82. Anexo No.2, Datos en frecuencia de las fuerzas verticales inducidas por la marcha, SP No.3.	118
Figura 83. Anexo No.2, Fuerzas verticales inducidas por la marcha, SP No.4.....	119
Figura 84. Anexo No.2, Datos en frecuencia de las fuerzas verticales inducidas por la marcha, SP No.4.	119
Figura 85. Anexo No.2, Fuerzas verticales inducidas por la marcha, SP No.5.....	120
Figura 86. Anexo No.2, Datos en frecuencia de las fuerzas verticales inducidas por la marcha, SP No.5.	120
Figura 87. Anexo No.2, Fuerzas verticales inducidas por la marcha, SP No.6.....	121
Figura 88. Anexo No.2, Datos en frecuencia de las fuerzas verticales inducidas por la marcha, SP No.6.	121
Figura 89. Anexo No.2, Fuerzas verticales inducidas por la marcha, SP No.7.....	122
Figura 90. Anexo No.2, Datos en frecuencia de las fuerzas verticales inducidas por la marcha, SP No.7.	122

Capítulo 1. Problema de investigación

1.1 Descripción.

Los fenómenos de sincronización son procesos constantes con tendencia hacia el orden espontáneo, considerados como las fuerzas universales más dominante en la naturaleza y que, a su vez, complementan la entropía existente en la misma [1]. Estos conjuntos de actividades interdependientes presentan ejemplos fascinantes y cautivadores, desde el comportamiento de las partículas en el reino cuántico hasta las relaciones macro de planetas y galaxias, tales como: la producción coordinada de hormonas por las células de un tejido [2], la armonía de cardúmenes y parvadas [3]–[5], el acoplamiento de audiencias aplaudiendo [6], el funcionamiento de algunos dispositivos mecánicos y circuitos electrónicos [7], y algunos procesos planetarios a gran escala [8].

El estudio de estos fenómenos posee un largo historial, las primeras observaciones técnicas registradas se remontan a los tiempos del matemático holandés Christiaan Huygens durante el siglo XVII, mediante sus experimentos con relojes de péndulos. Demostrando con estas pruebas que incluso objetos inanimados tienen la capacidad de desarrollar ciertos niveles de sincronización, los cuales en su caso correspondían a los efectos causados por las vibraciones imperceptibles que se dispersaban por la estructura de madera sobre la cual se soportaban sus relojes durante las pruebas. Estas vibraciones dispersas indujeron una correlación entre los especímenes, lo cual generaba como resultado, una y otra vez sin importar la condición inicial, oscilaciones de los péndulos con la misma frecuencia. Estas observaciones fueron inicialmente catalogadas por Huygens como “...un proceso de extraña simpatía” que años más tarde fueron corroborados por Henk Nijmeijer et. al. en la Universidad de Eindhoven como un caso típico de sincronización por medios mecánicos [9].

Uno de los fenómenos de sincronización más relevante en la ingeniería estructural se ha relacionado con el acoplamiento dinámico entre las cargas antrópicas y la respuesta dinámica de las estructuras civiles. Estos efectos se han registrado ampliamente en la literatura en estructuras como: escaleras [10]–[13], graderías o tribunas [14], [15], losas [16]–[21] y más especialmente en Puentes peatonales [22]–[29]. Estos últimos se han constituido como las estructuras más afectadas debido a su condición natural de salvar grandes distancias, masas y amortiguamientos relativamente bajos y al aumento de las exigencias técnicas; estas condiciones generan estructuras cada vez más esbeltas y flexibles, incrementando su sensibilidad dinámica a desarrollar vibraciones excesivas debido a la acción de cargas inducidas por la actividad humana [30]–[33]. Los hechos ocurridos el 10 de junio del año 2000 sobre el Puente Millennium en Londres durante su inauguración dan cierta validez a lo expuesto anteriormente, pues en esta estructura se presentaron vibraciones excesivas debido a la sincronización lateral de las cargas inducidas por los peatones que los transitaban y la dinámica de la estructura en esta dirección; este acoplamiento dinámico ocasionó aceleraciones cercanas a 0.25g con desplazamientos de hasta 7.0 cm, lo que generó no solo una gran crítica pública sino un cierre total del puente peatonal para realizar su intervención y control de las vibraciones excesivas [34].

El fenómeno de sincronización desarrollado en el Puente Millennium fue descrito inicialmente por Dallard et. al. en [24]. Sin embargo, fue el trabajo de revisión realizado por Zivanovic et. al. en [35] el cual posicionó los efectos de la interacción dinámica entre Estructura-Peatón como uno de los temas de mayor interés creciente en las últimas dos décadas para la comunidad científica, estableciendo lo sucedido en el Puente Millennium como una estructura de referencia internacional para la ejemplificación de los problemas de vibraciones en estructuras civiles inducidas por la actividad humana [35]–[44]. Por otra parte, este suceso no se ha configurado como un hecho aislado ya que se tienen algunos registros históricos de situaciones similares [45]. El caso más antiguo que se tiene referencia fue el colapso del puente peatonal de *Broughton* en *UK* debido a las cargas dinámicas inducidas por la marcha armónica de 60 soldados de infantería que cruzaban la estructura [46]. Adicionalmente, se han reportado incidentes más recientes en este tipo de estructuras causados por solicitaciones antrópicas, como los casos de: *The Wuhan Yangtze Bridge*, en China [47]; *Toda-Park Bridge*, en Japón [22]; *Pedro e Inês Bridge*, Coimbra-Portugal [28], [29]; *Long Span Steel Bridge*, Changi Airport-Singapur [25], [26]; *Le Ponte del Mare*, Pescara -Italia [48], [49]; *The Goodwill Bridge*, Brisbane-Australia [50]; *Eeklo Footbridge*, Bélgica [51]; entre otros [27], [52], mostrados algunos en la Fig. 1.

Todas estas estructuras dan cierta validez a la hipótesis de una gran regeneración urbana a nivel global, donde segmentos aislados se están interconectando con nuevos requerimientos arquitectónicos e ingenieriles de mayor exigencia técnica [36], esta novedosa perspectiva encamina una revolución notable en el diseño, construcción y gestión de este tipo de estructuras. Sumado a estos conceptos, la industria de la construcción afronta la incursión progresiva de nuevos materiales cada vez más resistentes y livianos, ocasionando que los puentes peatonales desarrollados sean cada vez más esbeltos y flexibles. En consecuencia, estas estructuras presentan una alta susceptibilidad a vibraciones excesivas debido a cargas dinámicas [31], [35], [53]–[55]. Esta condición de sensibilidad frente a estas solicitaciones es aún más destacable al comprender que su comportamiento dinámico, generalmente, se encuentra asociado con

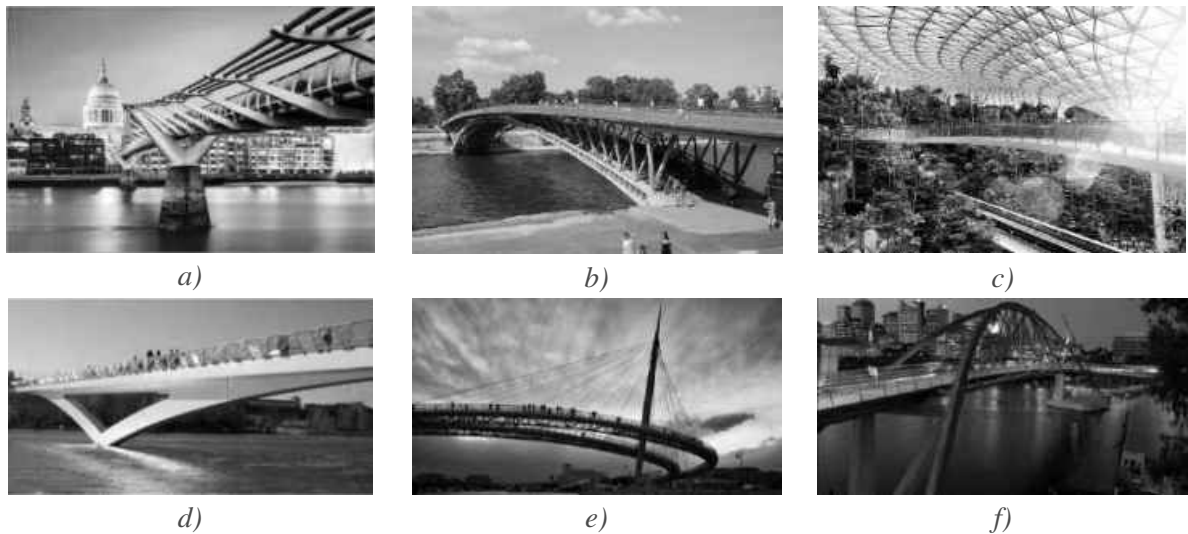


Figura 1. Puentes peatonales con efectos de Interacción Humano-Estructura en la Literatura; **a)** Puente Millennium; **b)** Puente Solferino; **c)** Puente del Aeropuerto de Changi; **d)** Puente de Pedro e Inês; **e)** Le Ponte del Mare; **f)** Puente Goodwill.

frecuencias menores a 10.0 Hz. Constituyendo un foco de sensibilidad en el acoplamiento de la respuesta estructural con la dinámica de la marcha humana, catalogada como la fuente de excitación más recurrente en los puentes peatonales, y que además presenta su contenido frecuencial vertical y lateral entre 1.6→2.4 y 0.8→1.2 Hz, respectivamente [52], [56]. Lo anterior implica un riesgo latente de que los puentes peatonales sean afectados por algún fenómeno de sincronización entre la dinámica de la estructural y las cargas de generadas por la marcha de los peatones, ocasionando cambios en las propiedades dinámicas del sistema y, en muchos de los casos, amplificaciones en sus respuestas estructurales.

Este fenómeno sincrónico de las cargas antrópicas con las vibraciones estructurales de los puentes peatonales se debe a la naturaleza adaptativa y condición no-estacionaria de la marcha humana. Lo cual se refleja en el deseo innato de mantener el equilibrio del cuerpo sobre una superficie en movimiento, alterando las sollicitaciones inducidas sobre la estructura e incrementando su respuesta estructural [57]–[61]. Al anterior fenómeno de acoplamiento dinámico se le conoce habitualmente como *Efecto Lock-In* [28], [36], [62]–[68]. En este sentido, las vibraciones del sistema Humano-Estructura se configuran “*autoexcitadas*” alcanzando estados de respuesta estacionario [69]. Investigaciones francesas y algunas otras, determinaron que los *Efectos Lock-In* se hacen presentes a medida que las vibraciones estructurales se hacen perceptibles, con valores de aceleraciones superiores a $0.10 \rightarrow 0.15 \text{ m/s}^2$; y para valores menores a este umbral o no perceptibles, se presenta un comportamiento aleatorio en los peatones [70]–[75]. Esto demuestra la necesidad de investigar, definir y modelar el grado de sincronización alcanzables entre la marcha de los peatones y la dinámica de las superficies flexibles.

En general, existe tres aspectos importantes en los efectos de la Interacción Humano-Estructura (IHE) sobre superficies flexible: Cambios en las propiedades dinámicas de dichas estructuras (Interacción Humano a Estructura, IH2E), las relaciones de Interacción Humano-Humano (IHH) e Interacción Estructura a Humano (IE2H) [20], [53], [72], [76]–[85]. Aunque muchos investigadores concluyen abiertamente que los estudios e interés en estos campos viene aumentando considerablemente en las últimas dos décadas, aún estos aspectos no se han detallado ni comprendido completamente [60], [61], [73], [76], [86]–[94]. Por todo lo anterior, esta investigación se centró en realizar un aporte a la comprensión integral del fenómeno de acoplamiento dinámico de la marcha humana cuando es sometida a movimientos armónicos en el sentido lateral, debido a que la marcha en esta dirección presenta una menor condición de estabilidad generando un aumento de la probabilidad de sincronización.

1.2 Formulación.

Lo planteado anteriormente, ha motivado para aportar en el estudio de la evaluación de los efectos de la IHE en estructuras flexibles. Principalmente, en lo referente a los efectos de acoplamiento dinámico de la marcha humana con superficies con movimiento armónico lateral, y formular así el siguiente problema de investigación:

¿Cuáles son los efectos cinéticos en la marcha humana producidos por superficies con movimiento armónico lateral?

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo general

Determinar los efectos cinéticos en la marcha humana producidos por superficies con movimiento armónico lateral.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar y construir una plataforma dinámica para la evaluación de la marcha humana sobre superficies con movimiento armónico lateral.
- Adquirir experimentalmente las respuestas cinéticas de la marcha humana sobre superficies con movimiento armónico lateral empleando la plataforma dinámica.
- Comparar las respuestas cinéticas de la marcha humana sobre superficie estática respecto a superficies con movimientos armónicos laterales.

1.4 Justificación.

La literatura sobre vibraciones en estructuras civiles inducidas por cargas antrópicas expone diversas metodologías para determinar los niveles de percepción humana ante las respuestas dinámicas estructurales. Sin embargo, su aplicabilidad en la evaluación de vibraciones en estructuras donde los peatones se encuentren en un estado no-estacionario no es adecuado debido a que se experimentan diversas intensidades de vibración, los cuales generalmente se relacionan a los efectos de la IHE [35], [71], [72], [74], [95]. Sumado a lo anterior, se debe tener presente la aleatoriedad intrínseca existente en la marcha humana, la cual induce cambios en las reacciones antrópicas ante condiciones similares de vibración [57], [59], [96]–[100], conociendo a este fenómeno como la variabilidad inter- e intra-individual de los seres humanos [101], [102]. Esta condición de sensibilidad humana ante las vibraciones estructurales se considera de significativa importancia [65], [73], [74], [103], especialmente en lo referente a la capacidad de serviciabilidad de las estructuras civiles sometidas de forma frecuente a sollicitaciones antrópicas.

Actualmente, es aceptado que las vibraciones estructurales inducidas por la actividad humana suelen ser consideradas más como un problema de capacidad de serviciabilidad que de seguridad de la estructura [36], [51], [52], [103]–[108]. Esta consideración se debe a que en los humanos su percepción es sensible a niveles bajos de vibración, alrededor de 0.001 mm [109], [110], y a que su marcha es generalmente la fuente principal de excitación en estructuras sensibles a cargas dinámicas. Lo anterior, constituye a los peatones como los principales receptores de vibraciones y quienes gobiernan su capacidad de serviciabilidad. Aunque inicialmente autores como Walley et. al en [111] expresaron la necesidad de minimizar al límite las vibraciones estructurales y con ello tener controlabilidad sobre la capacidad de servicio, otros como Leonard et. al [112] y Ortiz et. al. [15], [113] afirmaron que es una solución inviable, pues el diseño y construcción de este tipo de estructuras para el desarrollo de vibraciones imperceptibles generaría costos excesivos.

En un intento formal por afrontar este problema de la capacidad de servicio estructuras civiles con sensibilidad dinámica, especialmente en puentes peatonales, la comunidad internacional segregó las pautas de diseño de estas estructuras en dos conceptos: El primero requiere del cálculo de la respuesta dinámica de la estructura en el instante para verificar si los límites de vibración son aceptables para los peatones; el segundo concepto, consiste en evitar las frecuencias fundamentales que se correspondan con las de las cargas antrópicas o alguno de sus armónicos. Algunos investigadores y entidades internacionales que se inclinaron por el primer concepto fueron: La asociación estadounidense de funcionarios de carreteras estatales [114], Códigos BS 5400: Parte 2 y BS 5400: BD 37/01 [115], [116], *The Ontario Highway Bridge Design Code* [117], El Eurocódigo 5 [118] y *The Hong-Kong Structures Design Manual for Highways and Railways* [119]. Otros que se inclinaron por el segundo concepto fueron: Mason y Duncan [120], *The American Guide Specification* [121], Yoshida et al. [122] y Pimentel et al. [123]. Por otra parte, algunas entidades y organizaciones decidieron lidiar con el comportamiento dinámico existente en la IHE, tales como: la guía de la autoridad francesa de vías *SETRA* [124], el proyecto de investigación europeo SYNPEX [125]–[127], la agencia UK Highway Agency [128]–[131].

Aunque la comunidad internacional posee una sinergia desde hace un par de décadas frente al desarrollo de estudios para la evaluación de los efectos de la IHE en estructuras civiles con sensibilidad dinámica a las vibraciones [67], [78], [92], [132]–[135]. A nivel regional, específicamente en Colombia, este tipo de panorama aún se encuentra lejos. Las normas colombianas vigentes competentes para el diseño, construcción y análisis de este tipo de estructuras solo hacen referencia a ciertas recomendaciones sobre el contenido límite de las frecuencias naturales, como es el caso del Reglamento de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-10 [136] en su Título B.4.7 donde se limita la frecuencia fundamental de la estructura en un mínimo de 5.0 Hz, dejando en segundo plano un posible análisis dinámico con las cargas antrópicas recurrentes sobre la estructura. Adicionalmente, es aún más preocupante el caso del Código Colombiano de Diseño Sismorresistente para Puentes CCP-14 [137] donde no se especifica sección alguna relacionada con el análisis de las cargas humanas en puentes peatonales, estructuras de mayor afectación bajo efectos de la IHE. En este sentido, autores como Castellanos et. al. [138] y Rodríguez et. al [139], han realizado análisis dinámicos sobre el estado estructural de puentes peatonales de las ciudades de Santiago de Cali y Tunja, respectivamente, evidenciando una tendencia de estas estructuras a presentar comportamientos dinámicos relacionados a frecuencias bajas que generan una condición de susceptibilidad a vibraciones frente a cargas dinámicas, corroborando lo ya mencionado por Zivanovic et. al. [35]. Lo anterior presenta una evidente carencia en las limitaciones para el control de los efectos de la IHE o efectos “*Lock-In*” a nivel nacional inducidos por la acción de solicitaciones antrópicas en las estructuras civiles sensibles dinámicamente, condicionando sus criterios de serviciabilidad.

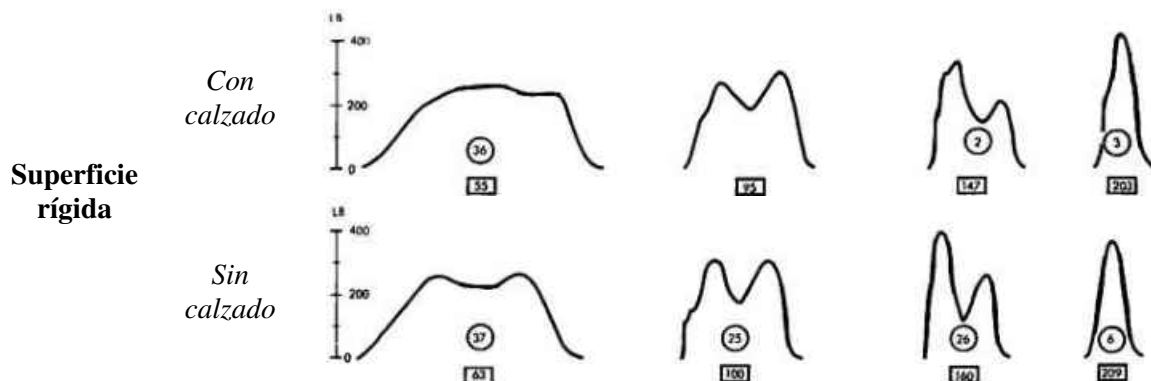
Los resultados experimentales encontrados en esta investigación realizan un pequeño aporte para la retroalimentación y desarrollo de modelos que representen adecuadamente los efectos “*Lock-In*” o de la IHE, ya que no existe a la fecha un modelo que sea considerado integral para la evaluación de estos fenómenos [20], [38], [133], [140]–[143]. Adicionalmente, este trabajo se acopla a la necesidad actual de la comunidad internacional por el desarrollo de pruebas

experimentales con información relevante sobre los fenómenos de acoplamiento entre Peatón-Estructura [31], [51], [54], [89], [91]; lo cual ha posicionado el estudio de estos fenómenos de sincronización como uno de los desafíos abordar en la agenda de la ingeniería estructural en los próximos años.

Capítulo 2. Marco de referencia

2.1 Antecedentes y Estado del arte.

La investigación realizada por Lippert et. al. en [144] durante el año 1946 fue una de las primeras en estudiar formalmente los efectos de las vibraciones estructurales sobre las actividades humanas, determinando experimentalmente la respuesta antrópica a diferentes niveles de vibraciones que se encuentran comúnmente al someterse al tráfico vehicular, ascensores, barcos, trenes, automóviles y aviones. Esta investigación fue complementada, para el caso puentes peatonales, con los reportes realizados por Leonard et. al. en [112] en 1966, los cuales describen la percepción de los peatones a las vibraciones estructurales. Los estudios realizados a esta fecha inferían una fuerte influencia de las cargas antrópicas como fuente de excitación para la generación de vibraciones en estructuras civiles. Así, las investigaciones orientadas al estudio de las solicitaciones debidas a la actividad humana fueron ganando protagonismo como la presentada por Galbraith et. al. [145] en la cual se realizaron una serie de pruebas experimentales para medir el historial de la carga durante la marcha y los periodos en los que se ejercen sobre el suelo; su propósito fue la de obtener información básica, como parte de un estudio, para mejorar detección de intrusos mediante la detección de señales sísmicas de las pisadas. En este estudio, se utilizaron tres sujetos de prueba con peso variable a diferentes ritmos de marcha, con y sin calzado, además de diferentes superficies. Mostrando estas pruebas en la Fig. 2.



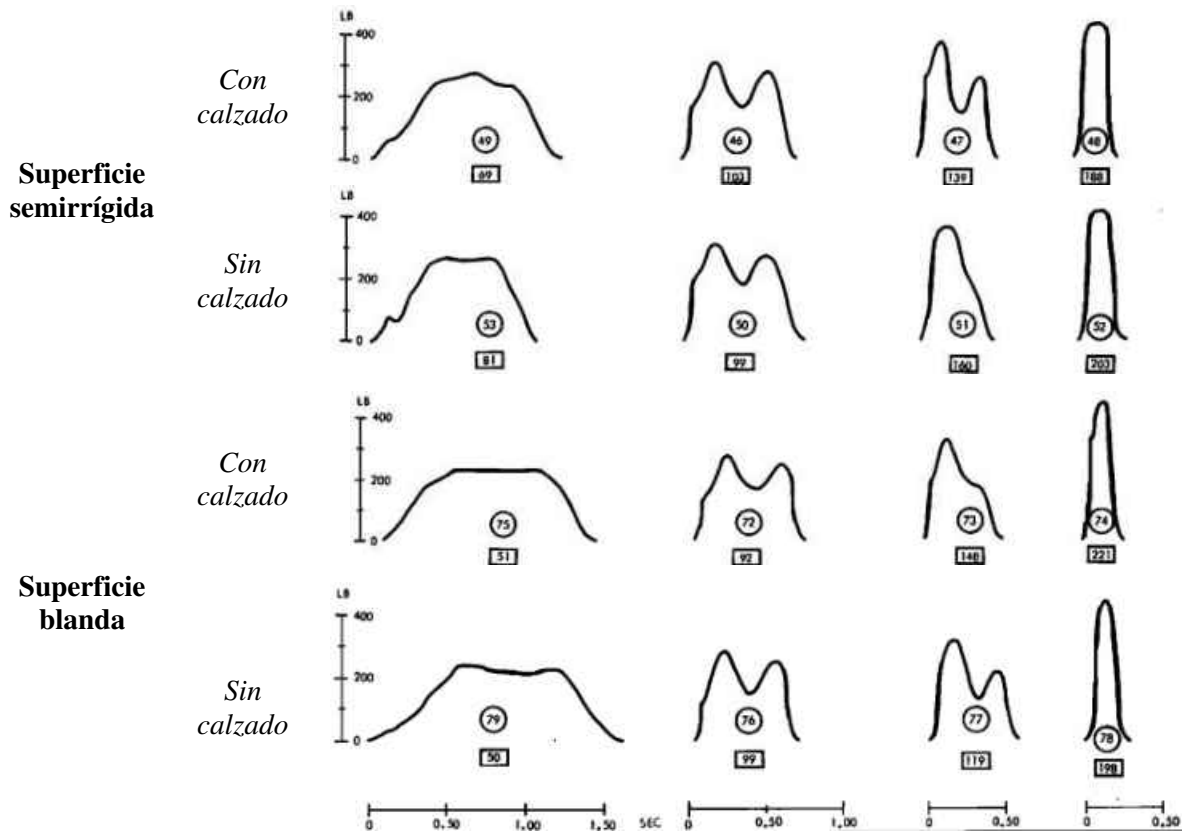
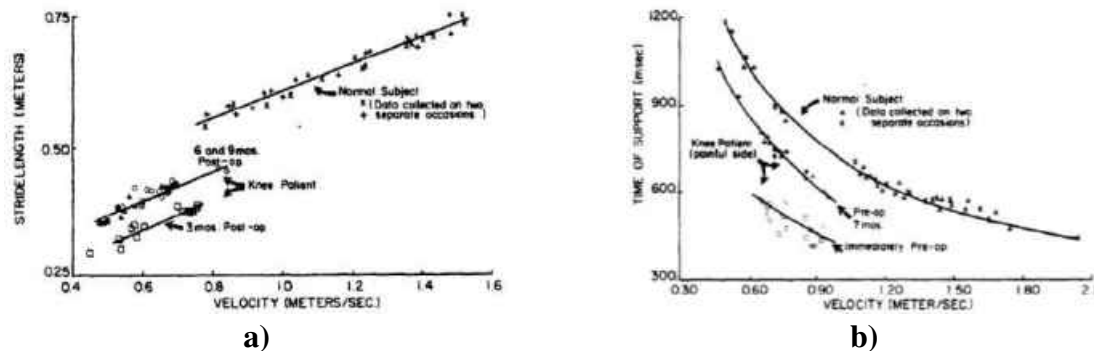


Figura 2. Fuerza de reacción del suelo (GRF) durante la marcha humana [145].

Andriacchi et. al. en [146] estudiaron inicialmente la marcha de 17 sujetos de prueba en condiciones sanas con edades entre 22→59 años, con altura de 155→180 *cm* y pesos de 436→1050 *N*. La segunda parte de la investigación consistió en el estudio de 16 sujetos de prueba con patología degradativa en sus rodillas con edades entre 48→76 años, estatura de 154→178 *cm* y pesos de 730→980 *N*. Para ambas pruebas se reportaron las *GFR* témpora-espaciales con relación a la velocidad de marcha. El protocolo de ensayo incluyó, por peatón, hasta 20 recorridos por una pasarela de 10.0 metros a velocidades de marcha norma. Estos valores se establecieron como indicadores útiles para identificar cambios en la dinamica de la marcha. Los resultados encontrados por este estudio se muestran en las Fig. 3-4.



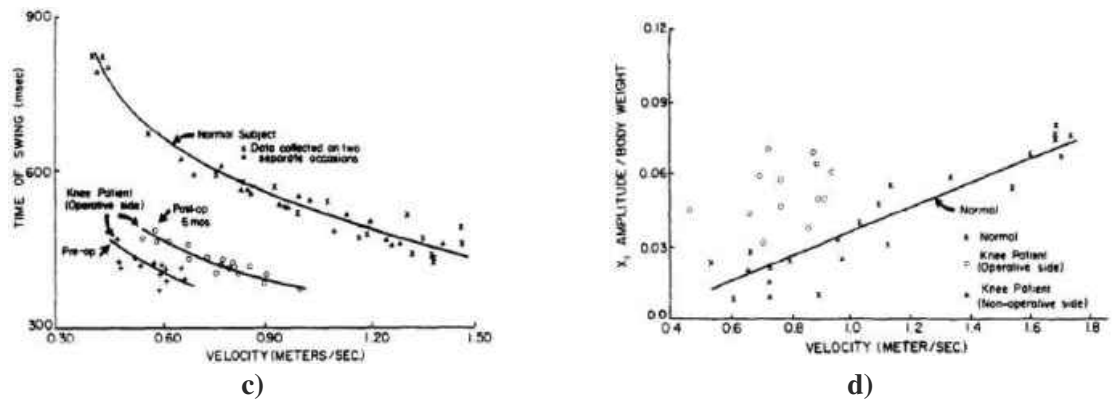


Figura 3. Comparación de la Marcha – Sujeto sano vs Discapacitado de rodilla [146]; a) Longitud de paso vs Velocidad; b) Tiempo de soporte vs Velocidad; c) Tiempo de balanceo vs Velocidad; d) Fuerza de amplitud de peatón vs Velocidad.

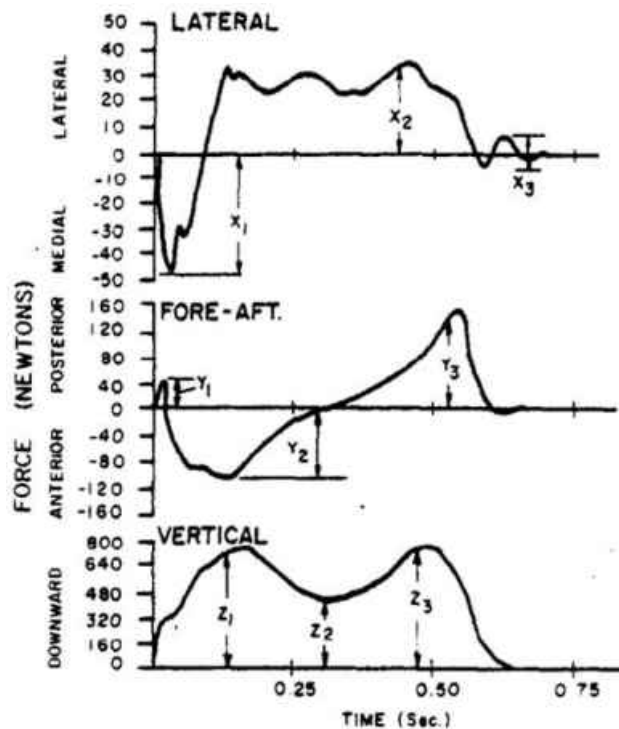


Figura 4. Ilustración de las tres componentes de GRF debido a la Marcha Humana: Lateral, Longitudinal y Vertical [146].

Los destacados estudios realizados por Bachmann et. al. [104], [105], [109], [110], [147], [148] y Newland et. al. en [56] permitieron la identificación estocástica del contenido frecuencial propio de la marcha y trote humano, tanto en el sentido lateral como vertical. Configurando una base analítica para la fundamentación de la evaluación de los efectos “Lock-In” en las estructuras civiles susceptibles a vibraciones inducidas por la actividad humana, valores resumidos en la Tabla 1.

Tabla 1. Frecuencias fundamentales de la Marcha, trote y caminata rápida Humana resumidas en [56]

	<i>Frecuencia de Paso (Hz)</i>	<i>Velocidad de Avance (m/s)</i>	<i>Longitud de paso (m)</i>	<i>Frecuencia Fundamental vertical (Hz)</i>	<i>Frecuencia Fundamental lateral (Hz)</i>
<i>Marcha lenta</i>	1.70	1.10	0.60	1.70	0.85
<i>Marcha normal</i>	2.00	1.50	0.75	2.00	1.00
<i>Marcha rápida</i>	2.30	2.20	1.00	2.30	1.15
<i>Trotar</i>	2.50	3.30	1.30	2.50	1.25
<i>Correr</i>	> 3.20	5.50	1.75	> 3.20	> 1.60

La condición de aleatoriedad intrínseca en las cargas inducidas por la marcha humana [31], [36], [57]–[60], [69], [80], ha configurado el entendimiento de su comportamiento como un mecanismo dinámico con alta variabilidad e influyente en la evaluación de las vibraciones de estructuras con ciertos niveles de sensibilidad dinámica. Debido a ello, la ingeniería estructural en la última década se ha volcado al estudio de la marcha humana de forma íntegra sobre superficies flexibles, desligándose de simple evaluaciones de carga antrópica sobre superficies rígidas no correlacionadas con las dinámicas estructurales [54].

En este sentido, el estudio de los efectos de acoplamiento de las cargas inducidas por las actividades humanas sobre estructuras civiles en condiciones operativas se ha registrado ampliamente, especialmente en Puentes Peatonales. El reporte realizado por Stevenson en [46], durante el año de 1821, se configura como el caso descrito más antiguo en lo relacionado al problema de interacción Estructura-Peaton en un puente peatonal, en esta investigación se describe el colapso del puente *Broughton* en UK debido al acoplamiento de las cargas dinámicas inducidas por 60 soldados al cruzar la estructura bajo una marcha sincronizada. Por otra parte, fueron Fujino et. al. en [22] los primeros en realizar una investigación orientada a la evaluación de los efectos del fenómeno de interacción Estructura-Peaton sobre una estructura moderna con materiales convencionales y en tránsitos de concurrencia típica. En este trabajo, se observan las vibraciones estructurales laterales inducidas por la actividad humana en el puente peatonal de Toda-Japón en condiciones operativas; comprobando una sincronización del 20.0% de los peatones con las vibraciones estructurales. En la Fig. 5 se muestran los puentes peatonales mencionados.



a)



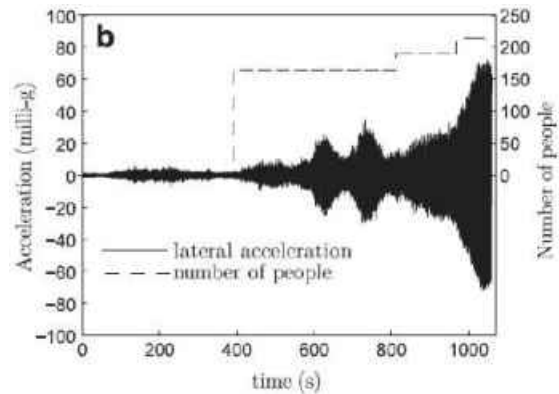
b)

Figura 5. Puentes peatonales; **a)** Puente de Broughton [46], UK; **b)** Puente de Toda-Park [22], Japón.

Posteriormente, sucede quizás el acontecimiento más relevante en el campo de estudio de la interacción Peatón-Estructura en una estructura civil. El suceso se registró el 10 de junio del año 2000 en Londres sobre el Puente Millennium, posicionando el problema de serviciabilidad de estas estructuras como un tema relevante para la ingeniería estructural en los años siguientes. En este puente peatonal, se registraron vibraciones laterales producto del acoplamiento del multitudinario flujo de peatones que asistieron a su inauguración, alcanzando desplazamiento de hasta 7.0 cm y aceleraciones cercanas a 0.25 g. Esta inapropiada dinámica de sincronización generó el cierre parcial y luego total de la estructura para el control de las vibraciones no deseadas. A diferencia de lo expuesto por Strogatz et. al. en [34], los trabajos realizados por Dallard et. al. en [24] y Zivanovic et. al. en [35] posicionaron los efectos de este fenómeno como un problema de interacción dinámica constante ente Estructura-Peatones diferente a un simple caso de sincronización. Este mismo fenómeno, se presentó unos meses antes sobre el puente Solferino en la ciudad de París sobre el río Sena. Al igual que lo sucedido en el Millennium, se reportaron vibraciones laterales excesivas debido a las cargas inducidas por la actividad humana en la dirección lateral, situación que fue reportada detalladamente en Dziuba et. al. En este par de estructuras se han realizados pruebas de carga a gran escala, las cuales consisten en inducir cargas de marcha humana de forma creciente en la estructura con el fin de determinar los cambios presentados en el amortiguamiento a partir de la respuesta dinámica y el número crítico de peatones que desencadena las vibraciones no deseadas, tal como lo describe Ingólfsson et. al en [36] y denominado Excitación Lateral Crónica (SLE), Fig. 6-7.



a)

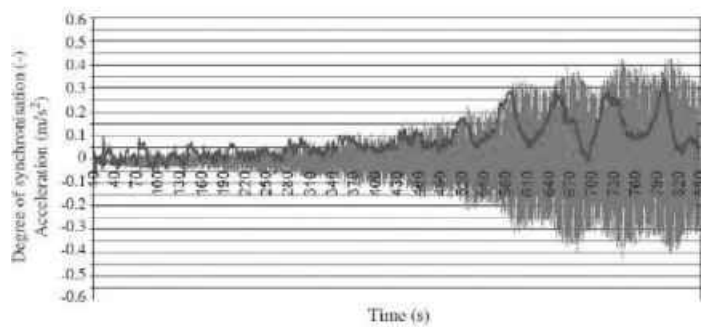


b)

Figura 6. Puente Millennium; a) ilustración; b) Prueba de carga



a)



b)

Figura 7. Puente Solferino; a) Ilustración; b) Prueba de carga.

En la literatura se registran muchos otros casos relacionados con la evaluación de los efectos de la IHE en puentes peatonales [47], [48], [92], [93], [140]–[142], [151]–[154]. Además, es posible encontrar trabajos de referencia tipo *Benchmark* en condiciones controladas de laboratorio, los cuales han sido especialmente utilizados para que la comunidad de investigadores pueda avanzar en lo relacionado a los efectos de IHE, promover lecciones aprendidas, e identificar las capacidades y limitaciones de los métodos competentes de evaluación [155]. Partiendo de este concepto, una de las primeras investigaciones fue realizada por Zivanovic et. al. en [86] sobre un puente peatonal de 19.90 m de longitud en la Universidad de Warwick, en UK. En este sentido, otros trabajos realizados fueron presentados por: Dey et. al. en [156], Hudson et. al. en [157], Claff et. al. en [88], Wei et. al. [158], Firus et. al. [159], Pfeil et. al. [135], Gómez et. al. [160] y Gallegos et. al. [161], [162]. Sin embargo, la investigación más ampliamente desarrollada a la fecha sobre un puente peatonal a escala real para evaluar su condición de sensibilidad dinámica frente a las cargas inducidas por la actividad humana es la propuesta por Van Nimmen et. al en [51], [163] constituyendo un conjunto de datos *Benchmark* a escala real del Puente peatonal Eeklo, de acceso público, con el fin de permitir una retroalimentación de los modelos numéricos desarrollados. Este caso de estudio se ilustra en la Fig. 8.

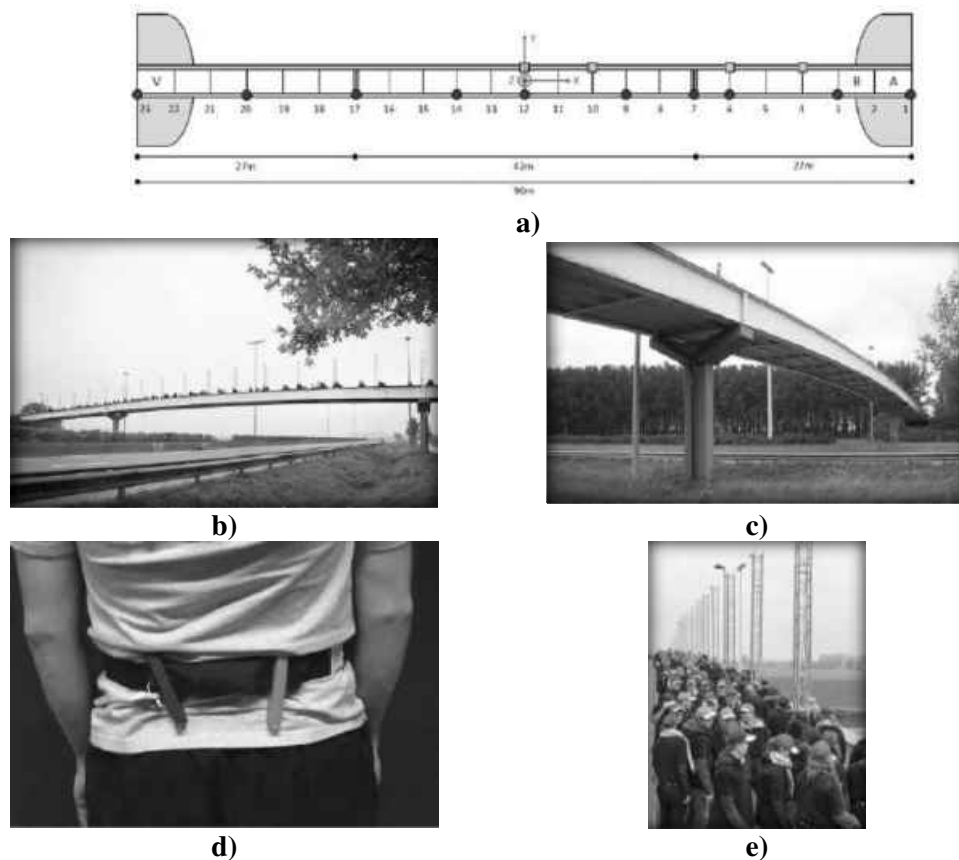


Figura 8. Puente peatonal Eeklo [163]; a) Esquema vista superior puente Eeklo; b) Fotografía lateral; c) Fotografía lateral de viga de carga principal; d) Sensor inercial y marcadores; e) Prueba de carga antrópica por multitud.

Otra metodología que se destaca para abordar el análisis de los efectos “*Lock-In*” en estructuras civiles, es la constituida por pruebas controladas en laboratorio sobre plataformas instrumentadas. Uno de los primeros trabajos realizados y quizás uno de los más referenciados en futuros estudios fue el realizado por Reiher and Meister en 1931 [164]. Ellos investigaron los efectos de las vibraciones armónicas sobre 10 personas en diferentes posturas sobre una plataforma a diferentes amplitudes, frecuencias y dirección de amplitud. Como resultado de ello clasificaron la percepción humana en seis categorías y como una función de la amplitud de la vibración y la frecuencia. Luego, Lippert et. al. en [144] desarrollaron una serie de estudios enfocados en los efectos de las vibraciones verticales, evaluando las respuestas humanas ante un movimiento vertical sinusoidal con frecuencias entre 0.10-256 Hz y amplitudes entre 0.03-100 pulgadas. Posteriormente, Ebrahimpour et. al. en [165], [166] midieron las fuerzas dinámicas generadas por los ocupantes en tránsito utilizando una plataforma de fuerza instrumentada. Las pruebas consistieron en varios conjuntos de marcha de un peatón, dos peatones y cuatro peatones; utilizando una plataforma de fuerzas instrumentada con seis placas de fuerza de nido de abeja independiente.

La incursión en Europa de los efectos de la IHE en puentes peatonales, luego de los sucesos ocurridos en el puente Millennium y del trabajo realizado por Zivanovic en [35], trajo consigo el interés de la comunidad científica por posicionar estos fenómenos de vibraciones como uno de los temas más relevantes a nivel estructural. Este desencadenamiento en masa de conocimiento condujo a Europa a un proyecto interdisciplinar e intracontinental conocido como SYNPEX [126], [127], [167] el cual abordó desde diferentes puntos de vista y conocimiento avances relacionados con las vibraciones producto de los efectos de IHE en infraestructura civil. De este programa de investigación a gran escala resultaron investigaciones como la realizada por Nakamura et. al en 2008 en [168] para 5.0 sujetos de prueba, la cual consistió en desplazamientos entre 10.0-70.0 mm con frecuencias entre 0.75-1.25 Hz . El montaje utilizado puede verse esquemática y visualmente en Fig. 9.

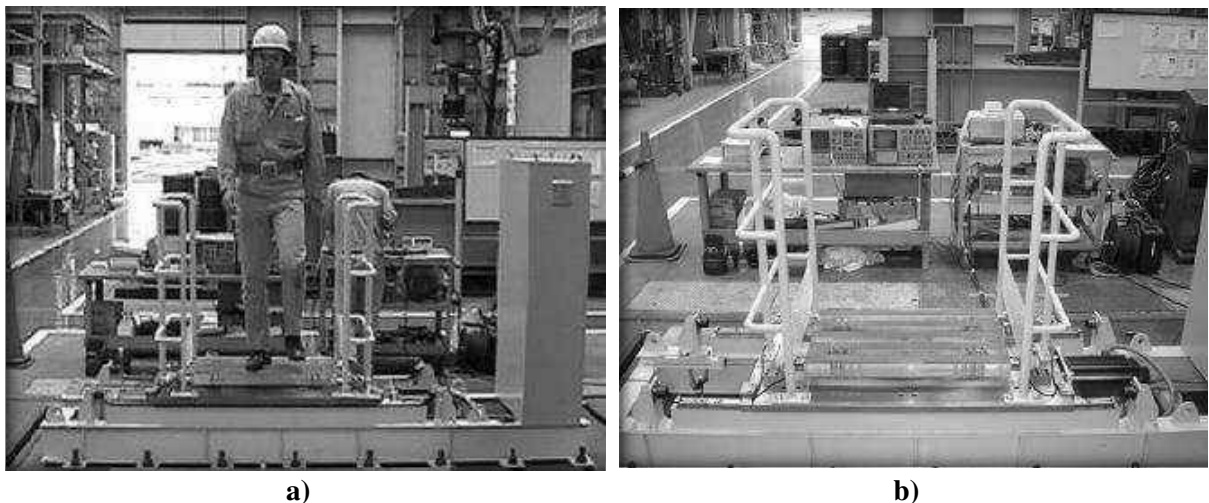


Figura 9. Estudio experimental de fuerzas laterales inducidas por peatones [168]; **a)** Montaje experimental durante el ensayo; **b)** montaje experimental antes de ensayo.

Otra de las investigaciones relacionadas con el uso de caminadoras instrumentadas es la realizada por Ingólfsson et. al. en [69], [98] en el 2011, basándose en el montaje experimental publicado por Pizzimenti et al. en [169], mostrado en Fig. 10. En este trabajo se analiza experimentalmente las fuerzas laterales generadas por peatones individuales cuando marchan continuamente sobre una caminadora instrumentada. Inicialmente fue ajustada la caminadora a una estructura de soporte para ejercer un movimiento lateral sinusoidal con una combinación variable de frecuencias $0.33 \rightarrow 1.07 \text{ Hz}$ y amplitudes $4.50 \rightarrow 48.00 \text{ mm}$. En este estudio experimental se involucraron 71 hombres y mujeres adultos, cubriendo aproximadamente 55 km de información de marcha distribuidos en 4954 paquetes de pruebas individuales.

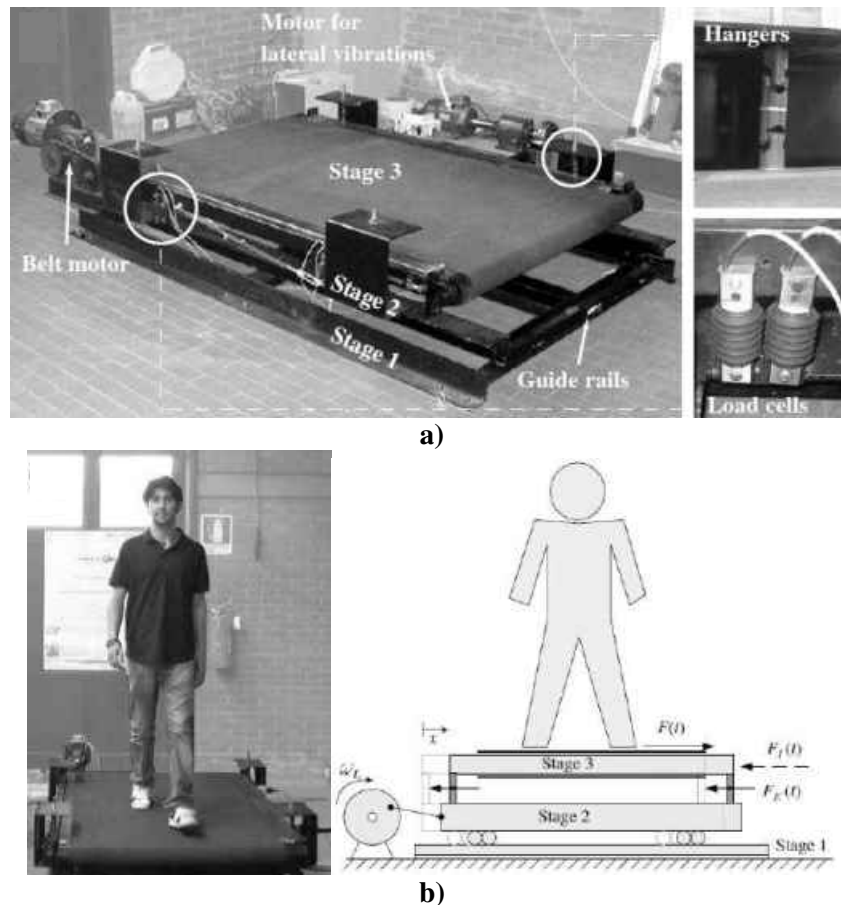


Figura 10. Figura 16. Montaje experimental Ingólfsson et al. [69], [98]; **a)** Descripción de componentes del sistema experimental; **b)** Vista esquemática del montaje experimental y en operación.

Carroll et al. en 2013 [64], realizó un montaje experimental similar al realizado por Pizzimenti et al. en [169], como se muestra en la Fig. 11. El objetivo de esta investigación fue realizar una campaña de pruebas experimentales para la observación de sujetos marchando sobre una caminadora instrumentada que oscilaba lateralmente. Para ello, se utilizó un sistema de cámaras de captura de movimiento tridimensional para localizar la posición de 31 marcadores activos, colocados en los puntos estratégicos del cuerpo de los sujetos de prueba; con el fin de emplear la teoría de dinámica inversa para reproducir las GFR y validar con las adquiridas del montaje experimental.

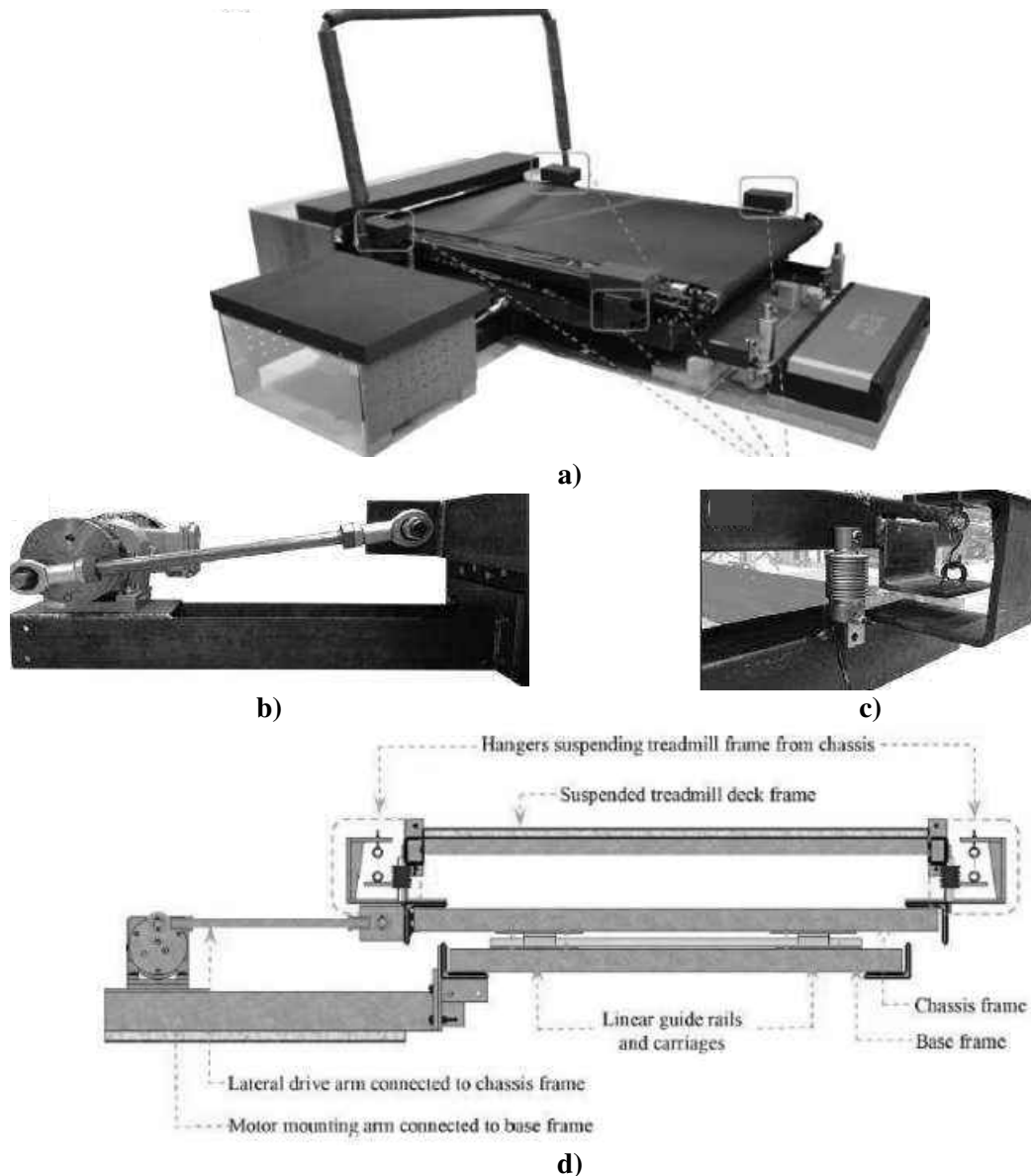
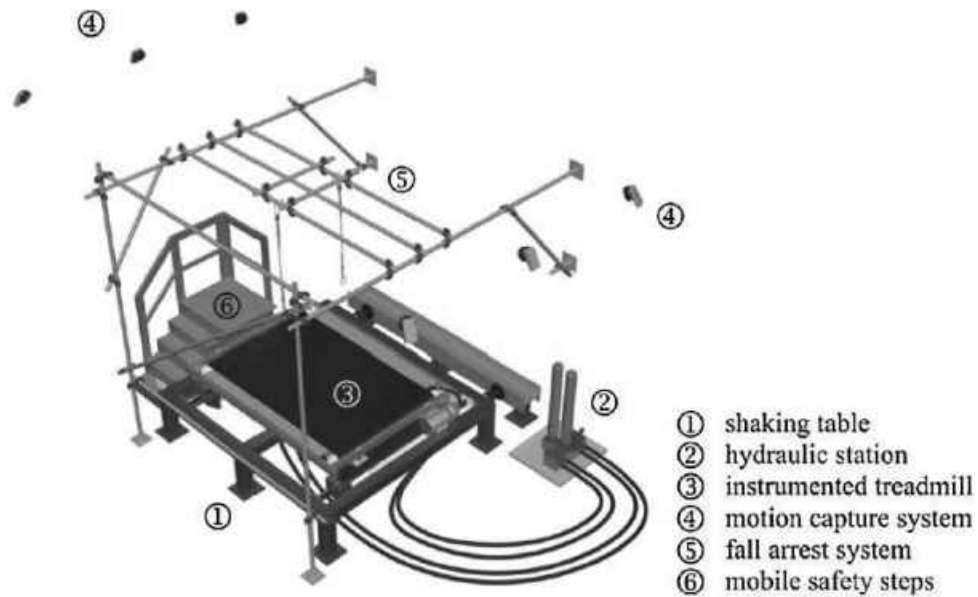


Figura 11. Montaje experimental Carroll et. al. [64]; **a)** Vista tridimensional del montaje experimental; **b)** Sistema de movimiento sinusoidal lateral; **c)** sistema de medición de carga vertical y lateral; **d)** descripción de los componentes del sistema experimental lateral.

Algunos investigadores exponen su preocupación por el condicionamiento que se puede presentar en la forma de marcha humana debido a las condiciones mismas de los laboratorios, entre ellos se encuentra Bocian et. al [60], [81], [170], [171], quienes alrededor de 2015 presentaron un novedoso montaje experimental desarrollado para evaluar la incidencia en el comportamiento de la marcha de los peatones cuando estos son sometidos a movimientos oscilatorios laterales y a su vez cuantificar su acción sobre la estructura en un entorno de laboratorio, evitando las implicaciones de la artificialidad y permitiendo una marcha sin restricciones. Lo anterior se realizó, mediante la articulación de tecnologías de visión artificial, con lo que se adoptó un enfoque de inspiración biológica, basado en la apreciación de las

complejidades operativas de los sistemas biológicos, en particular su adaptabilidad y requisitos de control natural. En la Fig. 12 se expone un esquema del montaje utilizado y una ilustración del montaje experimental en operación en la Universidad de Bristol.



a)



b)

Figura 12. Figura 18. Montaje experimental Bocian et al. [60], [81], [170], [171]; **a)** Esquema de montaje experimental; **b)** Ilustración de montaje experimental en operación.

Uno de los estudios más recientes enfocados al uso de caminadoras instrumentadas fue realizado por Haowen et. al. en [78]. En esta investigación se realizaron test experimentales con sujetos marchando sobre una caminadora excitada lateralmente mediante una mesa vibratoria, con un montaje basado en el propuesto por Pizzimenti et a. en [169], Fig. 13. Mostrando en los resultados la influencia de los efectos de IHE en el comportamiento de la marcha de los sujetos, lo que permitió una retroalimentación y validación de los modelos de péndulo invertido propuestos en esta misma investigación.

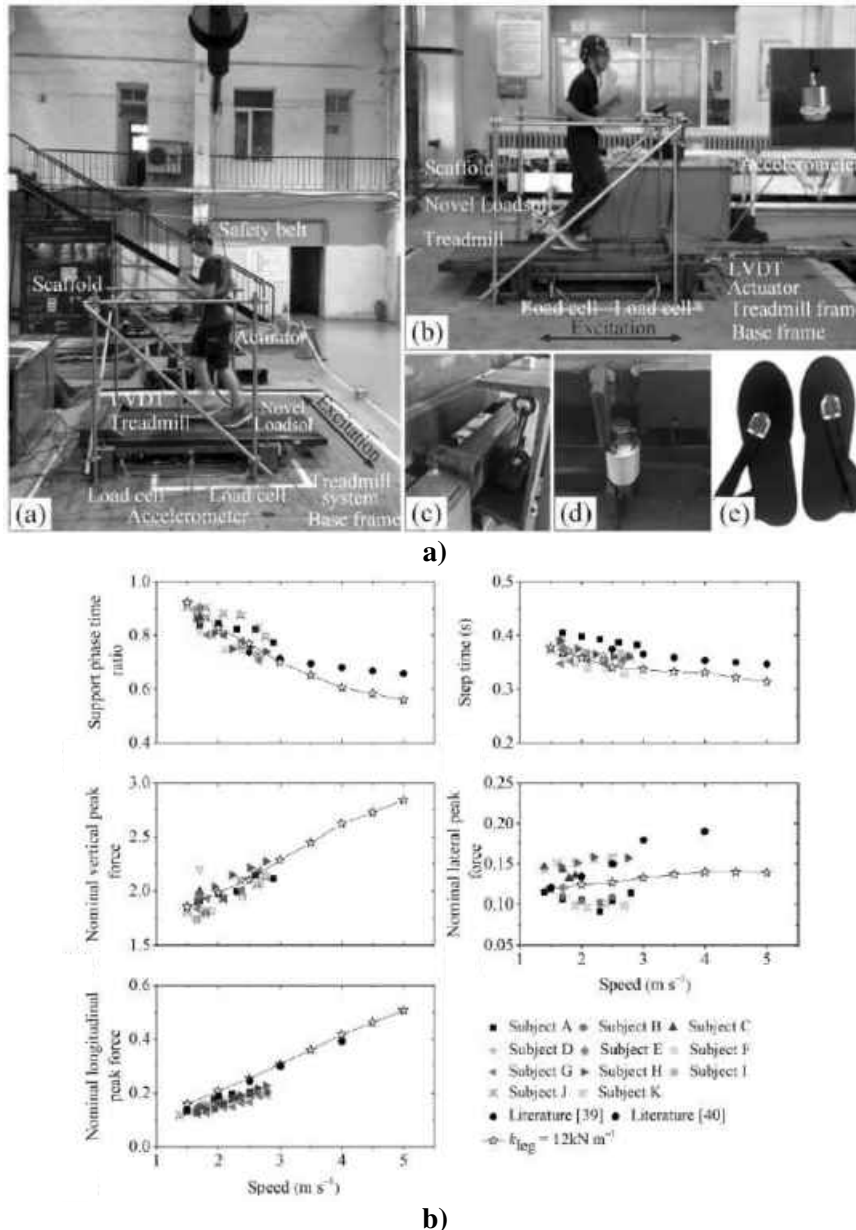


Figura 13. Montaje experimental Haowen et. al. [78]; **a)** Descripción montaje experimental a. Lateral, b. Longitudinal, c. sistema de celdas de carga vertical, d. sistema de celdas de carga Lateral, e. plantillas de adquisición de carga antrópica marca: Novel Loadsol; **b)** Resultados experimentales de marcha de sujetos de prueba.

Capítulo 3. Montaje Experimental

Con el objetivo de estudiar los efectos cinéticos sobre la marcha humana de superficies con movimiento armónico lateral fue necesario el desarrollo de un montaje experimental que permitiera tres condiciones principales: repetitividad de la actividad de marcha humana para la evaluación de su naturaleza estocástica, incidencia de movimiento lateral neta sobre los sujetos de prueba y adquisición de las cargas antrópicas generadas. Estas características se encuentran aleatoriamente presentes en los montajes realizados por Nakamura et. al en [168], Ingólfsson et. al. en [69], [98], Pizzimenti et al. en [169], Carroll et al. en [64], Bocian et. al [60], [81], [170], [171], y más recientemente, Haowen et. al. en [78]. Sin embargo, ninguna de estas investigaciones realizó una configuración biaxial para la evaluación lateral y vertical de las superficies flexibles sobre la marcha humana como se desarrolló en esta investigación.

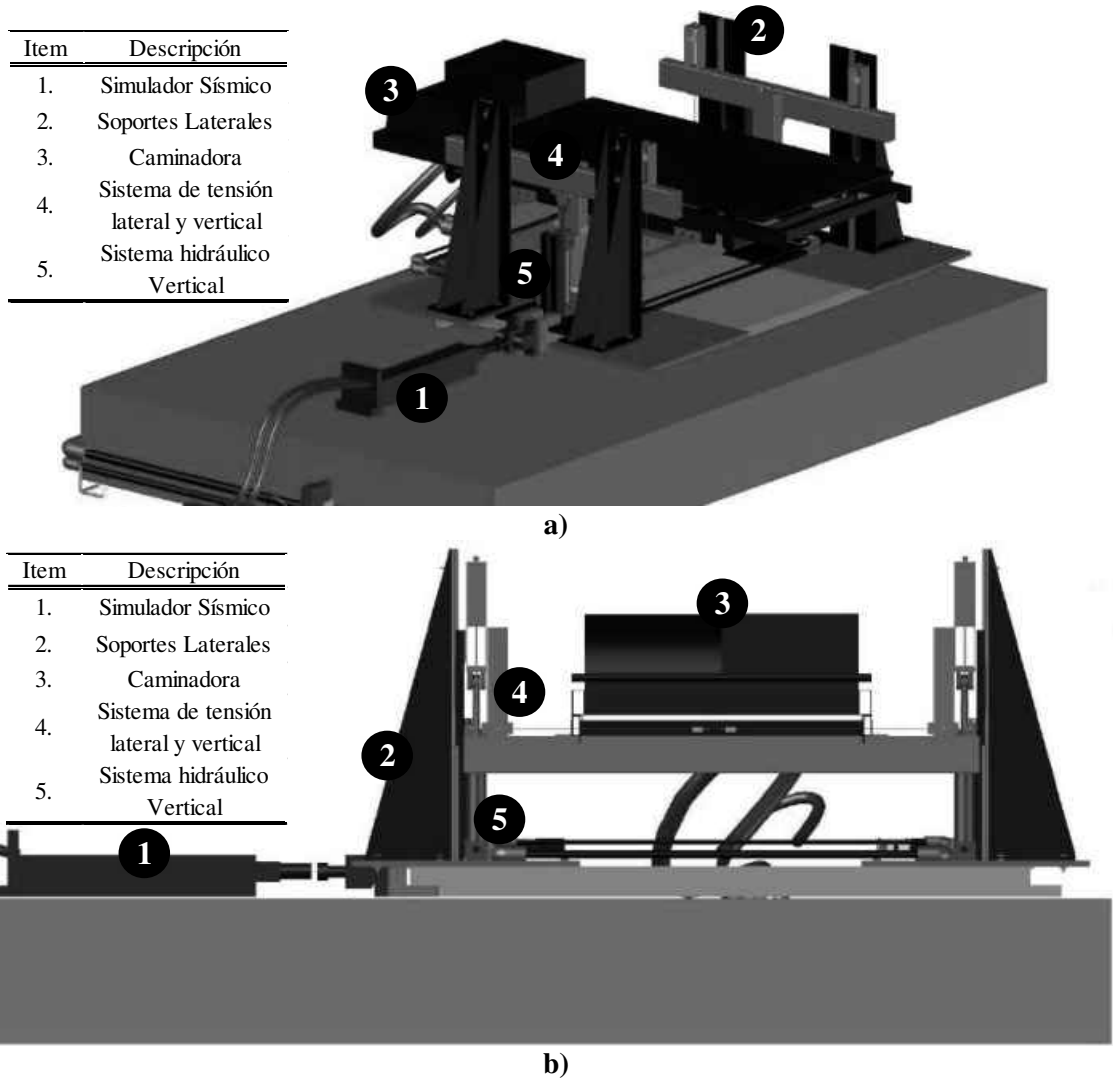
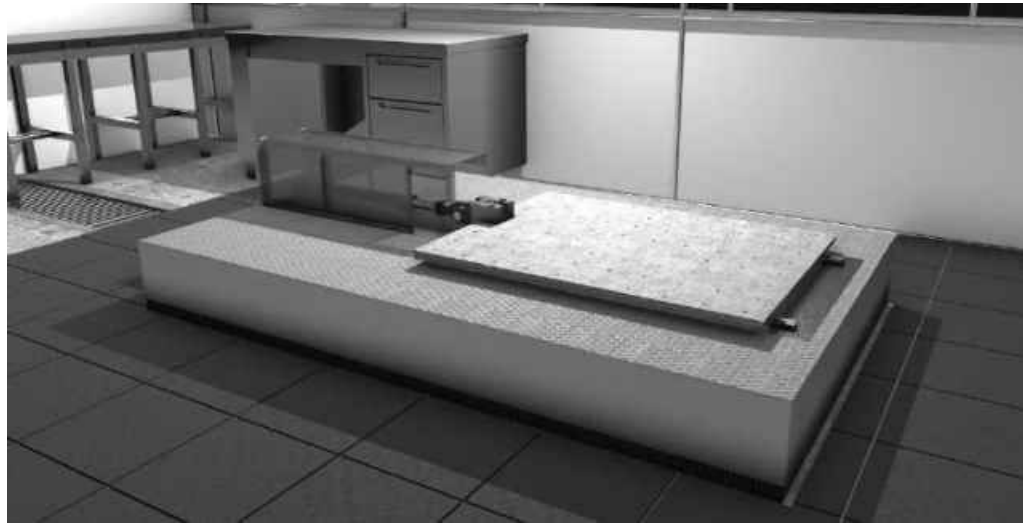


Figura 14. Montaje experimental; *a)* Vista isométrica; *b)* vista frontal.

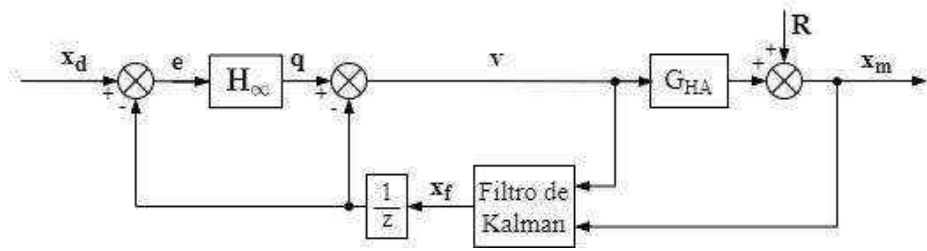
El montaje experimental desarrollado denominado *Marco Experimental de Interacción Humano-Estructura* (ME-IHE), mostrado esquemáticamente en la Fig. 14, se encuentra compuesto principalmente por cinco partes fundamentales: Simulador sísmico unidireccional de la Universidad del Valle, sistema de soportes laterales, caminadora de banda de 72x150 cm, sistema de adquisición de cargas generadas y un sistema hidráulico para la dirección vertical. Los planos de construcción, montaje y modificaciones de este montaje son presentados en el *ANEXO No.1*. A continuación, se detallan cada uno de estos cinco componentes principales.

3.1 Componentes del MPE-IHE.

3.1.1 Simulador sísmico uniaxial



a)



b)

Figura 15. Simulador Sísmico de la EICG-Universidad del Valle; **a)** Esquemático; **b)** Bucla de control

El simulador sísmico unidireccional de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática (EICG) de la Universidad del Valle se encuentra compuesto por una placa de aluminio de 1.10x1.50 m direccionada por rieles lineales de baja fricción y acoplada a un actuador hidráulico de 45 kN. Este actuador posee dos Servo-Válvulas *DyVal* con capacidad de 15.00 gpm, cada una, y conectadas a un potencial hidráulico de hasta 15.50 gpm a 3000 psi. Adicionalmente, cuenta con un transductor diferencial variable lineal (LVDT) interno que instrumenta la posición del vástago del actuador. Trabajos recientes en el Grupo de Investigación de Ingeniería Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G7) han permitido la identificación de este sistema mediante

ensayos de barridos de frecuencia de $0.10 \rightarrow 20.0 \text{ Hz}$, con duración de 250 s y amplitudes constantes de $0.50, 1.00, 3.00$ y 5.00 mm ; encontrando una representación de la planta G_{HA} del simulador sísmico, descrita en (1), como un sistema continuo con un polo en el origen, una ganancia nominal de 14.0 y un retardo en el tiempo de 33 ms .

$$G_{HA} = \frac{14}{s} e^{-0.033s} \quad (1)$$

Este simulador sísmico se encuentra implementado con un controlador robusto tipo H_∞ de seguimiento por desplazamiento, acondicionando un *Filtro de Kalman* para disminuir el porcentaje de ruido presente en la señal a partir de una estimación de respuesta, como se muestra en la Fig. 15b. Lo anterior constituye un sistema robusto con la capacidad de imponer desplazamiento a diferentes amplitudes y frecuencias, con una alta precisión.

3.1.2 Sistema de soportes.

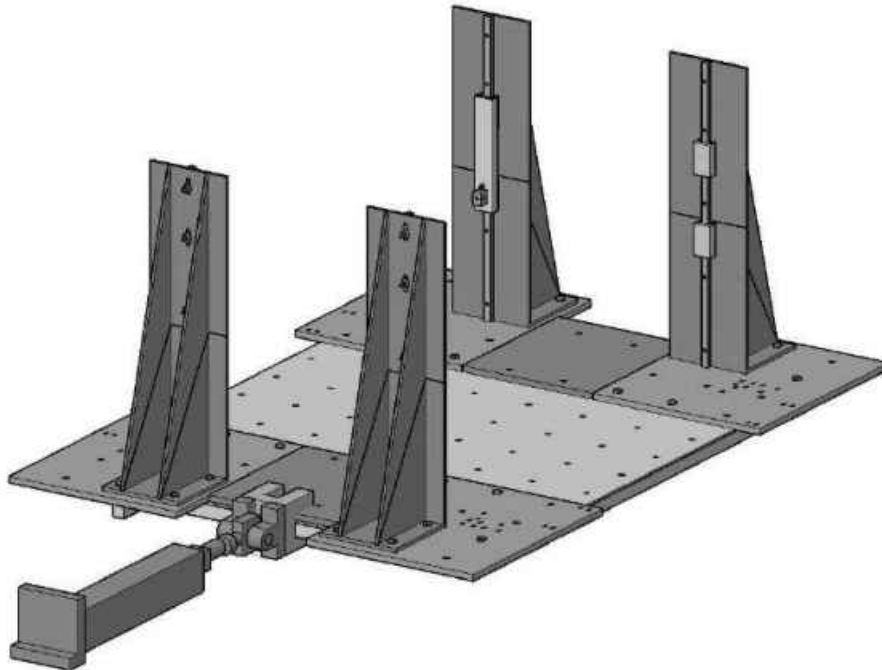


Figura 16. Sistema de soportes laterales.

El sistema de soporte lateral, mostrado en Fig.16, se conforma inicialmente de cuatro platinas de acero A36 de 0.50 in de espesor, las cuales tienen la finalidad de aumentar el área de trabajo de la placa del simulador sísmico. Sobre estas platinas se disponen cuatro soportes tipo “*pie de amigo*” de 740 cm de altura, aproximadamente, que acoplan las guías de los ejes lineales verticales del sistema; además, cumplen con su función principal de transmitir las cargas antrópicas una vez son adquiridas por el sistema de adquisición de cargas laterales. El acoplamiento y construcción de este sistema de soporte se encuentra detallado en el ANEXO No.1.

3.1.3 Caminadora o Treadmill.

Para esta investigación se utilizó una caminadora o *Treadmill* (traducción al inglés y término más ampliamente conocido en la literatura) *SOLE F65*, la Fig.17a corresponde a la imagen publicada por el proveedor, la cual posee un área de acción efectiva de $72 \times 150 \text{ cm}$ y velocidades de operación de $0.5 \rightarrow 10.0 \text{ m/s}$. El movimiento de avance es generado por un motor comercial de 120.0 V controlado mediante el hardware de fábrica mediante un *encoder* para la cuantificación de giros. Esta caminadora fue modificada con el fin de ser compactada la parte superior y acoplarse así al sistema del ME-IHE, como se muestra en Fig.17b y se describe su funcionamiento integral en la sección 3.3.

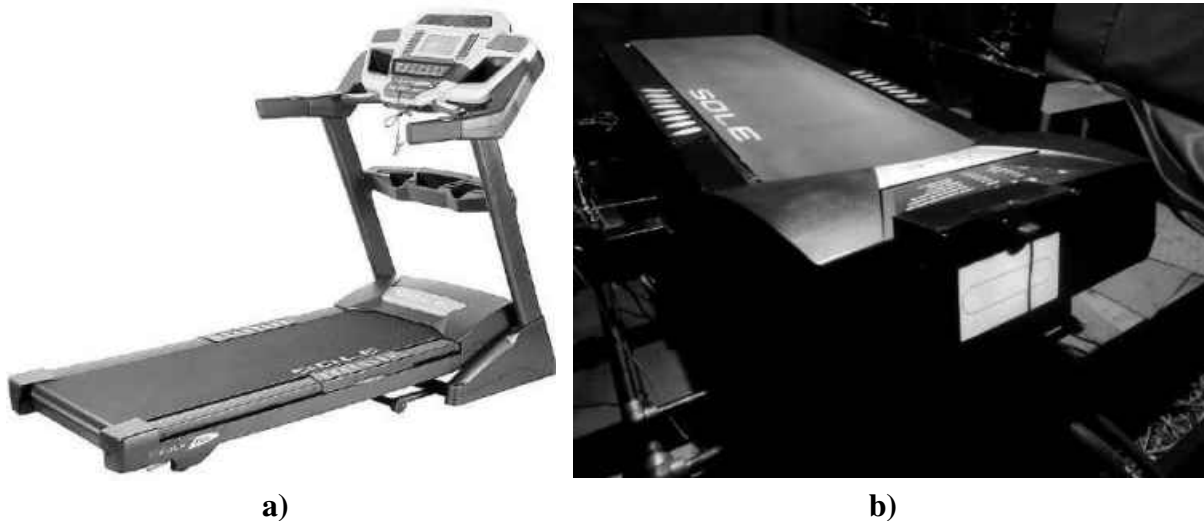


Figura 17. Caminadora SOLE F63; **a)** Imagen comercial de Caminadora SOLE-F63; **b)** Caminadora SOLE-F63 modificada.

3.1.4 Sistema de adquisición de cargas.

El sistema de adquisición de cargas fue desarrollado con el objetivo de cuantificar las solicitaciones antrópicas laterales, verticales y longitudinales inducidas por la marcha humana. La componente de adquisición lateral se compone de un hilo de acero de $\varnothing 1/16 \text{ in}$, con una carga última de 400 kg-f , adosado al sistema de soporte lateral sobre los ejes lineales y a la parte baja de la caminadora mediante cuatro celdas de carga *DYLY-103* con capacidad de 200 Kg de forma individual. De igual manera, la componente de adquisición longitudinal se dispone con el mismo hilo de acero anterior, adosado a las partes más extremas del sistema de suspensión vertical y al sistema de soporte lateral mediante cuatro celdas de carga *DYLY-102* con capacidad de 50 Kg cada una. Finalmente, el componente de adquisición vertical se conformó de un hilo de acero de $\varnothing 1/8 \text{ in}$, con una carga última de 1.0 ton-f , adosado al sistema de soporte lateral sobre los ejes lineales y al sistema de suspensión vertical mediante cuatro celdas de carga *Omega LC703* con capacidad de 200 lb-f cada una. En las Fig. 18a→c se encuentran las celdas de carga utilizadas, las Fig. 18d→e muestran el montaje experimental y la Fig. 18f muestra un esquemático del sistema de adquisición de cargas.

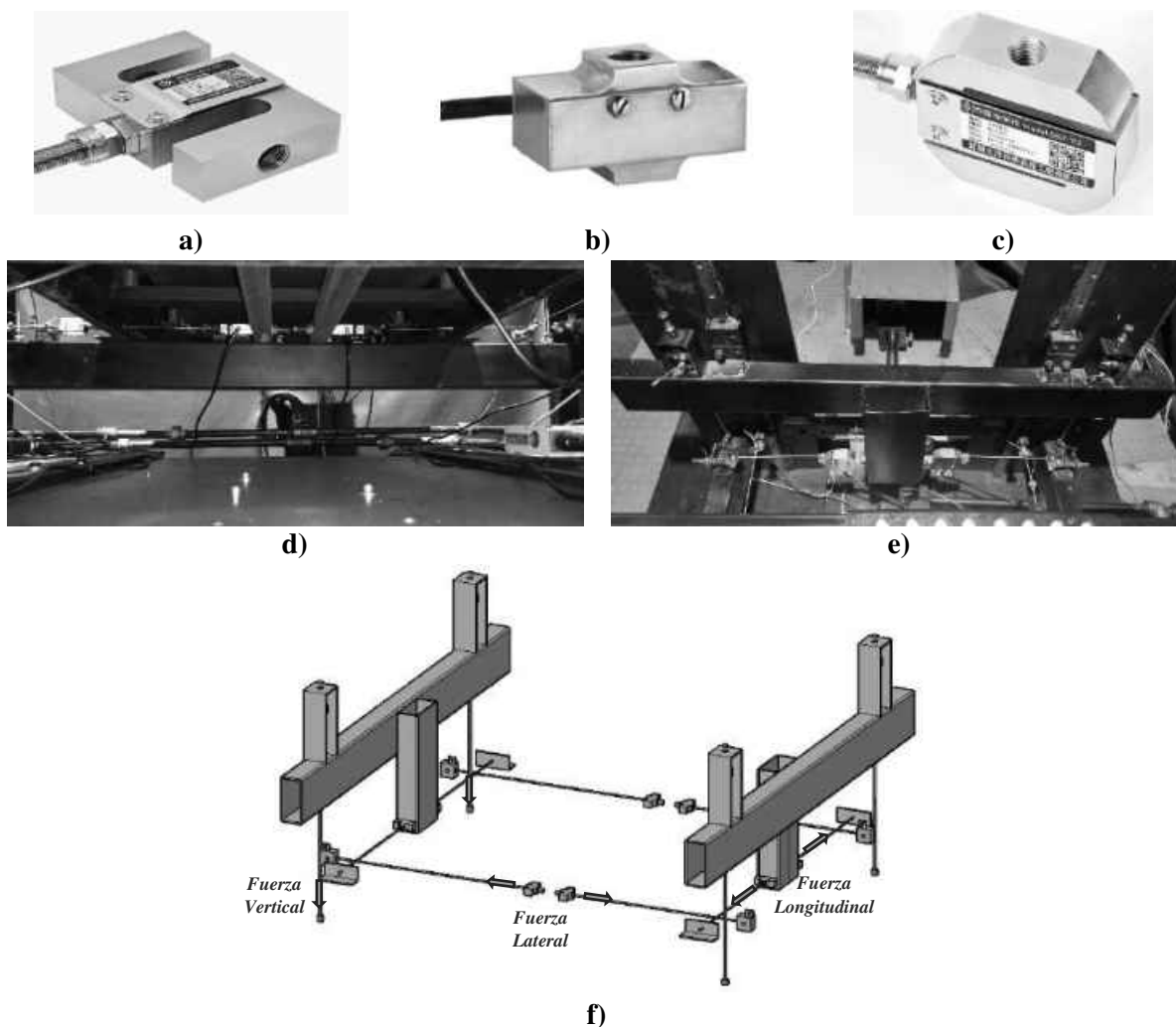


Figura 18. Sistema de adquisición de carga; **a)** Celda DYLY-102 200 kg-f; **b)** Celda Omega LC703-200 lb-f; **c)** Celda DYLY-102 50 kg-f; **d)** Celdas laterales montaje experimental; **e)** Celdas longitudinales y verticales montaje experimental; **f)** Esquemático montaje experimental.

3.1.5 Sistema hidráulico vertical.

El sistema hidráulico vertical se encuentra unido al sistema de potencia hidráulica de la EICG, se compone por una válvula manual *EQUUS*, para la reducción de presión, y dos módulos de carga idénticos. Cada uno de estos módulos, Fig.19, se conforman de un cilindro hidráulico de doble efecto con un recorrido de ± 7.5 cm y un diámetro interno del pistón de 1.0 in, una servoválvula proporcional *EATON AxisPro-KBS*, un transductor lineal de posición de 20.0 cm y un transductor de presión de hasta 4000 psi. Este novedoso componente vertical que conforma el ME-IHE lo posiciona como uno de los primeros desarrollos experimentales en la literatura para la evaluación multiaxial de las cargas inducidas por la actividad humana, especialmente enfocado en esta investigación a los efectos generados sobre la marcha humana de superficies con movimiento armónico. La conexión y ensamble de este componente se encuentra descrito detalladamente en el ANEXO No.1.

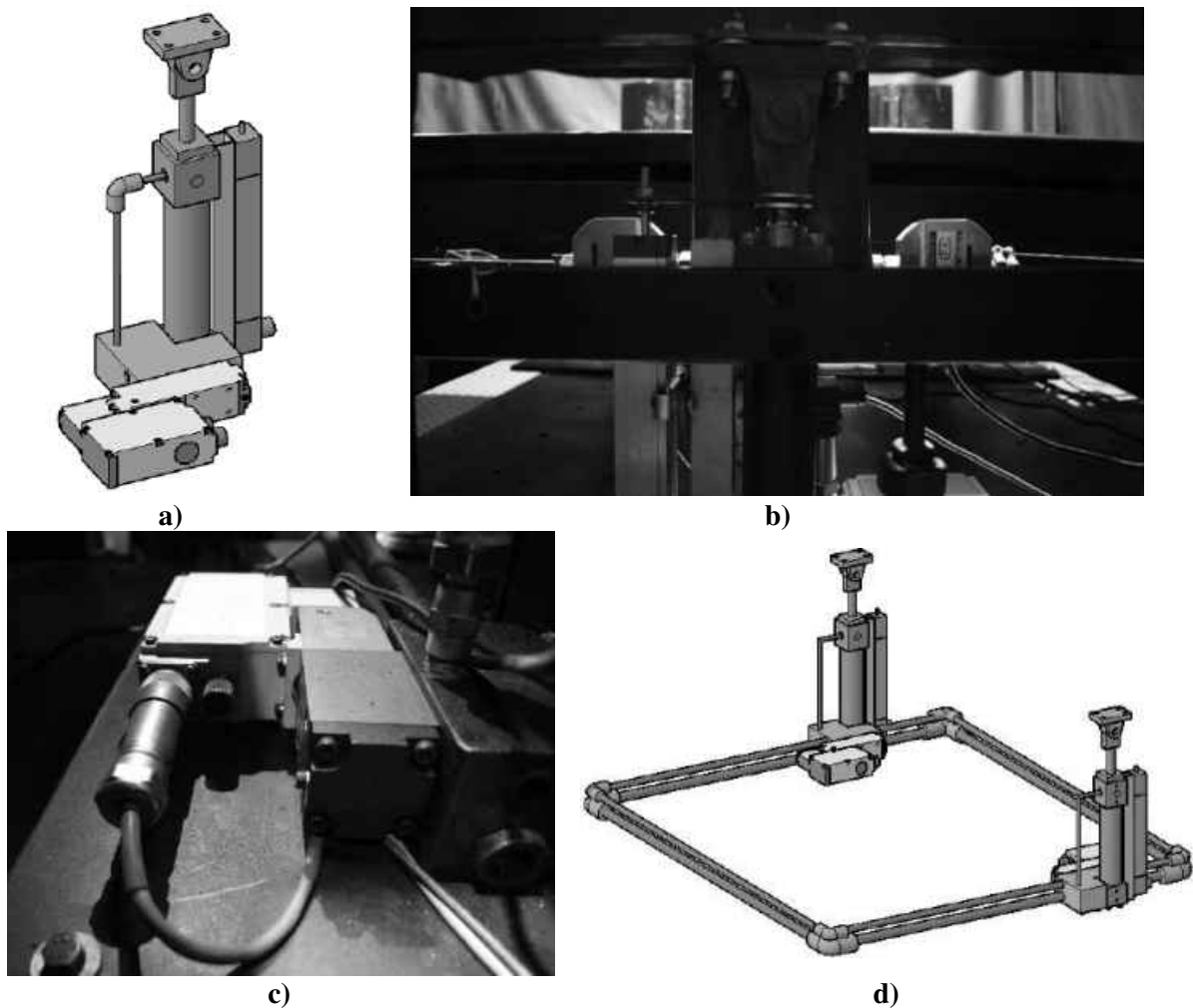


Figura 19. Sistema hidráulico vertical; **a)** Esquemático de un módulo de carga; **b)** Montaje experimental de Modulo de carga; **c)** Servoválvula KBS y Sensor de presión en montaje experimental; **d)** esquemático parcial de sistema hidráulico.

3.2 Evaluación numérica

Una de las restricciones fundamentales para este tipo de montajes, que tienen por objetivo evaluar las cargas antrópicas, es la no incidencia directa o indirecta de su dinámica natural en los resultados de las pruebas experimentales. Con el fin de evaluar estas condiciones de sensibilidad dinámica se modeló el sistema de soporte lateral y el sistema hidráulico vertical en el software *SolidWorks* debido a que son los de mayor aporte a la masa y rigidez del sistema. Inicialmente se definieron las restricciones y movimientos acordes al sistema experimental planteado, y posteriormente, se le asignó una malla sólida basada en curvatura para su análisis. La respuesta simulada del montaje experimental determinó una dinámica asociada a frecuencias entre 232.0→267.1 Hz, para los cinco primeros modos de vibración Fig.20, corroborando que el montaje experimental se encuentra lejos de afectar las condiciones dinámicas de la evaluación de la marcha humana.

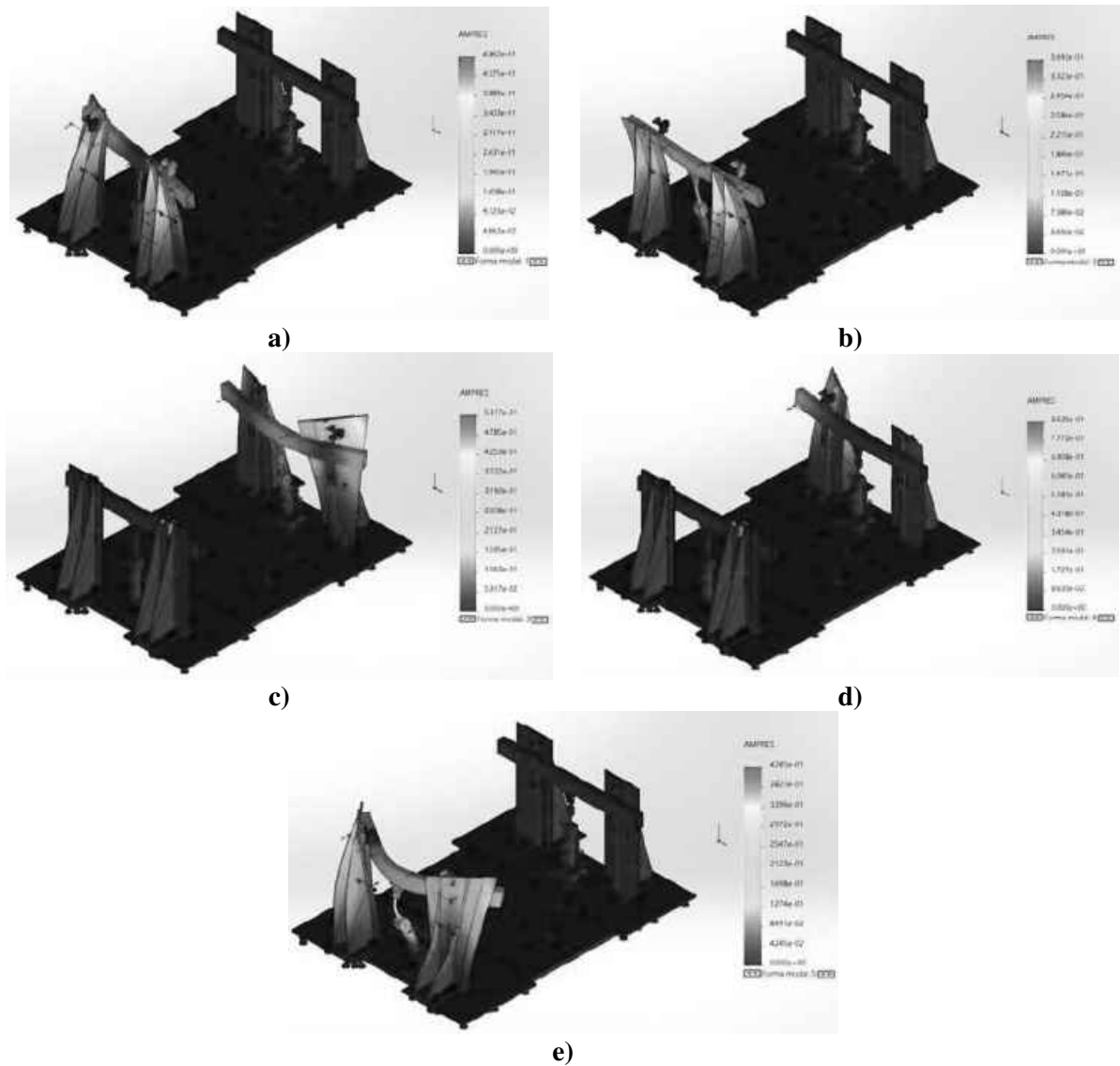
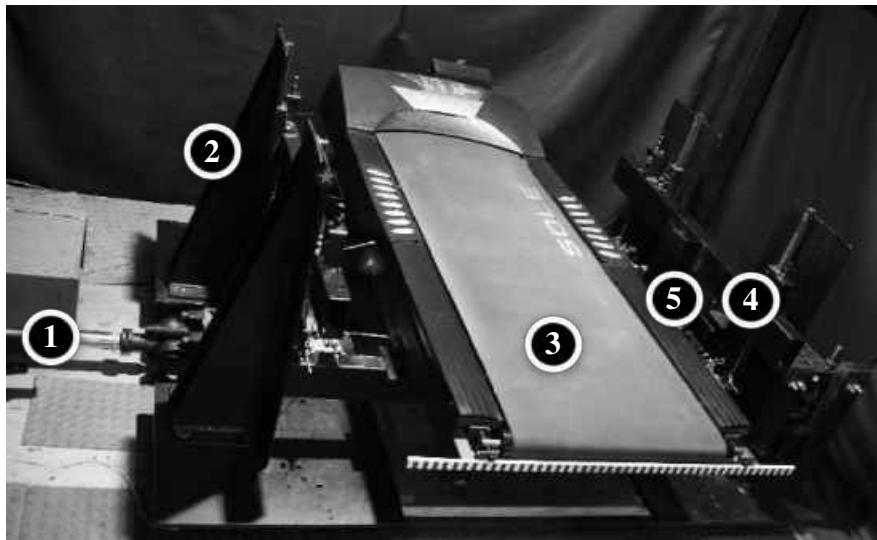


Figura 20. Dinámica montaje estructural; a) Modo No.1→232.4 Hz; b) Modo No.2→234.4 Hz; c) Modo No.3→244.16 Hz; d) Modo No.4→255.5 Hz; 5) Modo No.5→267.1 Hz;

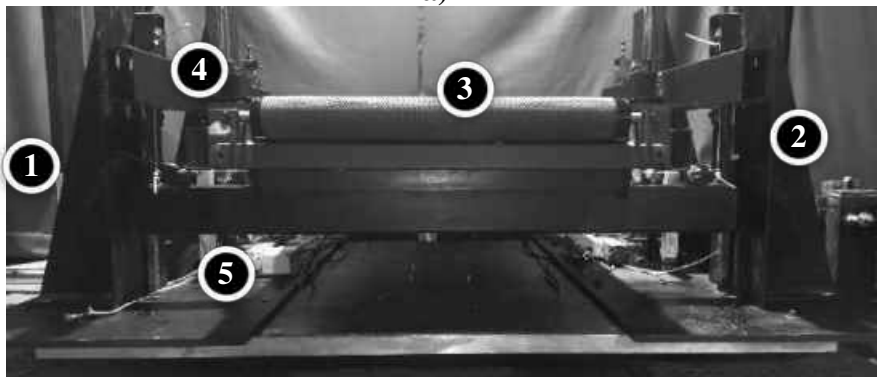
3.3 Implementación Experimental e Instrumentación.

Luego de diseñar y verificar analíticamente la funcionalidad dinámica del ME-IHE, se procedió a la etapa de construcción del prototipo experimental, según el diseño estructural y modificaciones planteadas en el *ANEXO No.1*. Debido a que este montaje se sustenta sobre el simulador sísmico de la EICG, y lo inhabilita, es imprescindible disminuir los tiempos de instalación/desmonte para minimizar los costos indirectos generados, los cuales se encuentran alrededor de 7.0 días hábiles para cada actividad con una cuadrilla de dos oficiales calificados en procesos mecánicos e hidráulicos. Lo anterior, permitió al Grupo de investigación G7 la constitución del ME-IHE tal como se muestra en la Fig. 21.



a)

Item	Descripción
1.	Simulador Sísmico
2.	Soportes Laterales
3.	Caminadora
4.	Sistema de tensión lateral y vertical
5.	Sistema hidráulico Vertical



b)

Item	Descripción
1.	Simulador Sísmico
2.	Soportes Laterales
3.	Caminadora
4.	Sistema de tensión lateral y vertical
5.	Sistema hidráulico Vertical

Figura 21. Montaje experimental construido; a) Vista isométrica; b) Vista frontal

El sistema de instrumentación y control del ME-IHE se desarrolló bajo el acompañamiento del equipo electrónico del Grupo de investigación G7. Inicialmente, se dispuso un equipo de computo con un procesador *Intel i7*, 16 GB de memoria RAM y una tarjeta de adquisición *National Instruments PCI-6229*, para configurar el equipo de adquisición de señales. Luego, se desarrolló el *Tablero Electrónico de Conexiones* (TEC), detallado en el ANEXO No.1 su manual de instalación, con el objetivo de acoplar el equipo de adquisición, el sistema de control de funcionamiento de la caminadora compactada, el sistema de alimentación de sensores y los sensores de adquisición de señales. Estos últimos, en este prototipo experimental, corresponde a 16 celdas de carga de tres tipos descritas en la sección 3.1.4, 1 LVDT para el control del simulador sísmico de la EICG, 2 transductores de posición lineales, 2 transductores de presión lineales, 4 acelerómetros lineales y 4 salidas análogas para el control de servoválvulas (2 *DyVal* y 2 *Eaton-AxisPro*). Adicionalmente, el sistema de alimentación de sensores se conforma de 4 fuentes de alimentación para instrumentación de 5V, 12V y 24V, algunas de ellas duplicadas para generar el efecto dual requerido por el sensor de adquisición de señal. El TEC desarrollado se muestra en la Fig. 22.

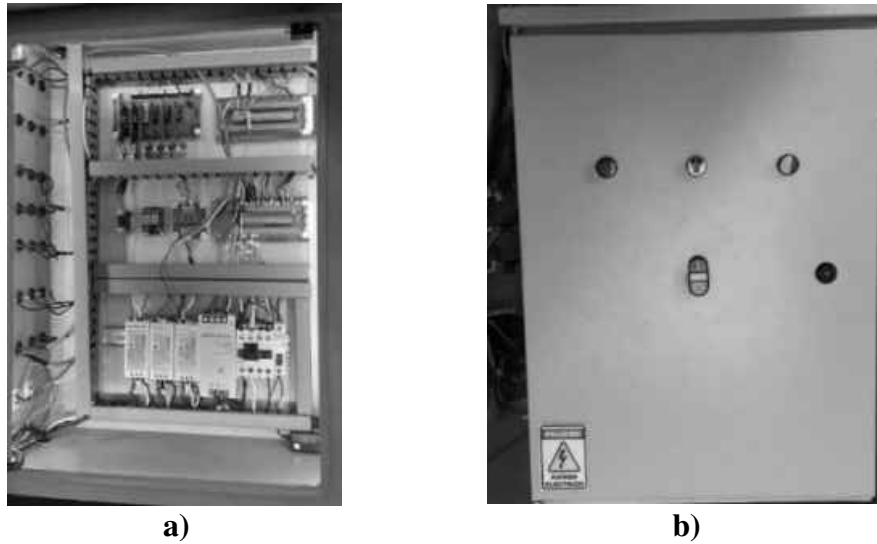


Figura 22. Tablero Electrónico de Conexiones de ME-IHE.

3.4 Pruebas Experimentales sobre ME-IHE.

Una vez culminadas las etapas de montaje e instrumentación del ME-IHE se realizó un proceso de caracterización lateral de la transmisibilidad de la dinámica entre el simulador sísmico, la caminadora y el sistema de soporte lateral. Para ello, se tomaron tres puntos de control sobre el montaje experimental: el primero en la base {♦} para el simulador sísmico, el segundo {▲} sobre el costado de la caminadora y el último sobre uno de los pedestales del sistema de soporte lateral {★}; tal como se muestra en la Fig. 21a. En cada punto de control, se implementó un acelerador ENDEVCO modelo 752A13, con su respectivo acondicionador de señal, mostrados en al Fig.23. Se realizaron cuatro barridos de frecuencia de $0.1 \rightarrow 3.0 \text{ Hz}$ con desplazamientos variables de $1.0 \rightarrow 5.0 \text{ mm}$.

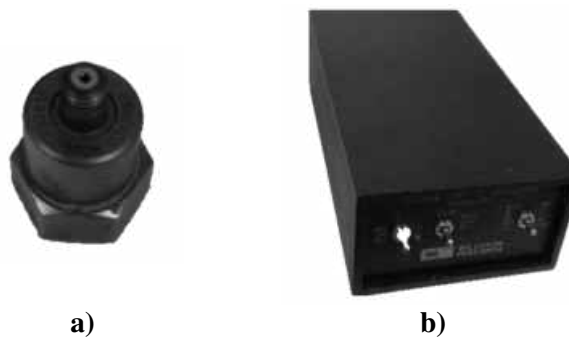


Figura 23. Acelerómetro; a) Acelerómetro ENDEVCO; b) Módulo de acondicionamiento de señal.

El primer análisis comprendió los datos en aceleración obtenidos de los puntos de control en la base y del costado de la caminadora para los cuatro barridos realizados, Fig.24. Estos datos, se analizaron en el dominio de frecuencia determinando mediante una función de transmisibilidad que la amplificación (en dB) y el desfase (ángulo en $^{\circ}$) entre estos dos puntos fue mínimo, Fig. 25.

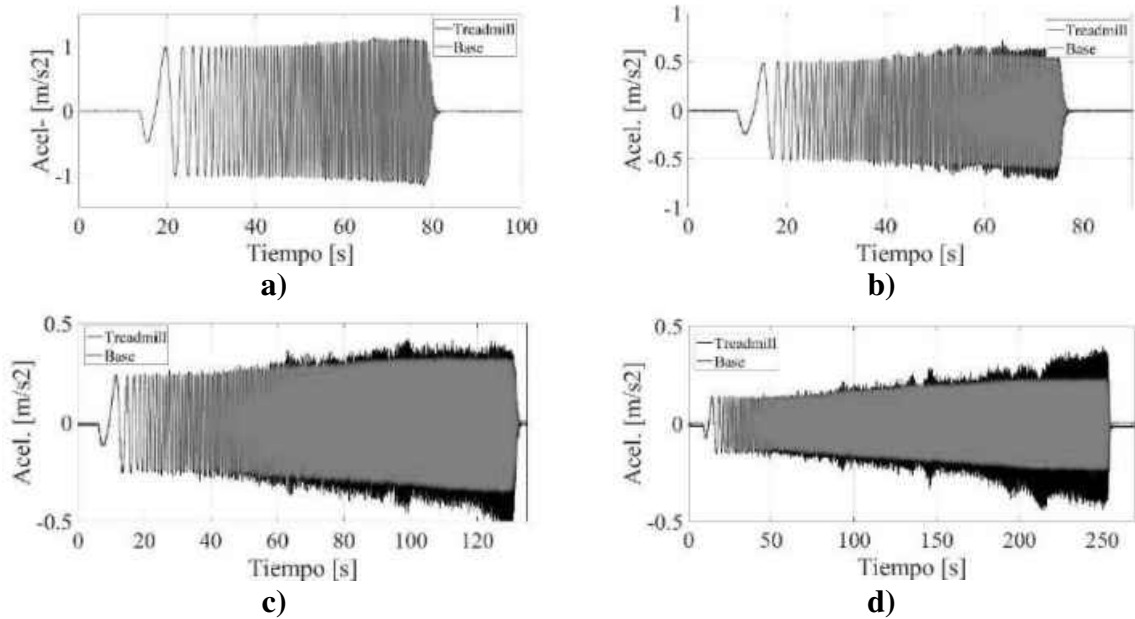


Figura 24. Barridos lineales 0.1→3.0 Hz de la Base→Treadmill con desplazamiento variable 1.0→5.0 mm; **a)** Barrido No.1; **b)** Barrido No.2; **c)** Barrido No.3; **d)** Barrido No.4.

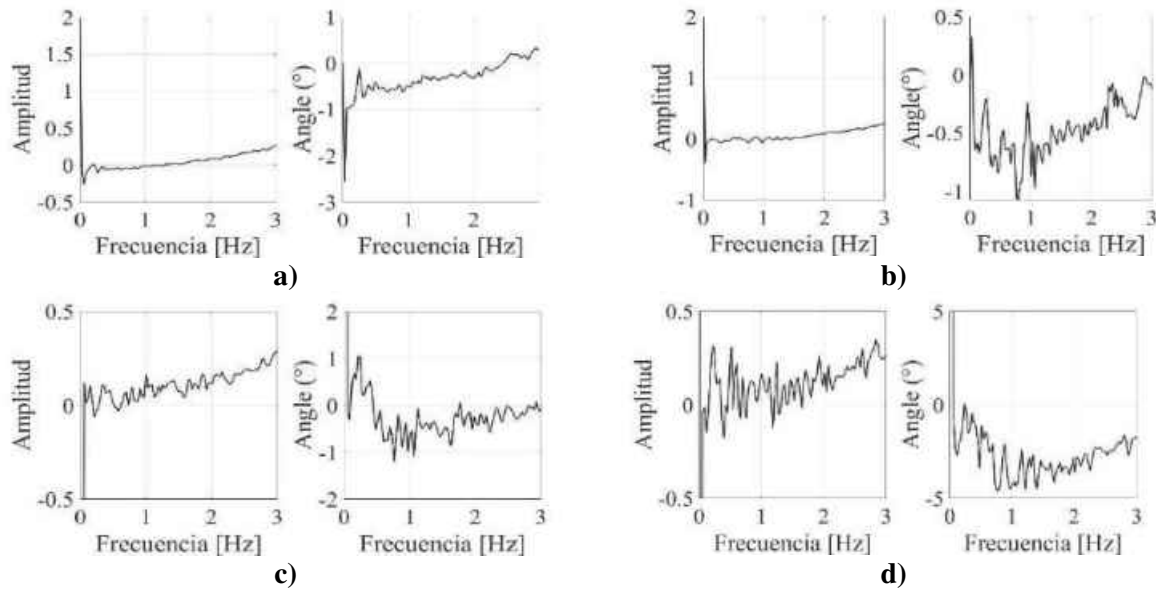


Figura 25. Transmisibilidad Base→Treadmill; **a)** Barrido No.1; **b)** Barrido No.2; **c)** Barrido No.3; **d)** Barrido No.4.

El segundo análisis comprendió los datos en aceleración obtenidos de los puntos de control en la base y el posicionado en la parte superior del sistema de soporte lateral para los cuatro barridos realizados, Fig.26. Igualmente, estos datos se analizaron en el dominio de frecuencia determinando mediante una función de transmisibilidad que la amplificación (en dB) y el desfase (ángulo en °) entre estos dos puntos fue mínimo, Fig. 27.

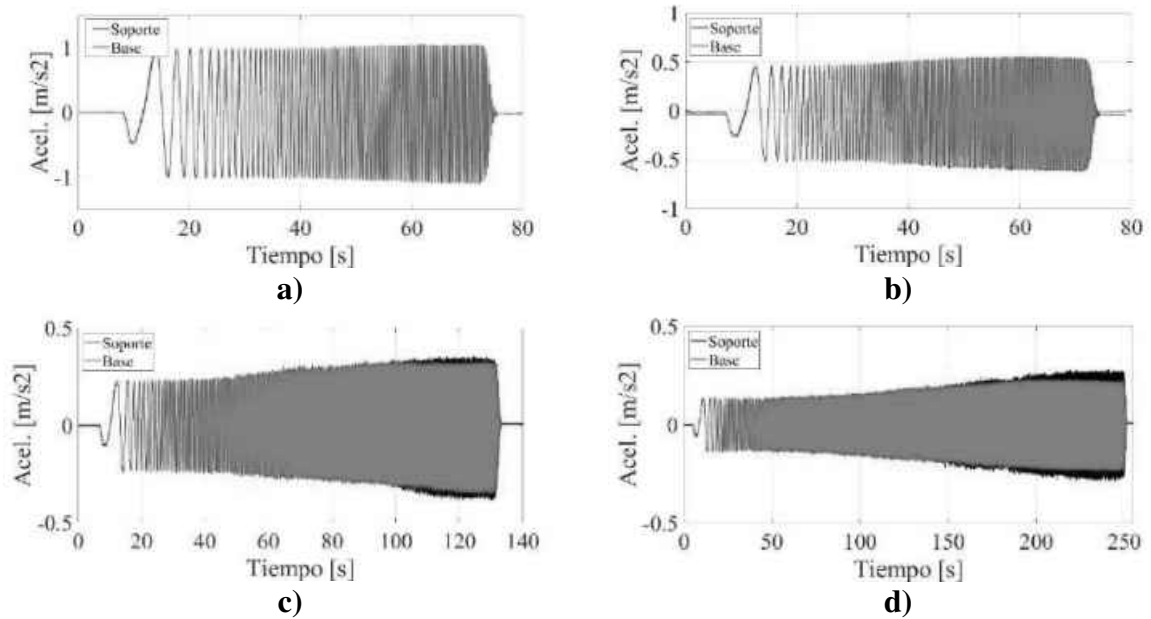


Figura 26. Barridos lineales 0.1→3.0 Hz de la Base→Soporte lateral con desplazamiento variable 1.0→5.0 mm; **a)** Barrido No.1; **b)** Barrido No.2; **c)** Barrido No.3; **d)** Barrido No.4.

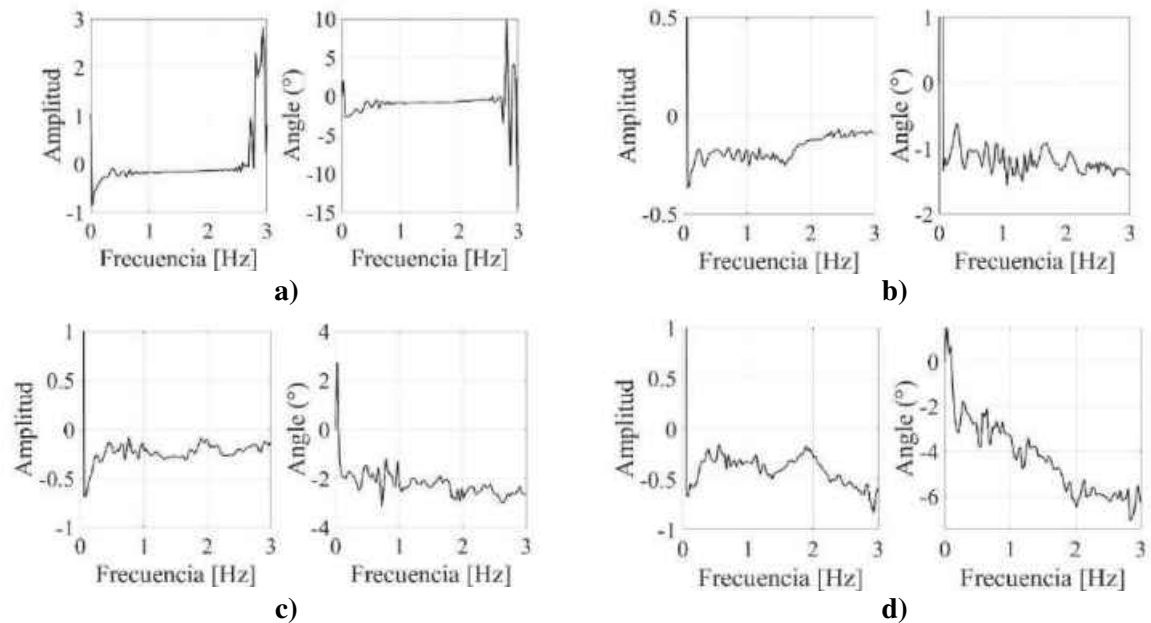


Figura 27. Transmisibilidad Base→Soporte lateral; **a)** Barrido No.1; **b)** Barrido No.2; **c)** Barrido No.3; **d)** Barrido No.4.

Capítulo 4. Pruebas Experimentales.

Los ensayos experimentales se realizaron en el ME-IHE a siete sujetos de prueba aleatorios. Estos test consistieron en adquirir las fuerzas laterales inducidas por la marcha humana en dos condiciones importantes: sobre superficie rígida y superficies flexibles. En el primer caso, se desarrolló la marcha humana en la caminadora a 1.10 m/s manteniendo los desplazamientos laterales del simulador sísmico como estáticos. Posteriormente, para las superficies flexibles, se desarrolló la marcha humana en la caminadora a 1.10 m/s bajo movimientos sinusoidales laterales del simulador sísmico de 5.0, 10.0, 20.0, 30.0 y 50.0 mm; con frecuencias para cada desplazamiento de $0.70 \rightarrow 1.30 \text{ Hz}$ a un paso de 0.10 Hz y una duración de 30 s en cada paso de frecuencia. Estas dos condiciones anteriormente descritas se realizaron para cada uno de los sujetos de prueba, en un entorno controlado similar a lo mostrado en la Fig. 28.

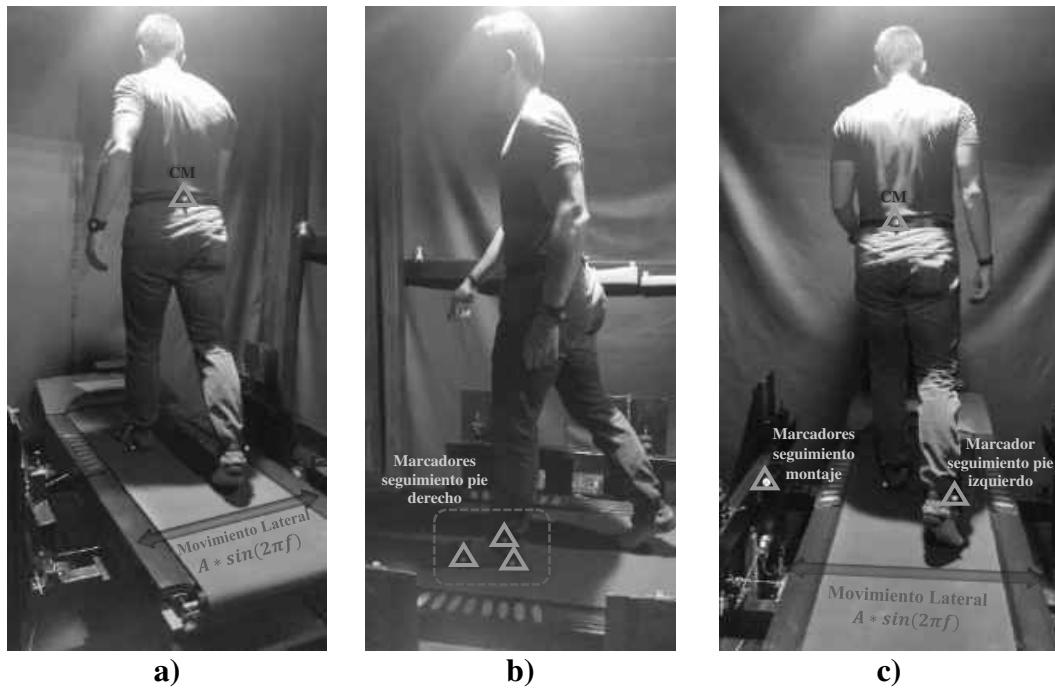


Figura 28. Montaje de ensayos de la marcha humana, sujeto de prueba No.1; a) Vista isométrica; b) Vista lateral; c) Vista posterior.

4.1 Sujetos de prueba (SP).

Los sujetos de estudio de esta investigación se componen de personas percibidas por ellas mismas con género masculino, sin condiciones ni indicios de afectación a su motricidad durante la marcha, rangos de masa de $64.0 \rightarrow 80.0 \text{ kg}$ y estaturas entre $1.66 \rightarrow 1.79 \text{ m}$. Adicionalmente, se recolectaron datos antropométricos de cada una de estas personas con el fin de realizar una base de datos completa que permita la reconstrucción total de los resultados obtenidos, esta información se encuentra condensada en el ANEXO No.2. A continuación se dispone en la Tabla No. 2 los datos más relevantes de estos SP.

Tabla 2. Datos antropométricos de los sujetos de prueba.

Ítem No.	Edad {Años}	Estatura {m}	Masa Corporal {kg}	Altura CM {m} Aprox.	Índice de masa corporal {kg/m ² }
SP_1	20	1.74	76.00	1.00	25.10
SP_2	27	1.78	70.00	1.04	22.09
SP_3	19	1.66	69.00	1.01	25.04
SP_4	22	1.79	74.00	0.99	23.10
SP_5	23	1.70	80.00	1.00	27.68
SP_6	28	1.70	64.00	0.98	22.15
SP_7	22	1.73	70.00	1.00	23.39

* SP → Sujeto de prueba

4.2 Periodos de soporte y elevación de la Marcha humana.

Esta sección concentró su atención en la dinámica de la variabilidad existente de la frecuencia de paso Fp de la marcha humana. Lo anterior se sustenta en que es Fp uno de los principales parámetros que contiene información de la aleatoriedad presente en las fuerzas laterales antrópicas; además según [69], [98], [168], [169] y entre otros, el parámetro Fp es susceptible a los cambios generados en la marcha humana, en especial cuando esta es sometida a efecto de superficies flexibles con movimientos sinusoidales cercanos a su frecuencia fundamental. Por ello, en esta investigación, se registraron datos de video, como los mostrados en la Fig. 28b, los cuales permiten a partir de los marcadores dispuestos en el pie derecho realizar un procesamiento básico de imágenes en el software *Matlab* y obtener así los tiempos de soporte y de elevación del pie durante la marcha, para cada uno de los SP tanto en superficie rígida como en el protocolo definido para superficie flexible. Los registros de video se realizaron mediante un *smartphone* marca *Xiaomi Redmi 9T* con 48.0 *Mpx* en su cámara principal. La Fig.29 muestra una trama de fotogramas utilizados del SP No.1 para cuantificar los tiempos de un paso de la marcha sobre la condición de superficie rígida.



Figura 29. Registro visual de un paso de marcha sobre superficie rígida SP No.1.

Los registros fotográficos poseen una duración de 30.0 s tanto en superficie rígida como para cada uno de los desplazamientos, con las frecuencias respectivas, de los movimientos sinusoidales configurados en las pruebas sobre superficie flexible. Lo anterior determina, una adquisición de aproximadamente 30 pasos de marcha que permiten configurar un análisis estocástico de la misma para cada uno de los SP, tanto en superficie flexible como en rígida.

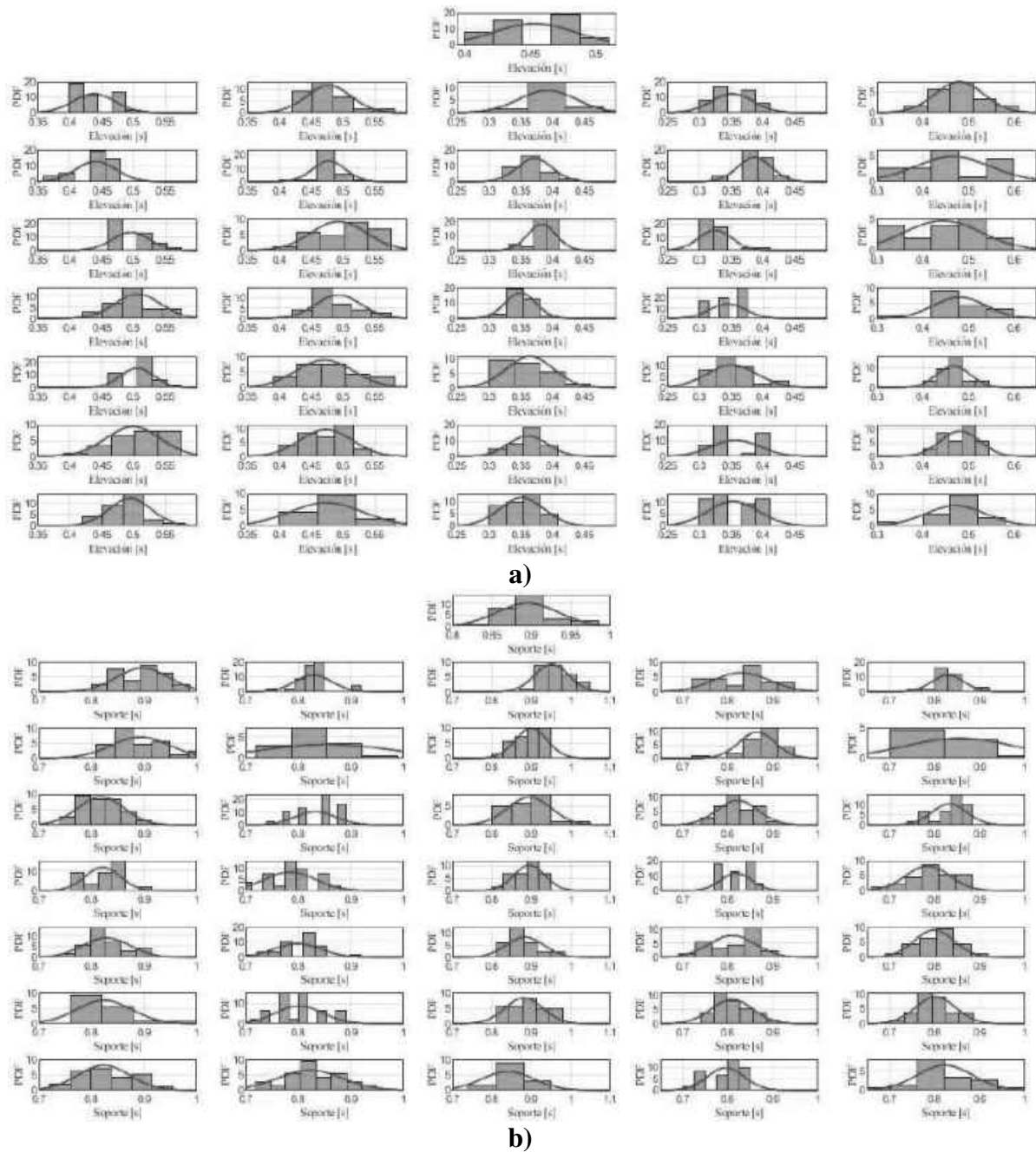


Figura 30. Análisis de la variabilidad de los tiempos de soporte y suspensión de pasos de marcha, SP-No.1; **a)** Tiempos de suspensión; **b)** Tiempos de soporte.

La Fig. 30 presenta las distribuciones normales obtenidas, correspondientes al SP No.1, para los periodos de soporte y de elevación registrados en cada paso de marcha durante las pruebas sobre el ME-IHE, tanto en superficie rígida (gráfica singular en la parte superior de Fig.30 a, b) como para superficies flexibles (Columnas: desplazamientos de 5.0, 10.0, 20.0, 30.0 y 50.0 mm; Filas: frecuencias de 0.7→1.3). Este mismo análisis se realizó para cada uno de los SP restantes y sus Fig.42→47 se encuentran adjuntas en el ANEXO No.2. Por lo tanto, es posible concluir a partir de estos resultados que las superficies flexibles inducen alteraciones en la forma de marcha humana en comparación con lo registrado sobre superficie rígida, esta acción es realizada involuntariamente por los SP con el fin de mantener el equilibrio propio de su cuerpo durante la marcha.

Tabla 3. Valores medios de soporte de pie durante paso, SP No.1.

	5 mm		10 mm		20 mm		30 mm		50 mm	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
<i>rígida</i>	0,895	0,039	0,895	0,039	0,895	0,039	0,895	0,039	0,895	0,039
0,7	0,898	0,050	0,829	0,036	0,952	0,043	0,831	0,063	0,829	0,036
0,8	0,894	0,056	0,856	0,122	0,900	0,041	0,865	0,040	0,857	0,123
0,9	0,818	0,044	0,833	0,039	0,895	0,055	0,822	0,046	0,833	0,039
1	0,821	0,033	0,785	0,048	0,895	0,039	0,819	0,034	0,785	0,048
1,1	0,829	0,045	0,799	0,044	0,884	0,048	0,810	0,051	0,799	0,044
1,2	0,824	0,053	0,802	0,045	0,881	0,048	0,810	0,046	0,802	0,044
1,3	0,823	0,050	0,822	0,062	0,841	0,066	0,795	0,041	0,823	0,062

μ →Valor medio, σ →Valor desviación estándar.

Tabla 4. Valores medios de elevación de pie durante un paso, SP No.1.

	5 mm		10 mm		20 mm		30 mm		50 mm	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
<i>rígida</i>	0,453	0,030	0,453	0,030	0,453	0,030	0,453	0,030	0,453	0,030
0,7	0,438	0,032	0,478	0,035	0,392	0,045	0,352	0,033	0,481	0,053
0,8	0,441	0,031	0,478	0,026	0,372	0,027	0,386	0,027	0,467	0,084
0,9	0,496	0,030	0,493	0,044	0,383	0,022	0,325	0,026	0,444	0,085
1	0,507	0,036	0,493	0,036	0,350	0,024	0,345	0,028	0,481	0,058
1,1	0,506	0,026	0,471	0,045	0,364	0,037	0,351	0,039	0,468	0,037
1,2	0,499	0,043	0,473	0,041	0,361	0,031	0,357	0,039	0,482	0,044
1,3	0,495	0,033	0,474	0,056	0,352	0,034	0,353	0,039	0,472	0,065

μ →Valor medio, σ →Valor desviación estándar.

Las Tablas 3→4 presentan los resultados del SP No.1 para los valores medios, y sus respectivas desviaciones estándar, tanto para superficie rígida como para las superficies flexibles, de los tiempos de soporte y elevación del pie durante un paso de marcha. En el *ANEXO No.2*, se encuentran las Tablas 6→7 con los periodos detallados anteriormente para los SP No. 2→7. Adicionalmente, en la Fig. 31 se encuentra graficados los periodos promedio de soporte y elevación correspondientes a los pasos de marcha registrados para el SP No.1. Sin embargo, para los SP No. 2→7 estas gráficas se ubican en el *ANEXO No.2* en la Fig. 48.

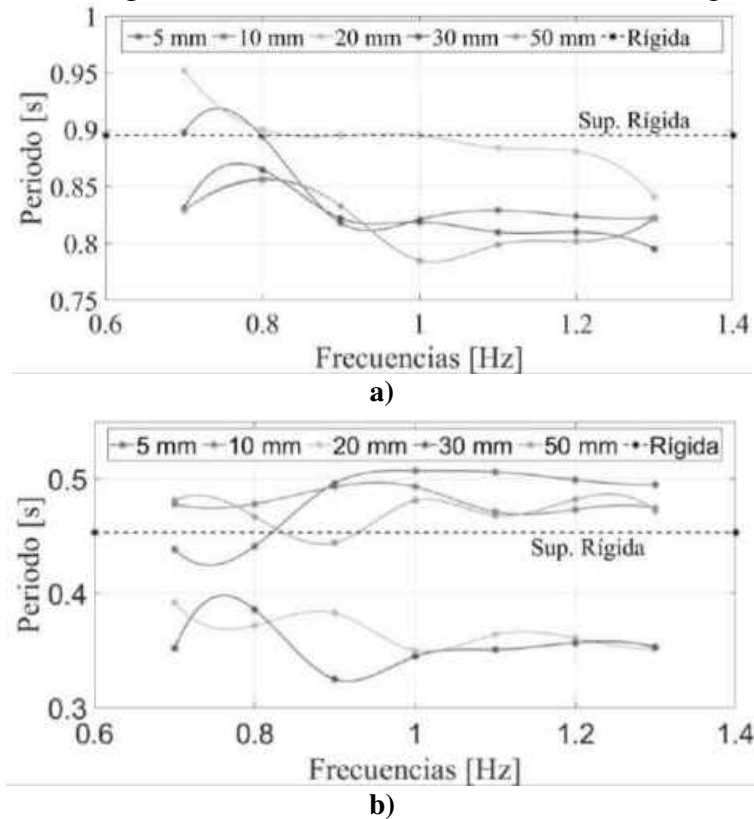


Figura 31. *Tiempos de soporte y elevación de pie para un paso de marcha – SP No.1; a) Periodo de Soporte vs Frecuencias de excitación lateral para un paso de marcha; b) Periodo de Suspensión vs Frecuencias de excitación lateral para un paso de marcha.*

Los periodos de soporte y elevación del pie durante un paso de marcha para las frecuencias de excitación de las superficies flexibles muestran un comportamiento decreciente a medida que este último factor aumenta. Por otra parte, se evidencia una importante variabilidad de estos periodos sobre superficie flexibles en comparación con los obtenidos sobre superficie rígida, corroborando la importancia de la dinámica de superficies sobre la marcha humana. A continuación, en la Fig. 32→33, se expone el comportamiento de los periodos de soporte y elevación de paso en la marcha de los SP a lo largo del contenido frecuencial de las superficies flexibles para cada amplitud de desplazamiento; mostrando, además, como aún bajo las mismas condiciones de excitación la variabilidad de marcha de los SP es evidente.

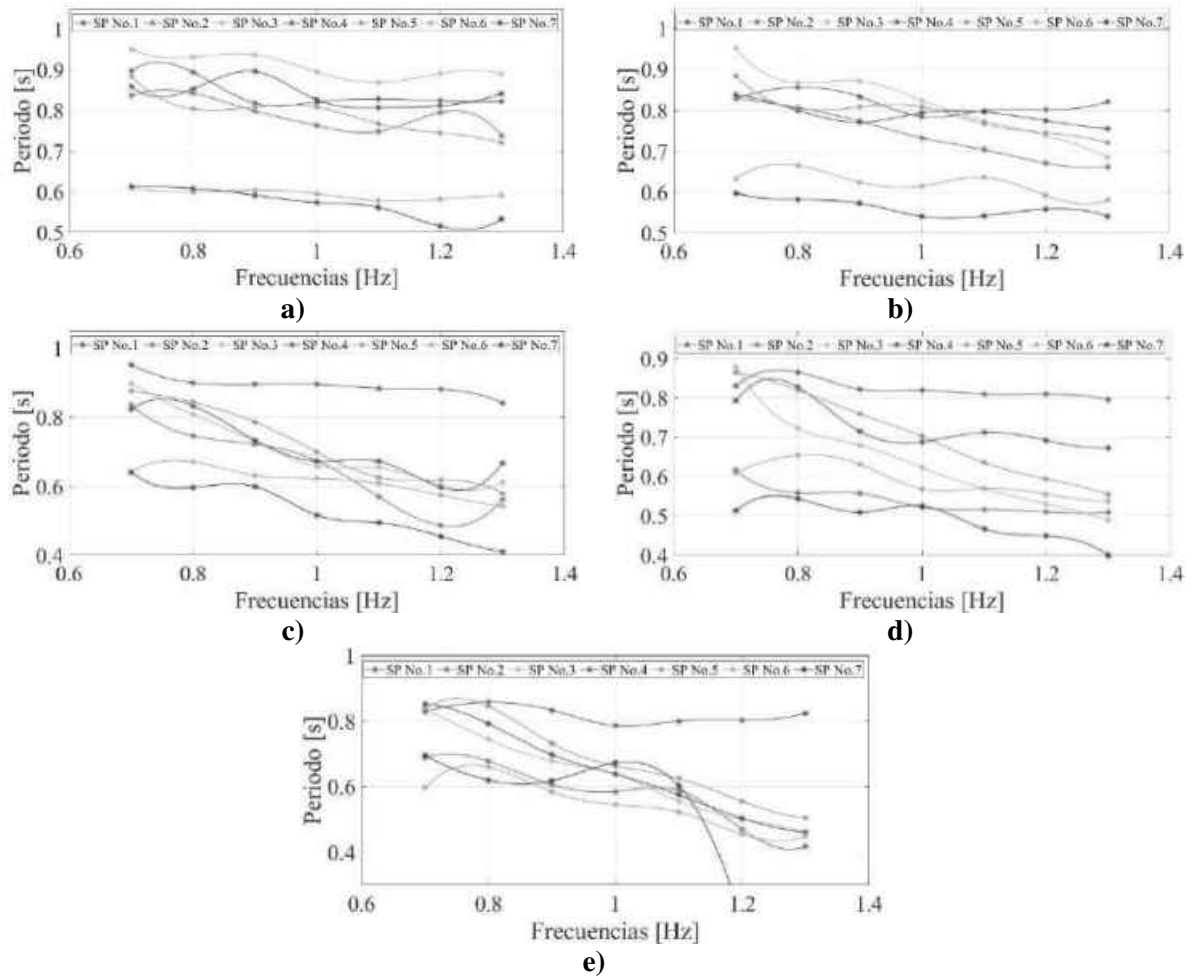
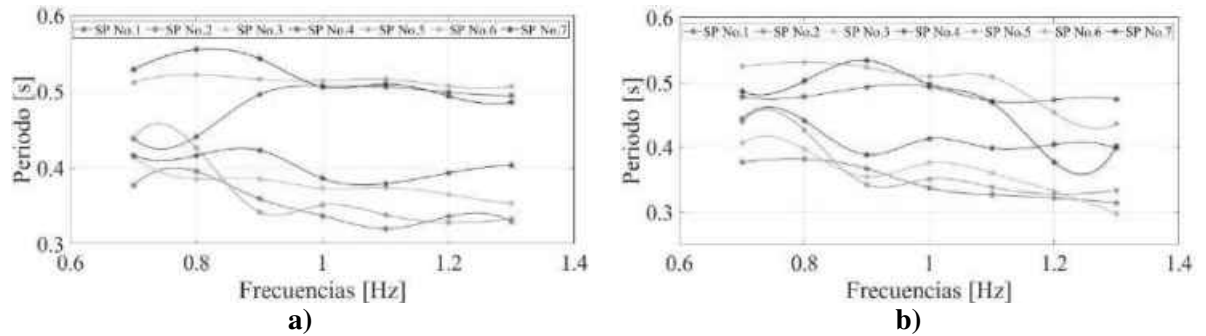


Figura 32. Periodo de soporte vs frecuencias de excitación por SP; **a)** Desp. 5 mm; **b)** Desp. 10 mm; **c)** Desp. 20 mm; **d)** Desp. 30mm; **e)** Desp. 50 mm.



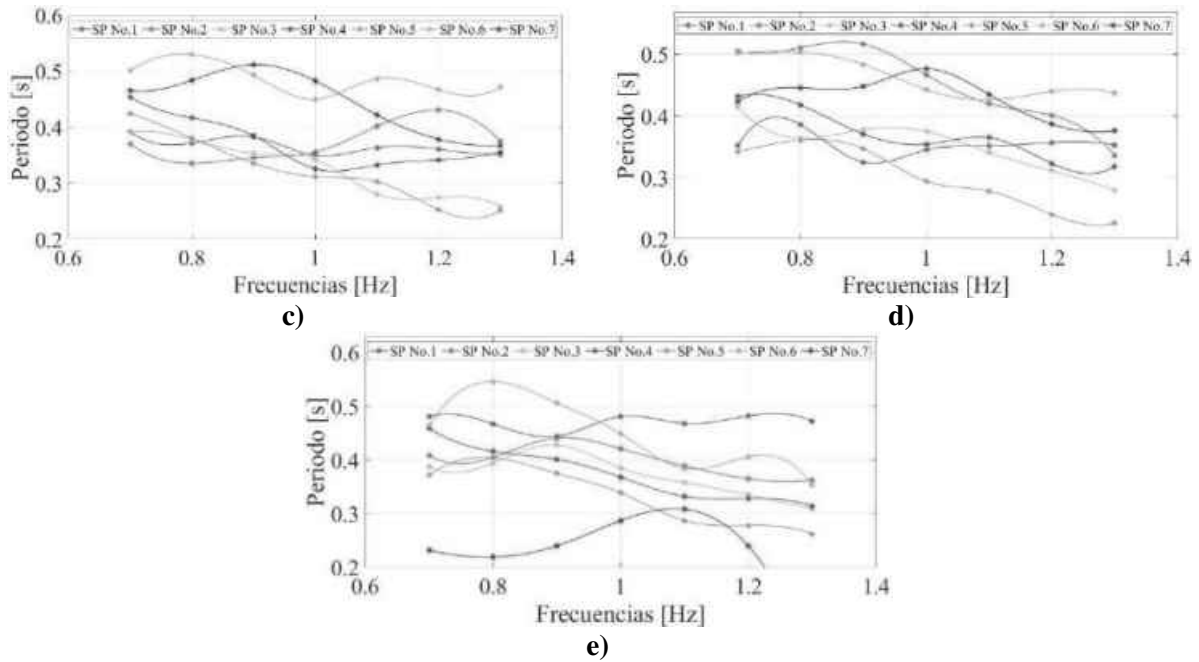


Figura 33. Periodo de elevación vs frecuencias de excitación por SP; *a)* Desp. 5 mm; *b)* Desp. 10 mm; *c)* Desp. 20 mm; *d)* Desp. 30mm; *e)* Desp. 50 mm.

4.3 Correlación entre la Marcha humana y las superficies flexibles.

Uno de los desafíos que la ingeniería estructural se ha planteado para esta década es el de determinar la influencia de la dinámica de las superficies flexibles sobre el comportamiento y desarrollo de las actividades antrópicas, entre ellas la marcha humana. Con este propósito, en esta investigación se encontraron los niveles de correlación existentes entre los desplazamientos de las superficies flexibles con movimientos sinusoidales, a diferentes frecuencias, y los desplazamientos del centro de masa *CM* de cada uno de los SP. Lo anterior se realizó mediante la implementación de un marcador de seguimiento dispuesto en cada SP en su *CM* y otro sobre un punto del MP-IHE, como se muestra en la Fig.28ac. Adicionalmente, se utilizó un *smartphone* marca *Xiaomi Redmi 9T* con 48.0 *Mpx* en su cámara principal como sistema de captación óptico mediante videos estándar de 30.0 *fps*. Los datos adquiridos en video se les aplicó un proceso de binarización y extracción mediante el *software* Matlab para cada fotograma, extendiéndolo para toda la duración del video como se muestra en la Fig.34; teniendo como resultado los desplazamientos en términos de pixeles de los fotogramas. Por otra parte, para el SP No.1 los datos extraídos en pixeles del desplazamiento del *CM* y del movimiento sinusoidal de 5.0→50 mm del MP-IHE para frecuencias de 0.7→1.3 Hz a se disponen en función del tiempo en la Fig. 35; de igual manera, para los demás SP restantes este proceso se muestran en el ANEXO No.2 en las Fig. 49→60 y Tablas 8→13. Finalmente, en esta sección se determinaron los parámetros de correlación existentes entre los movimientos adquiridos mediante la función *corrcoef* del *software* Matlab determinando los coeficientes mostrados en la Tabla. 5 y representados gráficamente en la superficie de la Fig. 36.

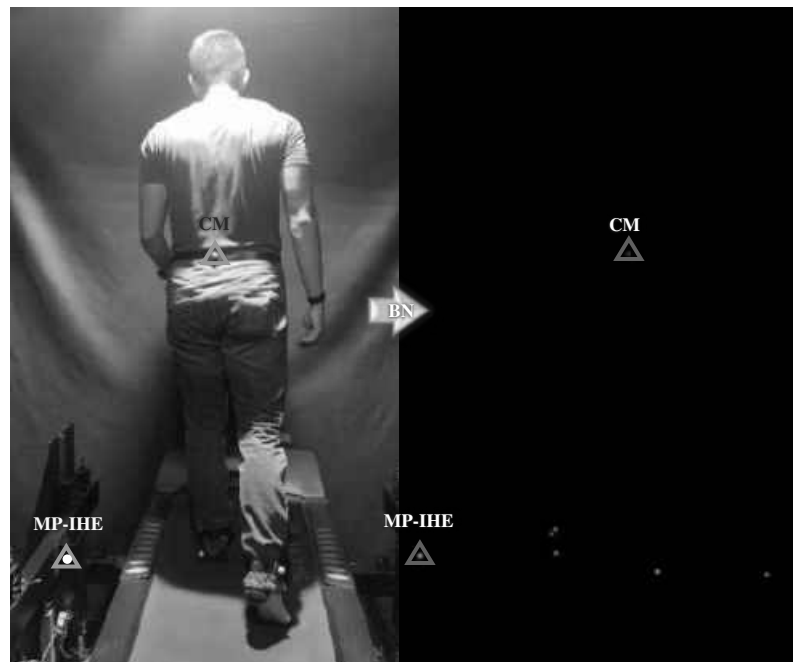


Figura 34. Proceso de Binarización de fotografías, SP No.1.

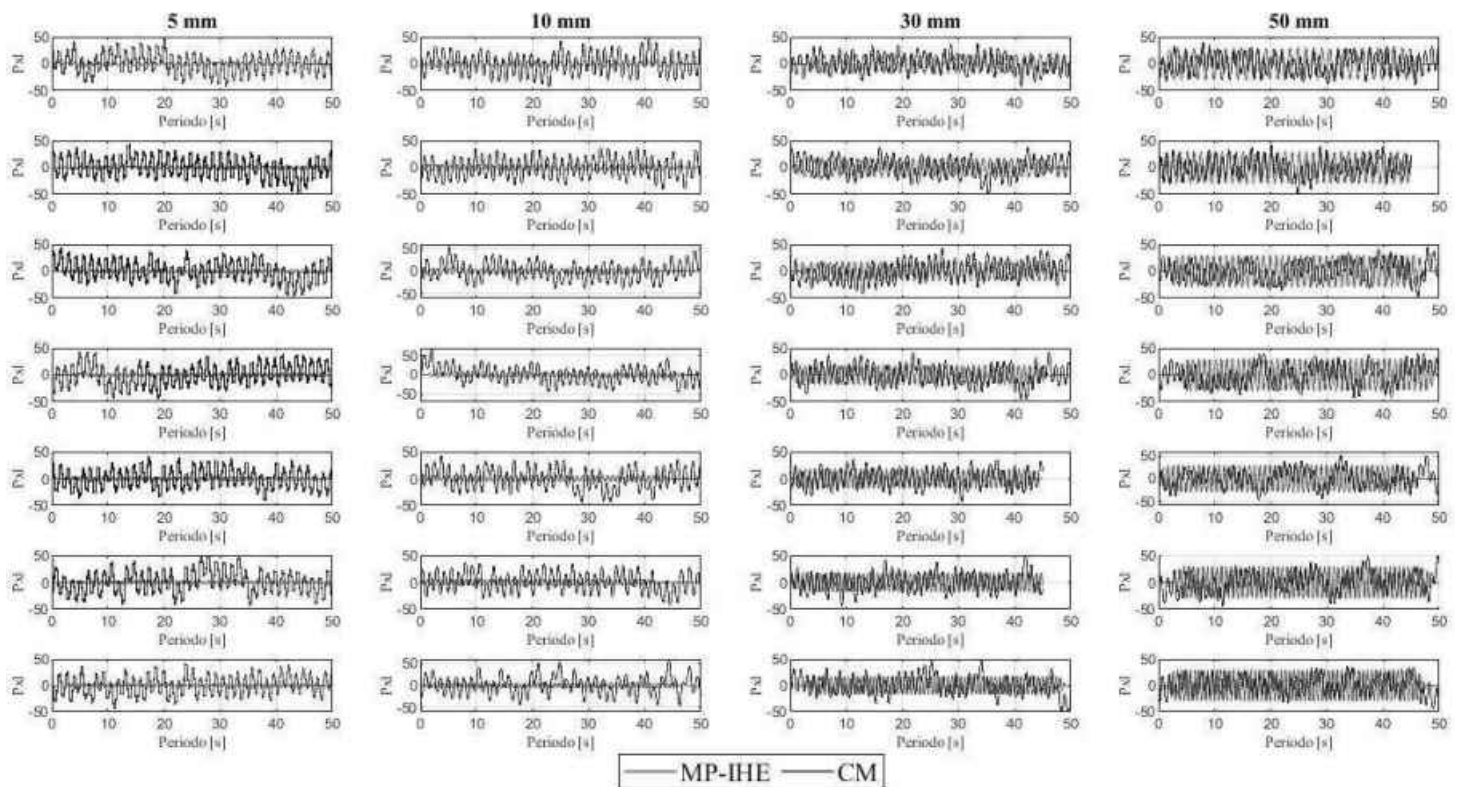


Figura 35. Desplazamientos en pixeles del CM y del MP-IHE, SP No.1

Tabla 5. Valores de correlación de desplazamientos CM y MP-IHE, SP No.1.

Frec. Lat.	Desplazamientos			
	5 mm	10 mm	30 mm	50 mm
0.7	0.000	0.029	0.000	0.000
0.8	0.011	0.124	0.059	0.000
0.9	0.000	0.006	0.003	0.000
1	0.001	0.003	0.016	0.000
1.1	0.000	0.000	0.007	0.000
1.2	0.001	0.002	0.007	0.015
1.3	0.000	0.001	0.004	0.000

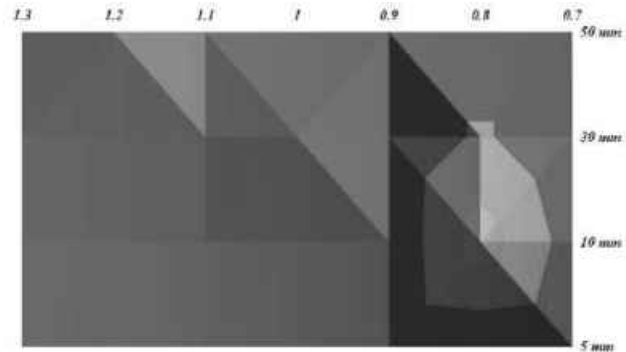


Figura 36. Superficies de correlaciones entre desplazamientos del CM y MP-IHE, SP No.1.

Los resultados anteriormente expuestos evidencian una tendencia a la correlación entre los movimientos sinusoidales impuestos por el MP-IHE y el desarrollado por el CM, especialmente los movimientos con frecuencias cercanas al de la marcha humana. Incluso, para los SP No.3→6 se determina un nivel de correlación notable entre el MP-IHE y su CM a medida que los niveles de aceleración de la superficie flexible varían.

4.4 Cargas inducidas por la marcha humana.

La marcha humana es descrita por algunos autores como una forma específica de locomoción, en la cual el peso del cuerpo humano es trasladado y soportado, de manera alternada, por ambas extremidades inferiores [172]. Además, esta actividad antrópica se condiciona a un apoyo constante de una de estas extremidades con el suelo, lo que genera un estado de doble apoyo durante su transición y de balanceo, como se muestra en la Fig. 29 para un ciclo de marcha. Debido a que esta actividad humana es un proceso aprendido durante la edad temprana, y no un desarrollo de un reflejo innato, se caracteriza por su anisotropía entre individuos e incluso entre un individuo mismo [173], tal como se refleja en los datos encontrados en la sección 4.2 de este estudio. Por ello, en esta investigación se registraron las fuerzas laterales inducidas por la marcha humana, a través del MP-IHE, tanto para la condición rígida como para el protocolo de desplazamientos laterales de las superficies flexibles. En estas fuerzas, las cuales son mostradas en las Fig. 37 para el SP No.1 como una relación entre la fuerza lateral y la masa del SP, se evidencia una fuerte incidencia sobre su comportamiento debido al incremento de la frecuencia y del desplazamiento en estas superficies, pasando de una fuerza inducida del 4.0% de su peso para la superficie rígida al 20.0% en el desplazamiento de 50 mm para frecuencias superiores a 0.9 Hz, condiciones similarmente desarrolladas por el Puente Millennium durante su inauguración según lo reportado por Dallard et al. en [24] y Zivanovic et. al. en [35]. Por otra parte, en la Fig. 38 se dispone el contenido frecuencia de las cargas de marcha adquiridas,

mostrando una tendencia, para desplazamientos de superficies menores a 10 mm en el rango de frecuencias de 0.7→1.3 Hz, a mantener la frecuencia de paso de marcha presente. Sin embargo,

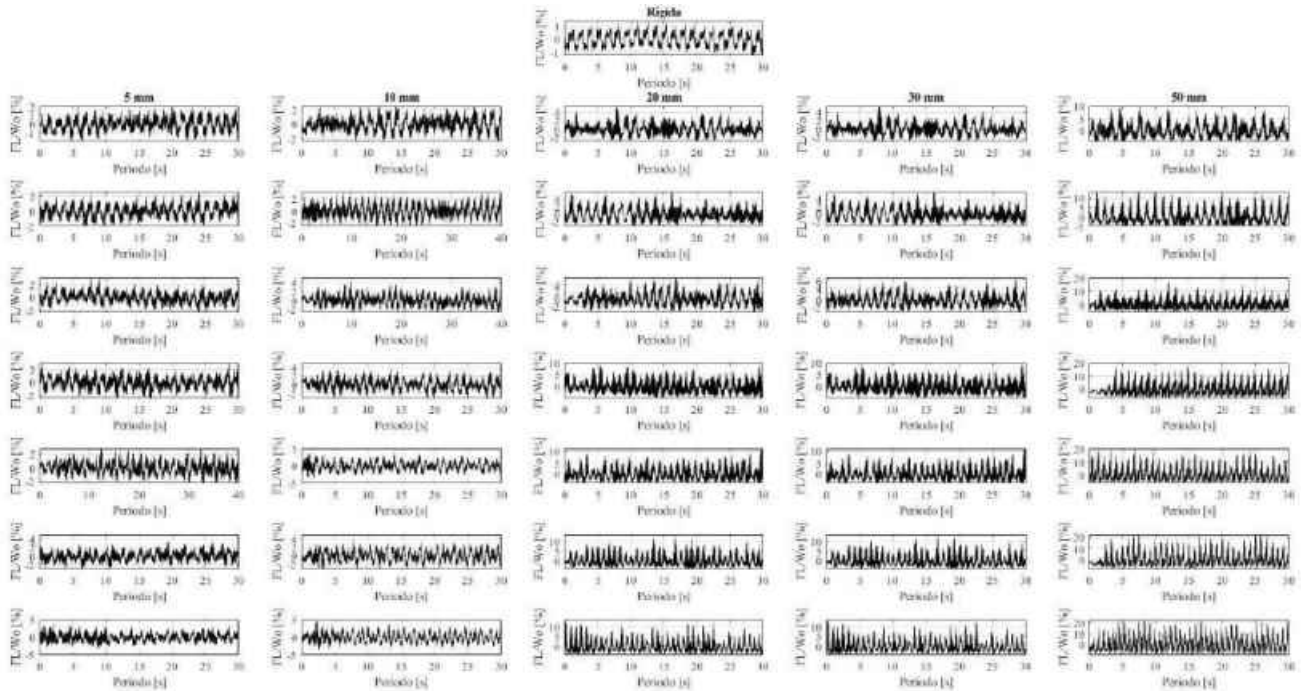


Figura 37. Fuerzas laterales inducidas por la marcha, SP No.1.

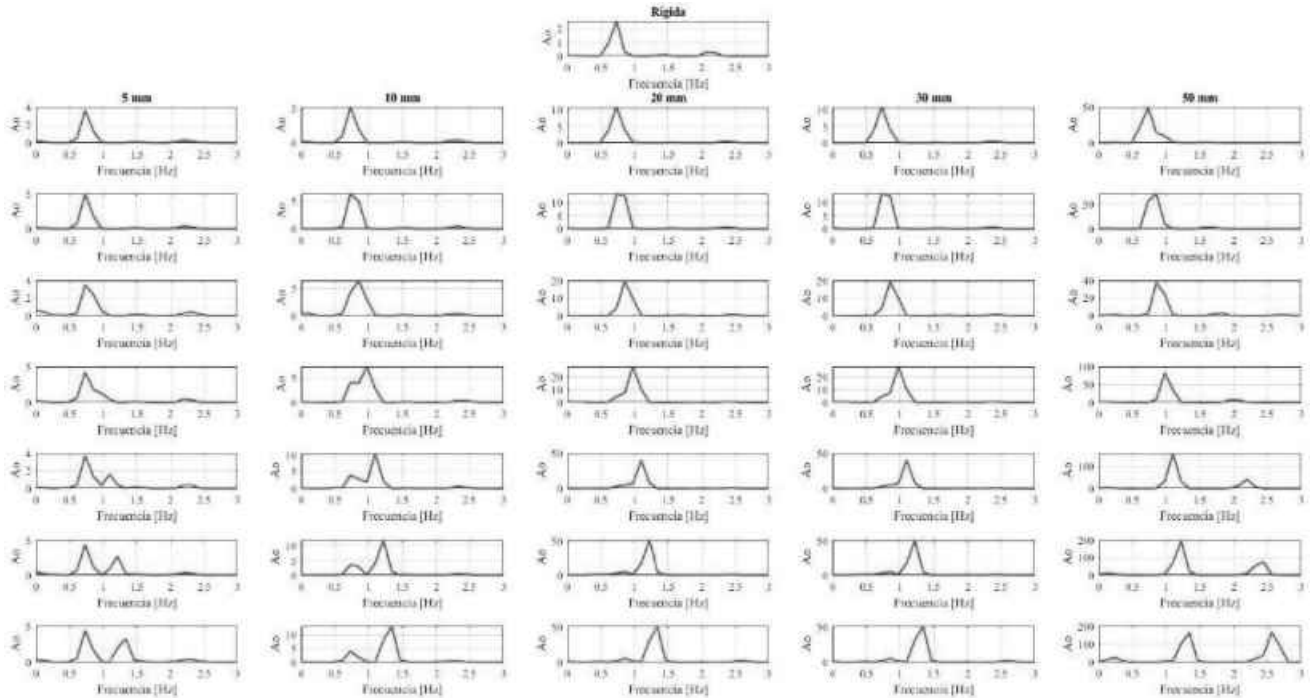


Figura 38. Datos en frecuencia de las fuerzas laterales inducidas por la marcha, SP No.1.

Tabla 6. Valores de coeficientes de las fuerzas laterales inducidas por SP No.1.

Frec. Lat.	Desplazamientos				
	5 mm	10 mm	20 mm	30 mm	50 mm
0.7	1.91	2.60	4.44	9.57	11.56
0.8	2.08	3.42	5.75	16.15	16.95
0.9	3.41	3.84	8.26	16.26	17.72
1.0	3.07	4.42	6.78	14.54	23.38
1.1	2.92	4.29	16.34	10.43	25.09
1.2	2.90	4.88	20.86	15.15	32.06
1.3	3.16	5.52	18.91	12.68	22.21

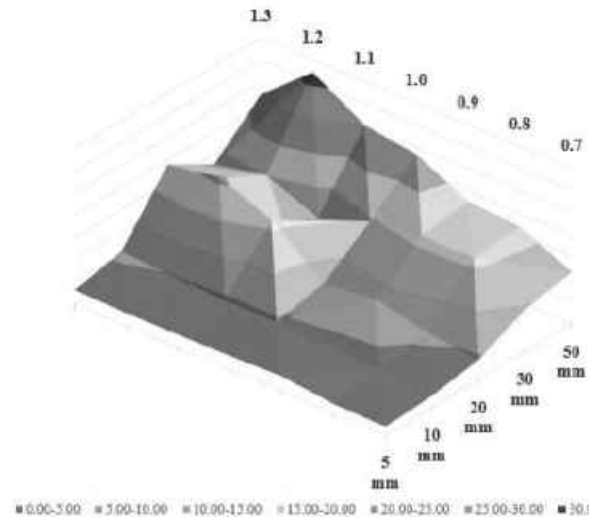


Figura 39. Superficies de los valores de coeficientes de las fuerzas laterales inducidas por SP No.1.

para condiciones de excitación mayores o iguales a 20 mm se realiza un acoplamiento con las frecuencias de movimiento lateral inducidos por las superficies flexibles, llegando posiblemente a intervenir una segunda frecuencia fundamental en los casos más críticos debido a las alteraciones propias de la marcha humana para conservar el equilibrio durante la misma. Finalmente, la Tabla No.6 y la Fig.39 muestran la variación de los coeficientes de las fuerzas laterales inducidas por el SP No.1 evidenciando, lo ya determinado por Ingólfsson et. al. en [69], [98] y Carroll et al. [64] en sus investigaciones, un aumento de las fuerzas laterales de marcha bajo la influencia de superficies flexibles en comparación con las inducidas sobre una superficie rígida. Todo lo descrito anteriormente, se dispone en el ANEXO No.2 para los SP restantes en las Fig. 61→78 y Tablas 15→20.

De forma similar al procedimiento de evaluación de la carga lateral, esta investigación adquirió la carga vertical total inducida por la marcha humana bajo la influencia de superficies flexibles laterales, determinando los niveles de amplificación como la relación entre la carga inducida y la masa de cada SP. Estas cargas se pueden divisar en la Fig. 40, donde es posible inferir la influencia de las superficies flexibles laterales sobre la amplificación de la carga vertical de marcha. Posicionando estos datos, y en general el montaje experimental de MP-IHE, como un primer paso en el estudio de estas cargas bajo esta orientación. Adicionalmente, se determina el contenido frecuencial de estas cargas verticales, mostrado en la Fig.41, donde se expone como las superficies flexibles obligan a cambiar la forma de marcha de cada SP con el fin de mantener el equilibrio y su cadencia. Se observa en el SP No.1 como a desplazamientos entre 5.0→20.0 mm y frecuencias 0.7→1.3 Hz la influencia de las superficies flexibles sobre la dinámica de marcha en el sentido vertical es casi despreciable. Sin embargo, para desplazamientos de 30.0 mm o superior, bajo el mismo contenido frecuencial de excitación, los cambios en frecuencia de

la marcha varían alcanzando valores de 2.10 Hz en comparación con el 1.50 Hz sobre superficie rígida. En las Fig. 79→90 se disponen los datos para los SP restantes.

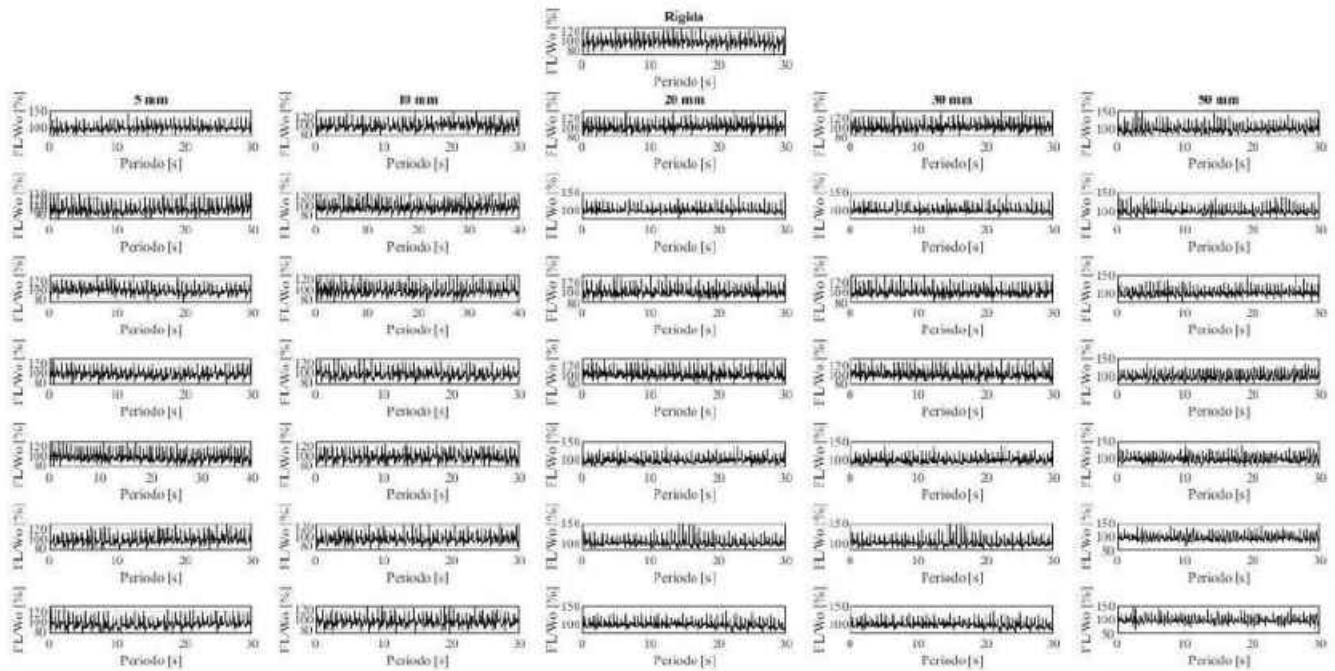


Figura 40. Fuerzas verticales inducidas por la marcha, SP No.1.

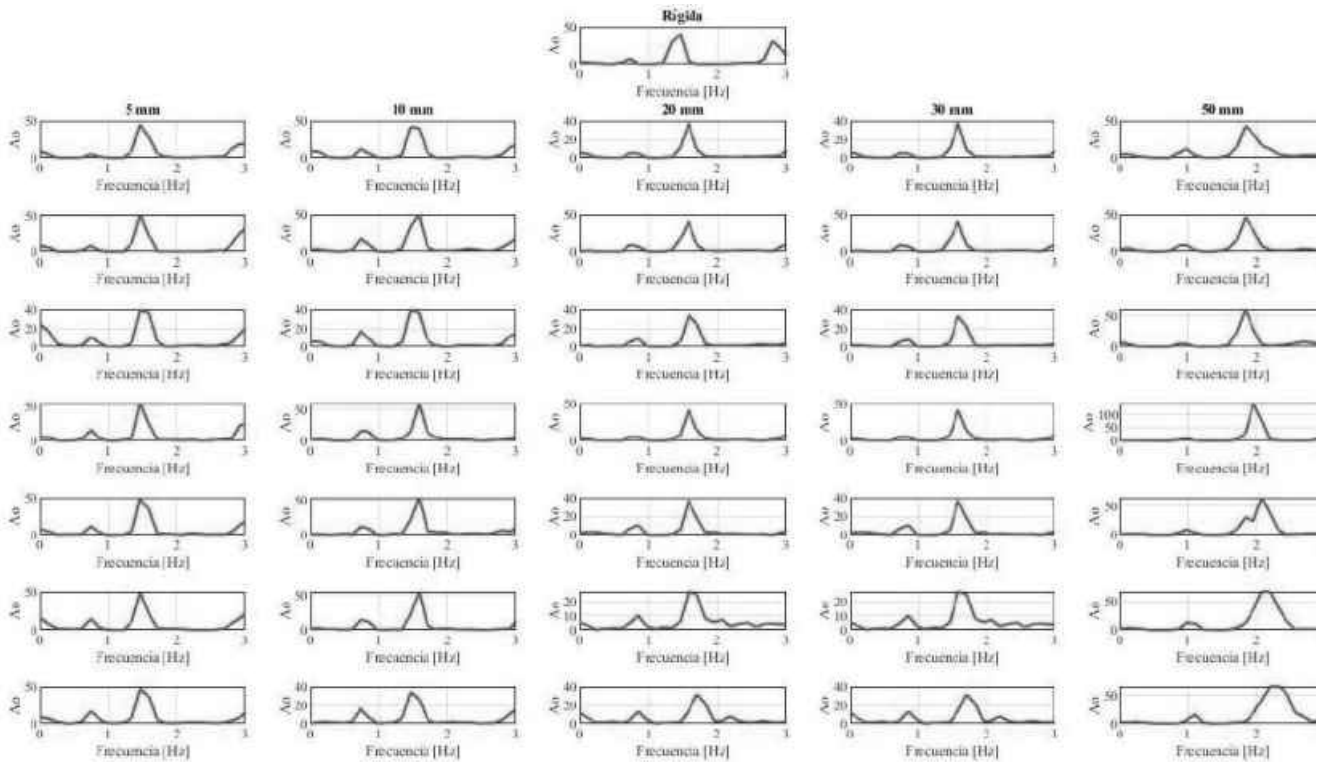


Figura 41. Datos en frecuencia de las fuerzas verticales inducidas por la marcha, SP No.1.

Conclusiones

En esta investigación se diseñó, construyó y se desarrolló una plataforma instrumentalizada para la adquisición de las cargas de marcha humana de forma continua en los tres ejes principales: longitudinal, lateral y vertical. Esta plataforma se acopló sobre un simulador sísmico para inducir movimientos transversales al desplazamiento de la marcha, constituyendo así un Marco de Pruebas de la Interacción Humano-Estructura (MP-IHE). El funcionamiento de la plataforma, los desarrollos técnicos locales, instrumentalización y control se describen detalladamente en el Capítulo No.3; además, en el ANEXO No.1 se disponen los planos de fábrica y manuales de funcionamiento.

El MP-IHE constituyó la base experimental de esta investigación, la cual se desarrolló mediante siete sujetos de pruebas (SP) compuestos por personas percibidas por ellas mismas con género masculino, sin condiciones ni indicios de afectación a su motricidad durante la marcha, rangos de masa de $64.0 \rightarrow 80.0 \text{ kg}$ y estaturas entre $1.66 \rightarrow 1.79 \text{ m}$. Adicionalmente, se recolectaron datos antropométricos de cada una de estas personas y se dispusieron en el ANEXO No.2, con el fin de realizar una base de datos completa que permita la reconstrucción total de los resultados obtenidos. Cada SP fue sometido a barridos de frecuencias sinusoidales de 30 s a velocidad constante de 1.1 m/s con amplitudes de $\{5.0 \ 10.0 \ 20.0 \ 30.0 \ 50.0\} \text{ mm}$ y contenidos de frecuencias de $\{0.7 \ 0.8 \ 0.9 \ 1.0 \ 1.1 \ 1.2 \ 1.3\} \text{ Hz}$. Inicialmente se determinaron, mediante procesamiento de imágenes, los periodos de soporte y balanceo para un cada ciclo de paso de cada SP, encontrando una disminución en estos periodos a medida que se aumentaba el contenido frecuencial y las amplitudes en el desplazamiento. Lo anterior permitió corroborar un comportamiento comparable con lo descrito en la literatura. En una segunda etapa, mediante un sistema óptico conformado por un *smartphone* marca *Xiaomi Redmi 9T* con 48.0 Mpx en su cámara principal, se registraron los desplazamientos laterales en *Mpx* del CM de cada SP y del MP-IHE, lo que permitió realizar una matriz de correlación y plantear superficies de incidencia que demostraron niveles de acoplamiento entre los SP y los movimientos inducidos por la plataforma, estos resultados se muestran ampliamente en el ANEXO No.2.

En la etapa final, inicialmente se estudiaron las fuerzas laterales inducidas por la marcha humana durante los protocolos de desplazamiento de las superficies flexibles, determinando que para los desplazamientos menores a 20 mm el contenido frecuencial de marcha se mantiene predominante en combinación con el inducido por la plataforma. Sin embargo, para desplazamientos mayores las frecuencias predominantes en las cargas son las inducidas por la plataforma; Además, en cuanto a los factores de amplificación alcanzan valores de hasta 35.0% del peso del SP en los desplazamientos sobre superficies flexibles, en comparación con un 5.0% promedio en las superficies rígidas; estos resultados se disponen en el ANEXO No.2. Al cierre de esta etapa, se estudiaron las cargas verticales inducidas por la marcha humana cuando es sometida a desplazamientos laterales, foco en esta investigación que no se tenía presente en la literatura, cuantificando un aumento de hasta 30% de la fuerza inducida en comparación con la

superficie rígida, además de evidenciar una influencia notable de los movimientos laterales en el aumento del contenido frecuencia de estas cargas verticales.

Referencias

- [1] Martínez, Jesús Enrique Escalante. *Fenómenos de Sincronización y Modelos Matemáticos*. Diss. PhD thesis, Universidad Veracruzana, Xalapa De Enriquez, México, 2012.
- [2] A. Pikovsky and M. Rosenblum, ‘Synchronization’, *Scholarpedia*, vol. 2, no. 12, p. 1459, 2007, doi: 10.4249/scholarpedia.1459.
- [3] E. Ruelas, R. Mansilla, J. Rosado, and L. Barrios García, ‘Las ciencias de la complejidad y la innovación médica: ensayos y modelos’, p. 165, 2006.
- [4] R. E. Mirollo and S. H. Strogatz, ‘Synchronization of pulse-coupled biological oscillators’, *SIAM J Appl Math*, vol. 50, no. 6, pp. 1645–1662, 1990.
- [5] J. B. Buck, ‘Synchronous rhythmic flashing of fireflies’, *Q Rev Biol*, vol. 13, no. 3, pp. 301–314, 1938.
- [6] Z. Néda, E. Ravasz, Y. Brechet, T. Vicsek, and A.-L. Barabási, ‘The sound of many hands clapping’, *Nature*, vol. 403, no. 6772, pp. 849–850, 2000.
- [7] S. Strogatz, *Sync: The emerging science of spontaneous order*. Penguin UK, 2004.
- [8] Berezin, Hilario. *Reconexión magnética y regiones aurales terrestres: Análisis de distintas funciones de acoplamiento viento solar-campo magnético terrestre*. Diss. Universidad Nacional de La Plata, 2021.
- [9] J. Pena Ramirez, L. A. Olvera, H. Nijmeijer, and J. Alvarez, ‘The sympathy of two pendulum clocks: Beyond Huygens’ observations’, *Sci Rep*, vol. 6, no. March, pp. 1–16, 2016, doi: 10.1038/srep23580.
- [10] KERR, S. C.; BISHOP, N. W. M. Human induced loading on flexible staircases. *Engineering Structures*, 2001, vol. 23, no 1, p. 37-45.

- [11] A. Cappellini, S. Manzonni, M. Vanali, and A. Cigada, 'Evaluation of the dynamic behaviour of steel staircases damped by the presence of people', *Eng Struct*, vol. 115, pp. 165–178, May 2016, doi: 10.1016/j.engstruct.2016.02.028.
- [12] P. Andrade, J. Santos, and P. Escórcio, 'Numerical methods to predict human induced vibrations on low frequency stairs. Part 2: Evaluation by comparing with experimental data', *Structures*, vol. 34, pp. 1008–1020, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.istruc.2021.08.024.
- [13] P. Andrade, J. Santos, and L. Maia, 'Numerical methods to predict human induced vibrations on low frequency stairs. Part 1: Literature review, modelling', *Structures*, vol. 34, pp. 575–588, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.istruc.2021.08.017.
- [14] Ellis, B. R., T. Ji, and BRE. "Human-structure interaction in vertical vibrations." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings* 122.1 (1997): 1-9.
- [15] '2009_Ortiz Caracterización del efecto de la interacción Humano-Estructura en el Estadio Olímpico de Cali'.
- [16] Millán Yusti, Diana Carolina, Patricia Valenzuela, and Peter Thomson. "Caracterización de cargas de baile en una plataforma experimental." *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* 12.23 (2013): 47-58.
- [17] Brownjohn, James MW. "Energy dissipation from vibrating floor slabs due to human-structure interaction." *Shock and Vibration* 8.6 (2001): 315-323.
- [18] F. Moreu, D. Maharjan, C. Zhu, and E. Wyckoff, 'Monitoring Human Induced Floor Vibrations for Quantifying Dance Moves: A Study of Human–Structure Interaction', *Front Built Environ*, vol. 6, Mar. 2020, doi: 10.3389/fbuil.2020.00036.
- [19] S. Zhang, L. Xu, and J. Qin, 'Vibration of lightweight steel floor systems with occupants: Modelling, formulation and dynamic properties', *Eng Struct*, vol. 147, pp. 652–665, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.06.008.
- [20] A. Mohammed and A. Pavic, 'Human-structure dynamic interaction between building floors and walking occupants in vertical direction', *Mech Syst Signal Process*, vol. 147, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ymssp.2020.107036.
- [21] A. S. Mohammed and A. Pavic, 'Effect of Walking people on Dynamic Properties of Floors', in *Procedia Engineering*, 2017, vol. 199, pp. 2856–2863. doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.561.
- [22] Y. Fujino and B. M. Pacheco, 'Synchronization of human walking observed during lateral vibration of a congested pedestrian bridge shun-ichi nakamura', 1993.
- [23] Pimentel, Roberto Leal. Vibrational performance of pedestrian bridges due to human-induced loads. Diss. University of Sheffield, 1997.

- [24] Dallard, Pat, et al. "London Millennium Bridge: pedestrian-induced lateral vibration." *Journal of Bridge Engineering* 6.6 (2001): 412-417.
- [25] J. M. W. Brownjohn and P. Omenzetter, 'Long span steel pedestrian bridge at Singapore Changi Airport-Part 2: Crowd loading tests and vibration mitigation measures'. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/283826429>
- [26] Brownjohn, James, et al. "Long span steel pedestrian bridge at Singapore Changi Airport. Part 1: Crowd loading tests and vibration mitigation measures." (2004).
- [27] Ye, Qi, Guang-Nan Fanjiang, and Bojidar Yanev. "Investigation of the dynamic properties of the Brooklyn Bridge." *Sensing issues in civil structural health monitoring*. Springer, Dordrecht, 2005. 65-72.
- [28] Caetano, Elsa, et al. "Studies for controlling human-induced vibration of the Pedro e Inês footbridge, Portugal. Part 1: Assessment of dynamic behaviour." *Engineering Structures* 32.4 (2010): 1069-1081.
- [29] Caetano, Elsa, et al. "Studies for controlling human-induced vibration of the Pedro e Inês footbridge, Portugal. Part 2: Implementation of tuned mass dampers." *Engineering Structures* 32.4 (2010): 1082-1091.
- [30] SÁNCHEZ, Jhon Anderson; GÓMEZ, DANIEL; THOMSON, Peter. Análisis de la interacción humano-estructura en puentes peatonales de Santiago de Cali. *Dyna*, 2013, vol. 80, no 177, p. 86-94.
- [31] D. Gomez, S. J. Dyke, and S. Rietdyk, 'Structured uncertainty for a pedestrian-structure interaction model', *J Sound Vib*, vol. 474, May 2020, doi: 10.1016/j.jsv.2020.115237.
- [32] E. Lai, C. Gentile, and M. G. Mulas, 'Experimental and numerical serviceability assessment of a steel suspension footbridge', *J Constr Steel Res*, vol. 132, pp. 16–28, May 2017, doi: 10.1016/j.jcsr.2017.01.005.
- [33] M. G. Mulas, E. Lai, and G. Lastrico, 'Coupled analysis of footbridge-pedestrian dynamic interaction', *Eng Struct*, vol. 176, pp. 127–142, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.08.055.
- [34] S. H. Strogatz, D. M. Abrams, A. McRobie, B. Eckhardt, and E. Ott, 'Theoretical mechanics: Crowd synchrony on the Millennium Bridge', *Nature*, vol. 438, no. 7064, pp. 43–44, Nov. 2005, doi: 10.1038/43843a.
- [35] S. Živanović, A. Pavic, and P. Reynolds, 'Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: A literature review', *Journal of Sound and Vibration*, vol. 279, no. 1–2. Academic Press, pp. 1–74, Jan. 06, 2005. doi: 10.1016/j.jsv.2004.01.019.

- [36] E. T. Ingólfsson, C. T. Georgakis, and J. Jönsson, ‘Pedestrian-induced lateral vibrations of footbridges: A literature review’, *Engineering Structures*, vol. 45. pp. 21–52, Dec. 2012. doi: 10.1016/j.engstruct.2012.05.038.
- [37] S. Živanović, A. Pavic, and P. Reynolds, ‘Human-structure dynamic interaction in footbridges’, in *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Bridge Engineering*, 2005, vol. 158, no. 4, pp. 165–177. doi: 10.1680/bren.2005.158.4.165.
- [38] E. Shahabpoor, A. Pavic, and V. Racic, ‘Interaction between Walking Humans and Structures in Vertical Direction: A Literature Review’, *Shock and Vibration*, vol. 2016. Hindawi Limited, 2016. doi: 10.1155/2016/3430285.
- [39] C. Maraveas, Z. C. Fasoulakis, and K. D. Tsavdaridis, ‘A review of human induced vibrations on footbridges’, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 8, no. 4, pp. 422–433, Oct. 2015, doi: 10.3844/ajeassp.2015.422.433.
- [40] F. Venuti and L. Bruno, ‘Crowd-structure interaction in lively footbridges under synchronous lateral excitation: A literature review’, *Physics of Life Reviews*, vol. 6, no. 3. pp. 176–206, Sep. 2009. doi: 10.1016/j.plrev.2009.07.001.
- [41] V. Racic, A. Pavic, and J. M. W. Brownjohn, ‘Experimental identification and analytical modelling of human walking forces: Literature review’, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 326, no. 1–2. pp. 1–49, Sep. 25, 2009. doi: 10.1016/j.jsv.2009.04.020.
- [42] C. A. Jones, P. Reynolds, and A. Pavic, ‘Vibration serviceability of stadia structures subjected to dynamic crowd loads: A literature review’, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 330, no. 8. pp. 1531–1566, Apr. 11, 2011. doi: 10.1016/j.jsv.2010.10.032.
- [43] V. Racic, A. Pavic, and J. M. W. Brownjohn, ‘Modern facilities for experimental measurement of dynamic loads induced by humans: A literature review’, *Shock and Vibration*, vol. 20, no. 1, pp. 53–67, 2013, doi: 10.3233/SAV-2012-0727.
- [44] A. Pavic, J. Mark, and W. Brownjohn, ‘Human-Structure Dynamic Interaction in Civil Engineering Dynamics: A Literature Review Related papers Sensing and Monitoring for Stadium Structures: A Review of Recent Advances and a Forward... Onur Avcı Vibration Excitation and Control of a Pedestrian Walkway by Individuals and Crowds’.
- [45] B. Wolmuth and J. Surtees, ‘Crowd-related failure of bridges’, in *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*, 2003, vol. 156, no. 3, pp. 116–123.
- [46] R. Stevenson, *Description of bridges of suspension*. A. Constable, 1821.
- [47] SUN, Limin; YUAN, X. Study on pedestrian-induced vibration of footbridge. Proceedings of Footbridge, 2008.

- [48] Bursi, Oreste S., Enrico Cazzador, and Alessia Ussia. "Probabilistic analysis of a twin deck curved cable-stayed footbridge subjected to multiple inputs and corrosion." *Engineering structures* 105 (2015): 87-98.
- [49] O. Bursi, A. Zasso, A. Bonelli, L. Vulcan, M. Bonora, and S. Santini, 'Dynamic Analysis and Vibration Control of the Twin Deck Curved Suspension Foot/Cycle Bridge' "Ponte Del Mare", in *Third International Conference Footbridge 2008*, 2008, pp. 1–7.
- [50] I. D. Ainsworth and P. A. Burnton, 'More than just a pedestrian link-The Goodwill Bridge, Brisbane'.
- [51] K. van Nimmen, J. van Hauwermeiren, and P. van den Broeck, 'Eeklo Footbridge: Benchmark Dataset on Pedestrian-Induced Vibrations', *Journal of Bridge Engineering*, vol. 26, no. 7, Jul. 2021, doi: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0001707.
- [52] Bachmann, Hugo. "Case studies of structures with man-induced vibrations." *Journal of Structural Engineering* 118.3 (1992): 631-647.
- [53] Q. Zhu, W. Yang, Q. Zhang, and Y. Du, 'A hybrid vibration mitigation method based on the crowd flow control and tuned mass damper on a footbridge', *Eng Struct*, vol. 245, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112972.
- [54] E. Ahmadi, C. Caprani, S. Živanović, and A. Heidarpour, 'Assessment of human-structure interaction on a lively lightweight GFRP footbridge', *Eng Struct*, vol. 199, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109687.
- [55] E. Shahabpoor, A. Pavic, V. Racic, and S. Zivanovic, 'Effect of group walking traffic on dynamic properties of pedestrian structures', *J Sound Vib*, vol. 387, pp. 207–225, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.jsv.2016.10.017.
- [56] Newland, David E. "Pedestrian excitation of bridges—recent results." *tenth international congress on sound and vibration*. 2003.
- [57] X. Wei, J. C. Liu, and S. Bi, 'Uncertainty quantification and propagation of crowd behaviour effects on pedestrian-induced vibrations of footbridges', *Mech Syst Signal Process*, vol. 167, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.ymssp.2021.108557.
- [58] C. A. Barrera-Vargas, J. Naranjo-Pérez, I. M. Díaz, and J. H. García-Palacios, 'Design of a Semiactive TMD for Lightweight Pedestrian Structures Considering Human–Structure–Actuator Interaction', *Actuators*, vol. 11, no. 4, Apr. 2022, doi: 10.3390/act11040101.
- [59] F. Tubino, 'Probabilistic assessment of the dynamic interaction between multiple pedestrians and vertical vibrations of footbridges', *J Sound Vib*, vol. 417, pp. 80–96, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.jsv.2017.11.057.

- [60] M. Bocian, J. H. G. Macdonald, J. F. Burn, and D. Redmill, ‘Experimental identification of the behaviour of and lateral forces from freely-walking pedestrians on laterally oscillating structures in a virtual reality environment’, *Eng Struct*, vol. 105, pp. 62–76, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.engstruct.2015.09.043.
- [61] L. Bruno, A. Tosin, P. Tricerri, and F. Venuti, ‘Non-local first-order modelling of crowd dynamics: A multidimensional framework with applications’, *Appl Math Model*, vol. 35, no. 1, pp. 426–445, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.apm.2010.07.007.
- [62] V. Racic and J. M. W. Brownjohn, ‘Stochastic model of near-periodic vertical loads due to humans walking’, *Advanced Engineering Informatics*, vol. 25, no. 2, pp. 259–275, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.aei.2010.07.004.
- [63] S. P. Carroll, J. S. Owen, and M. F. M. Hussein, ‘A coupled biomechanical/discrete element crowd model of crowd-bridge dynamic interaction and application to the Clifton Suspension Bridge’, *Eng Struct*, vol. 49, pp. 58–75, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.engstruct.2012.10.020.
- [64] S. P. Carroll, J. S. Owen, and M. F. M. Hussein, ‘Reproduction of lateral ground reaction forces from visual marker data and analysis of balance response while walking on a laterally oscillating deck’, *Eng Struct*, vol. 49, pp. 1034–1047, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.engstruct.2012.12.028.
- [65] E. Ahmadi, C. Caprani, S. Živanović, and A. Heidarpour, ‘Vertical ground reaction forces on rigid and vibrating surfaces for vibration serviceability assessment of structures’, *Eng Struct*, vol. 172, pp. 723–738, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.06.059.
- [66] E. Ahmadi, C. Caprani, S. Živanović, N. Evans, and A. Heidarpour, ‘A framework for quantification of human-structure interaction in vertical direction’, *J Sound Vib*, vol. 432, pp. 351–372, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.jsv.2018.06.054.
- [67] F. Lucà, M. Berardengo, S. Manzoni, M. Vanali, and L. Drago, ‘Human-structure interaction: convolution-based estimation of human-induced vibrations using experimental data’, *Mech Syst Signal Process*, vol. 167, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.ymssp.2021.108511.
- [68] Z. Chen, S. Chen, X. Ye, and Y. Zhou, ‘A study on a mechanism of lateral pedestrian-footbridge interaction’, *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 23, Dec. 2019, doi: 10.3390/app9235257.
- [69] E. Thór, I. Ph, and . D Thesis, ‘Pedestrian-induced lateral vibrations of footbridges Experimental studies and probabilistic modelling’, 2011.
- [70] M. des Transports, du Tourisme, and de la Mer, ‘Sétra Footbridges Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading’, 2006. [Online]. Available: <http://www.afgc.asso.fr>

- [71] E. Shahabpoor and A. Pavic, ‘Comparative evaluation of current pedestrian traffic models on structures’, in *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 2012, vol. 1, pp. 41–52. doi: 10.1007/978-1-4614-2413-0_5.
- [72] C. Caprani, J. Qu, S. Zivanovic, N. Evans, and E. Ahmadi, ‘Quantification of human-structure interaction’, doi: 10.1051/C.
- [73] Q. An, Z. Chen, Q. Ren, H. Liu, and X. Yan, ‘Control of human-induced vibration of an innovative CSBS-CSCFS’, *J Constr Steel Res*, vol. 115, pp. 359–371, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.jcsr.2015.08.030.
- [74] H. V. Dang and S. Živanović, ‘Influence of Low-Frequency Vertical Vibration on Walking Locomotion’, *Journal of Structural Engineering*, vol. 142, no. 12, Dec. 2016, doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001599.
- [75] G. Piccardo and F. Tubino, ‘Parametric resonance of flexible footbridges under crowd-induced lateral excitation’, *J Sound Vib*, vol. 311, no. 1–2, pp. 353–371, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.jsv.2007.09.008.
- [76] K. van Nimmen, A. Pavic, and P. van den Broeck, ‘A simplified method to account for vertical human-structure interaction’, *Structures*, vol. 32, pp. 2004–2019, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.istruc.2021.03.090.
- [77] J. Xiong, J. Chen, and C. Caprani, ‘Synchronization of energy transmission networks at low voltage levels’, *Appl Math Model*, vol. 89, pp. 610–626, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.apm.2020.07.030.
- [78] H. Yang, B. Wu, J. Li, Y. Bao, and G. Xu, ‘A spring-loaded inverted pendulum model for analysis of human-structure interaction on vibrating surfaces’, *J Sound Vib*, vol. 522, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.jsv.2021.116727.
- [79] H. Wang, Z. Zhang, and J. Chen, ‘Prediction of structural responses induced by single-person jumping through a physical principle based on transfer functions’, *Advances in Structural Engineering*, vol. 25, no. 1, pp. 146–157, Jan. 2022, doi: 10.1177/13694332211046343.
- [80] K. Lievens, G. Lombaert, K. van Nimmen, G. de Roeck, and P. van den Broeck, ‘Robust vibration serviceability assessment of footbridges subjected to pedestrian excitation: strategy and applications’, *Eng Struct*, vol. 171, pp. 236–246, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.05.047.
- [81] M. Bocian *et al.*, ‘Time-dependent spectral analysis of interactions within groups of walking pedestrians and vertical structural motion using wavelets’, *Mech Syst Signal Process*, vol. 105, pp. 502–523, May 2018, doi: 10.1016/j.ymssp.2017.12.020.

- [82] D. Zhou, H. Han, T. Ji, and X. Xu, ‘Comparison of two models for human-structure interaction’, *Appl Math Model*, vol. 40, no. 5–6, pp. 3738–3748, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.apm.2015.10.049.
- [83] K. van Nimmen, G. Lombaert, G. de Roeck, and P. van den Broeck, ‘Human-induced vibrations of footbridges: The effect of vertical human-structure interaction’, in *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, vol. 4, Springer New York LLC, 2016, pp. 299–307. doi: 10.1007/978-3-319-29763-7_29.
- [84] J. W. Qin, S. S. Law, Q. S. Yang, and N. Yang, ‘Pedestrian-bridge dynamic interaction, including human participation’, *J Sound Vib*, vol. 332, no. 4, pp. 1107–1124, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.jsv.2012.09.021.
- [85] F. Tubino, ‘Human-structure interaction in pedestrian bridges: A probabilistic approach’, in *Procedia Engineering*, 2017, vol. 199, pp. 2883–2888. doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.584.
- [86] S. Živanović, ‘Benchmark Footbridge for Vibration Serviceability Assessment under the Vertical Component of Pedestrian Load’, *Journal of Structural Engineering*, vol. 138, no. 10, pp. 1193–1202, Oct. 2012, doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0000571.
- [87] K. van Nimmen, K. Maes, S. Živanović, G. Lombaert, G. de Roeck, and P. van den Broeck, ‘Identification and modelling of vertical human-structure interaction’, in *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 2015, vol. 2, pp. 319–330. doi: 10.1007/978-3-319-15248-6_34.
- [88] D. Claff, M. S. Williams, and A. Blakeborough, ‘The kinematics and kinetics of pedestrians on a laterally swaying footbridge’, *J Sound Vib*, vol. 407, pp. 286–308, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.jsv.2017.06.036.
- [89] E. Bassoli, K. van Nimmen, L. Vincenzi, and P. van den Broeck, ‘A spectral load model for pedestrian excitation including vertical human-structure interaction’, *Eng Struct*, vol. 156, pp. 537–547, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.11.050.
- [90] J. F. Jiménez-Alonso, A. Sáez, E. Caetano, and A. Cunha, ‘A crowd-structure interaction model to analyze the lateral lock-in phenomenon on footbridges’, *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, vol. 6, no. 4, pp. 764–771, 2018, doi: 10.2495/CMEM-V6-N4-764-771.
- [91] E. Ahmadi, C. Caprani, S. Živanović, and A. Heidarpour, ‘Experimental validation of moving spring-mass-damper model for human-structure interaction in the presence of vertical vibration’, *Structures*, vol. 29, pp. 1274–1285, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.istruc.2020.12.007.

- [92] C. Bedon, ‘Experimental investigation on vibration sensitivity of an indoor glass footbridge to walking conditions’, *Journal of Building Engineering*, vol. 29, May 2020, doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101195.
- [93] J. M. Russell, X. Wei, S. Živanović, and C. Kruger, ‘Vibration serviceability of a GFRP railway crossing due to pedestrians and train excitation’, *Eng Struct*, vol. 219, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110756.
- [94] D. Gomez, S. Rietdyk, and S. J. Dyke, ‘Spatio-temporal assessment of gait kinematics in vertical pedestrian-structure interaction’, *Structures*, vol. 31, pp. 1199–1206, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.istruc.2021.02.024.
- [95] E. Shahabpoor, A. Pavic, and V. Racic, ‘Structural vibration serviceability: New design framework featuring human-structure interaction’, *Eng Struct*, vol. 136, pp. 295–311, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.01.030.
- [96] S. Živanović, A. Pavić, and E. T. Ingólfsson, ‘Modeling Spatially Unrestricted Pedestrian Traffic on Footbridges’, *Journal of Structural Engineering*, vol. 136, no. 10, pp. 1296–1308, Oct. 2010, doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0000226.
- [97] S. Živanović and A. Pavić, ‘Quantification of dynamic excitation potential of pedestrian population crossing footbridges’, *Shock and Vibration*, vol. 18, no. 4, pp. 563–577, 2011, doi: 10.3233/SAV-2010-0562.
- [98] E. T. Ingólfsson, C. T. Georgakis, F. Ricciardelli, and J. Jönsson, ‘Experimental identification of pedestrian-induced lateral forces on footbridges’, *J Sound Vib*, vol. 330, no. 6, pp. 1265–1284, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.jsv.2010.09.034.
- [99] J. Fernando Jiménez-Alonso, A. Saez, E. Caetano, and A. Cunha, ‘Proposal and calibration of an human-structure interaction biomechanical model by the resolution of the inverse dynamic problem’, 2014.
- [100] M. García-Diéguez and J. L. Zapico-Valle, ‘Statistical modelling of spatiotemporal variability of overground walking’, *Mech Syst Signal Process*, vol. 129, pp. 186–200, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.ymssp.2019.04.033.
- [101] Lippert, Stanley. Human response to vertical vibration. No. 460038. SAE Technical Paper, 1946.
- [102] Griffin, Michael J., and John Erdreich. "Handbook of human vibration." (1991): 2213-2213.
- [103] R. H. Wood, ‘Some notes on vibrations in structures’, *The Journal of Royal Institute of British Architects, third series*, vol. 55, no. 12, pp. 553–555, 1948.
- [104] H. Bachmann, A. J. Pretlove, and H. Rainer, ‘Dynamic forces from rhythmical human body motions’, *Vibration problems in structures: Practical guidelines*, 1995.

- [105] H. Bachmann, 'Practical cases of structures with man-induced vibrations', in *Proceedings of the Symposium/Workshop on Serviceability of Buildings (Movements, Deformations, Vibrations)*, 1988, vol. 1, pp. 419–434.
- [106] R. T. Jones and A. J. Pretlove, 'TWO CASE STUDIES IN THE USE OF TUNED VIBRATION ABSORBERS ON FOOT BRIDGES', *Structural Engineer. Part B*, vol. 59, no. 2, 1981.
- [107] S. M. Gaawan and A. S. El-Robaa, 'Pedestrian bridges structure; Assessment of comfort and impact of human-induced vibration', *Bridge Structures*, vol. 15, no. 1–2, pp. 3–13, 2019, doi: 10.3233/BRS-190148.
- [108] E. Lai and M. G. Mulas, 'A MSD model for coupled analysis of pedestrian-footbridge dynamic interaction', in *Procedia Engineering*, 2017, vol. 199, pp. 2864–2870. doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.568.
- [109] H. Bachmann, 'Case studies of structures with man-induced vibrations', *Journal of Structural Engineering*, vol. 118, no. 3, pp. 631–647, 1992.
- [110] H. Bachmann and W. Ammann, *Vibrations in structures: induced by man and machines*, vol. 3. Iabse, 1987.
- [111] F. Walley, 'EXTRACT. ST JAMES'S PARK BRIDGE.', *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 12, no. 2, pp. 217–222, 1959.
- [112] Leonard, D. R. "Human tolerance levels for bridge vibrations." (1966).
- [113] Ortiz, Albert Ricardo, Daniel Gómez, and Peter Thomson. "Caracterización del efecto de la interacción Humano-Estructura en el Estadio Olímpico en Cali, Colombia." *Ingeniería e Investigación* 29.1 (2009): 13-23.
- [114] A. S. of C. E. Committee on Deflection Limitations of Bridges of the Structural Division, 'Deflection Limitations of Bridges', *Journal of the Structural Division*, vol. 84, no. 3, pp. 1631–1633, 1958.
- [115] Steel, Concrete, and Composite Bridges-Part. "2: Specification for loads." British Standards Institution (1978).
- [116] 'DESIGN MANUAL FOR ROADS AND BRIDGES DESIGN MANUAL FOR ROADS AND BRIDGES VOLUME 1 SECTION 3 HIGHWAY STRUCTURES : APPROVAL PROCEDURES AND GENERAL DESIGN GENERAL DESIGN PART 14', vol. 1, no. May 2002.
- [117] O. H. B. D. C. OHBDC, 'Highway Engineering Division, 762 Ministry of Transportation and Communication', *Ontario, Canada*, vol. 763, 1983.

- [118] C. E. de Normalisation, ‘Eurocode 5–Design of Timber Structures–Part 2: Bridges, ENV 1995-2’, *Bruxelles, Belgium*, 1996.
- [119] Highways Department. "Structures design manual for highways and railways." (1997).
- [120] A. F. Mason and M. A. G. Duncan, ‘COMPOSITE STEEL AND CONCRETE BRIDGE CONSTRUCTION IN SOUTHERN RHODESIA.’, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 21, no. 4, pp. 785–810, 1962.
- [121] T. Officials, *Highway Safety Design and Operations Guide*, 1997. AASHTO, 1997.
- [122] J. Yoshida, M. Abe, Y. Fujino, and K. Higashiawatoko, ‘Image analysis of human induced lateral vibration of a pedestrian bridge’, in *Proceedings of the International Conference on the Design and Dynamic Behaviour of Footbridges*, 2002, pp. 20–22.
- [123] R. L. Pimentel, A. Pavic, and P. Waldron, ‘Evaluation of design requirements for footbridges excited by vertical forces from walking’, *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 28, no. 5, pp. 769–777, 2001.
- [124] SETRA, ‘Footbridges - Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading’, no. october, p. 127, 2006.
- [125] C. Heinemeyer and M. Feldmann, ‘European design guide for footbridge vibration’, in *Footbridge vibration design*, CRC Press, 2009, pp. 13–30.
- [126] C. Butz *et al.*, ‘Design of Footbridges-Guidelines and background document’, *HIVOSS, rFS2-CT-2007-00033*, 2007.
- [127] C. Heinemeyer *et al.*, *Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations*, vol. 3, no. May. 2009.
- [128] C. Barker, ‘Footbridge Pedestrian Vibration Limits Part 3: Background to Response Calculation’, *Proceedings of Footbridge*, 2005.
- [129] C. Barker, ‘Footbridge pedestrian vibration limits background to response calculation’, *International Journal of Space Structures*, vol. 22, no. 1, pp. 35–43, 2007.
- [130] D. Mackenzie, C. BARKER, N. MCFADYEN, and B. ALLISON, ‘Footbridge pedestrian vibration limits-part 2: human sensitivity’, 2005.
- [131] C. BARKER, S. DeNEUMANN, D. MacKENZIE, and R. KO, ‘Footbridge pedestrian vibration limits-Part 1: pedestrian input’, 2005.
- [132] C. C. Caprani and E. Ahmadi, ‘Formulation of human–structure interaction system models for vertical vibration’, *J Sound Vib*, vol. 377, pp. 346–367, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.jsv.2016.05.015.

- [133] F. Venuti, V. Racic, and A. Corbetta, ‘Modelling framework for dynamic interaction between multiple pedestrians and vertical vibrations of footbridges’, *J Sound Vib*, vol. 379, pp. 245–263, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.jsv.2016.05.047.
- [134] H. Liang, W. Xie, P. Wei, D. Ai, and Z. Zhang, ‘Identification of dynamic parameters of pedestrian walking model based on a coupled pedestrian–structure system’, *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 14, Jul. 2021, doi: 10.3390/app11146407.
- [135] Pfeil, Michèle Schubert, Wendell Diniz Varela, and Natasha de Paula Amador da Costa. "Experimental calibration of a one degree of freedom biodynamic model to simulate human walking-structure interaction." *Engineering Structures* 262 (2022): 114330.
- [136] Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia–MAVDT, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, 2010
- [137] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica–AIS, Norma Colombiana de Diseño de Puentes. Comité AIS-200, 2014.
- [138] S. Castellanos-Toro, M. Marmolejo, J. Marulanda, A. Cruz, and P. Thomson, ‘Frequencies and damping ratios of bridges through Operational Modal Analysis using smartphones’, *Constr Build Mater*, vol. 188, pp. 490–504, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.089.
- [139] A. E. Rodríguez-Suesca, O. J. Gutiérrez-Junco, and E. Hernández-Montes, ‘Vibration performance assessment of deteriorating footbridges: A study of Tunja’s public footbridges’, *Eng Struct*, vol. 256, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.113997.
- [140] M. A. Toso, H. M. Gomes, and J. L. V. de Brito, ‘Crowd-structure interaction: Investigating the spatiality and synchronization of a pedestrian force model’, *J Constr Steel Res*, vol. 133, pp. 510–521, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.jcsr.2017.03.007.
- [141] P. Hawryszków, R. Pimentel, R. Silva, and F. Silva, ‘Vertical vibrations of footbridges due to group loading: Effect of pedestrian–structure interaction’, *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 4, pp. 1–16, Feb. 2021, doi: 10.3390/app11041355.
- [142] R. L. Silva, R. L. Pimentel, and A. Pavic, ‘Performance of biodynamic models to represent the action of a pedestrian in the vertical direction’, in *Proceedings of the International Conference on Structural Dynamic , EURODYN*, 2020, vol. 1, pp. 1824–1834. doi: 10.47964/1120.9147.19289.
- [143] C. Ramos-Moreno, A. M. Ruiz-Teran, and P. J. Stafford, ‘Impact of stochastic representations of pedestrian actions on serviceability response’, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Bridge Engineering*, vol. 174, no. 2, pp. 113–128, Jun. 2021, doi: 10.1680/jbren.19.00050.

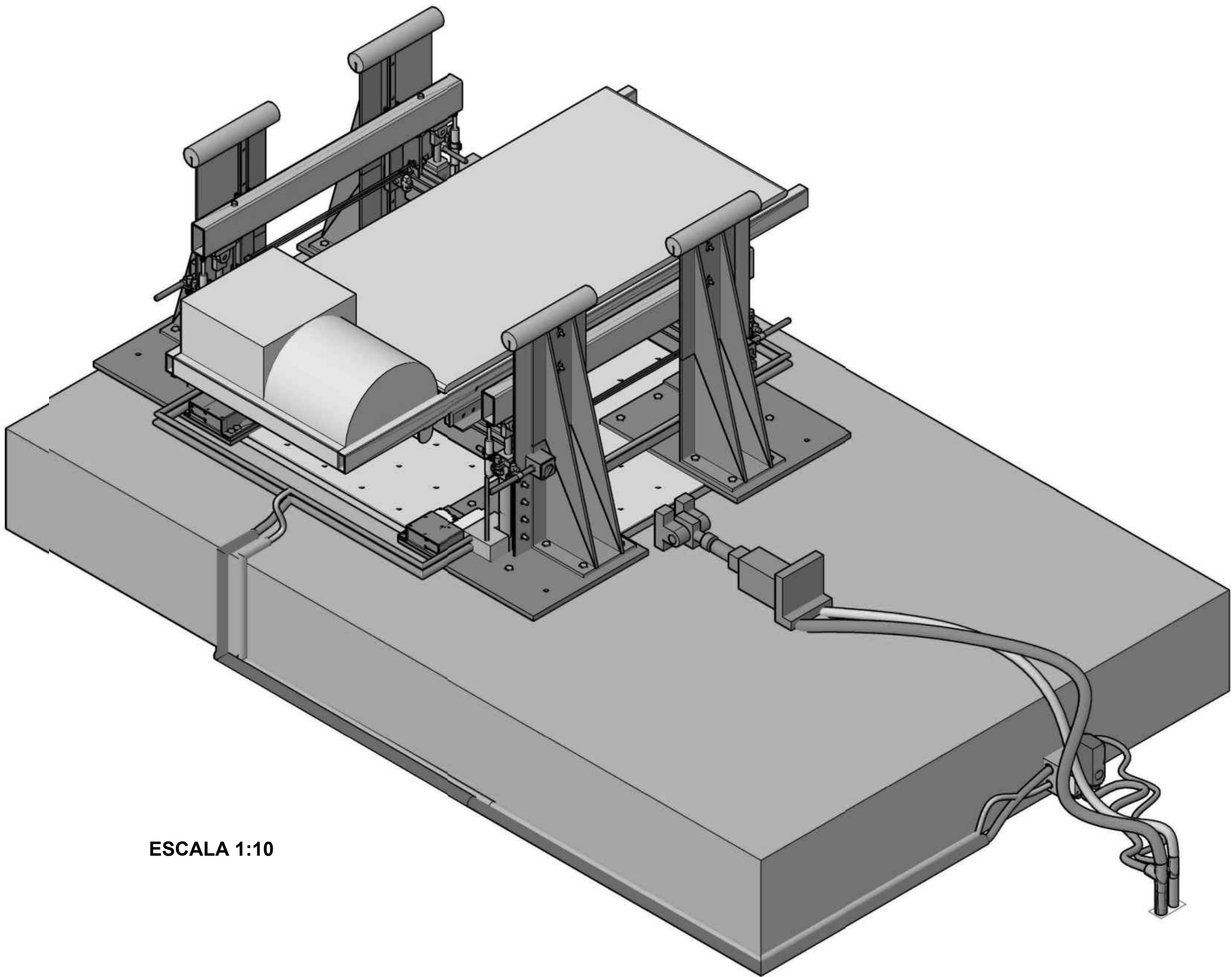
- [144] Lippert, Stanley. Human response to vertical vibration. No. 460038. SAE Technical Paper, 1946.
- [145] F. W. Galbraith and M. v Barton, 'Ground loading from footsteps', *J Acoust Soc Am*, vol. 48, no. 5B, pp. 1288–1292, 1970.
- [146] T. P. Andriacchi J A Ogle, 'WALKING SPEED AS A BASIS FOR NORMAL AND ABNORMAL GAIT MEASUREMENTS*', 1917.
- [147] H. Bachmann, 'Lively footbridges-a real challenge', in *Proceedings of the International Conference on the Design and Dynamic Behaviour of footbridges*, 2002, pp. 20–22.
- [148] H. Bachmann *et al.*, *Vibration problems in structures: practical guidelines*. Springer Science & Business Media, 1995.
- [149] Dziuba, P., et al. "La passerelle Solférino comportement dynamique (dynamic behaviour of the Solférino bridge)." *Bulletin Ouvrages Métalliques* 1 (2001): 34-57.
- [150] DZIUBA, P. "LA PASSERELLE SOLFERINO-36EME PONT DE PARIS." *Travaux* 760 (2000).
- [151] A. Gheitasi, O. E. Ozbulut, S. Usmani, M. Alipour, and D. K. Harris, 'Experimental and analytical vibration serviceability assessment of an in-service footbridge', *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 6, pp. 79–88, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.csndt.2016.11.001.
- [152] W. Schutte, M. Sousamli, C. B. M. C. Blom, and M. Attahiri, 'UHPC pedestrian bridges and measured human induced vibrations', in *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet - Proceedings of the 2017 fib Symposium*, 2017, pp. 1522–1529. doi: 10.1007/978-3-319-59471-2_175.
- [153] M. Setareh, 'Vibration Serviceability Issues of Slender Footbridges', *Journal of Bridge Engineering*, vol. 21, no. 11, Nov. 2016, doi: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0000951.
- [154] M. Setareh, M. Asce, and S. Gan, 'Vibration Testing, Analysis, and Human-Structure Interaction Studies of a Slender Footbridge', 2018, doi: 10.1061/(ASCE).
- [155] C. E. Silva, D. Gomez, A. Maghareh, S. J. Dyke, and B. F. Spencer, 'Benchmark control problem for real-time hybrid simulation', *Mech Syst Signal Process*, vol. 135, p. 106381, 2020, doi: 10.1016/j.ymssp.2019.106381.
- [156] P. Dey, S. Narasimhan, and S. Walbridge, 'Evaluation of Design Guidelines for the Serviceability Assessment of Aluminum Pedestrian Bridges', *Journal of Bridge Engineering*, vol. 22, no. 1, Jan. 2017, doi: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0000983.

- [157] E. J. Hudson and P. Reynolds, ‘Design and Construction of a Reconfigurable Pedestrian Structure’, *Exp Tech*, vol. 41, no. 2, pp. 203–214, Apr. 2017, doi: 10.1007/s40799-016-0144-3.
- [158] X. Wei, P. van den Broeck, G. de Roeck, and K. van Nimmen, ‘A simplified method to account for the effect of human-human interaction on the pedestrian-induced vibrations of footbridges’, in *Procedia Engineering*, 2017, vol. 199, pp. 2907–2912. doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.331.
- [159] A. Firus, R. Kemmler, H. Berthold, S. Lorenzen, and J. Schneider, ‘A time domain method for reconstruction of pedestrian induced loads on vibrating structures’, *Mech Syst Signal Process*, vol. 171, May 2022, doi: 10.1016/j.ymssp.2022.108887.
- [160] S. Gómez Molina, ‘EVALUACIÓN DE MODELOS DE INTERACCIÓN HUMANO-ESTRUCTURA Y ESTRATEGIAS DE CONTROL ESTRUCTURAL A TRAVES DE UN PROBLEMA DE REFERENCIA PROYECTO DE GRADO PRESENTADO A LA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA’.
- [161] C. Gallegos-Calderón, J. Naranjo-Pérez, I. M. Díaz, and J. M. Goicolea, ‘Identification of a human-structure interaction model on an ultra-lightweight FRP footbridge’, *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 14, Jul. 2021, doi: 10.3390/app11146654.
- [162] C. Gallegos-Calderón, J. Naranjo-Pérez, M. G. D. Pulido, I. M. Díaz, and M. G. D. Pulido, ‘Design, construction and structural response of a lightweight FRP footbridge’, in *IABSE Congress, Ghent 2021: Structural Engineering for Future Societal Needs*, 2021, pp. 2053–2061. doi: 10.2749/ghent.2021.2053.
- [163] P. van den Broeck, J. van Hauwermeiren, and K. van Nimmen, ‘An open access benchmark dataset on pedestrian-induced vibrations collected on the eeklo footbridge’, in *Proceedings of the International Conference on Structural Dynamic, EUROLYN*, 2020, vol. 1, pp. 1866–1873. doi: 10.47964/1120.9151.20003.
- [164] Reiher, H., and F. J. Meister. "Die empfindlichkeit des menschen gegen erschütterungen." *Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A* 2.11 (1931): 381-386.
- [165] B. A. Ebrahimpour, A. Member, A. Hamam, R. L. Sack, and W. N. Patten, ‘MEASURING AND MODELING DYNAMIC LOADS IMPOSED BY MOVING CROWDS’.
- [166] A. Ebrahimpour, R. L. Sack, W. N. Patten, and A. Hamam, ‘Experimental measurements of dynamic loads imposed by moving crowds’, in *Structures Congress XII*, 1994, pp. 1385–1390.
- [167] C. Butz and G. Sedlacek, ‘Bemessungskonzept für fußgängerinduzierte Brückenschwingungen’, *Stahlbau*, vol. 76, no. 6, pp. 391–400, 2007.

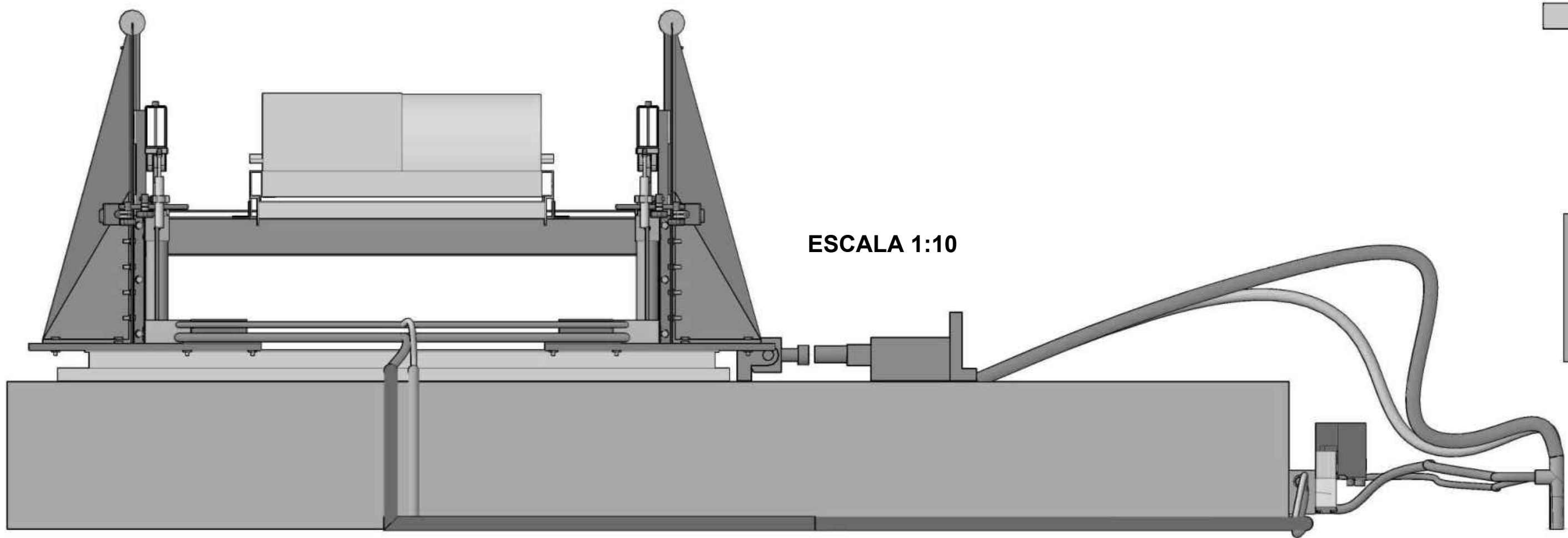
- [168] S. ichi Nakamura, T. Kawasaki, H. Katsuura, and K. Yokoyama, ‘Experimental studies on lateral forces induced by pedestrians’, *J Constr Steel Res*, vol. 64, no. 2, pp. 247–252, Feb. 2008, doi: 10.1016/j.jcsr.2007.05.011.
- [169] ‘PIZZIMENTI, Antonio David. Analisi Sperimentale dei Meccanismi di Eccitazione Laterale delle Passerelle ad Opera dei Pedoni. 2005’.
- [170] M. Bocian, J. F. Burn, J. H. G. Macdonald, and J. M. W. Brownjohn, ‘From phase drift to synchronisation – pedestrian stepping behaviour on laterally oscillating structures and consequences for dynamic stability’, *J Sound Vib*, vol. 392, pp. 382–399, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.jsv.2016.12.022.
- [171] M. Bocian, J. M. W. Brownjohn, V. Racic, D. Hester, A. Quattrone, and R. Monnickendam, ‘A framework for experimental determination of localised vertical pedestrian forces on full-scale structures using wireless attitude and heading reference systems’, *J Sound Vib*, vol. 376, pp. 217–243, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.jsv.2016.05.010.
- [172] Sanz, C. "Cinesiología de la marcha humana normal." *Links* (2006): 1-14.
- [173] Herrero Larrea, Alexandra. Estudio de los parámetros espaciales de la marcha en la población anciana española y su asociación con resultados adversos de salud. Diss. Universitat Internacional de Catalunya, 2017.

ANEXO No.1

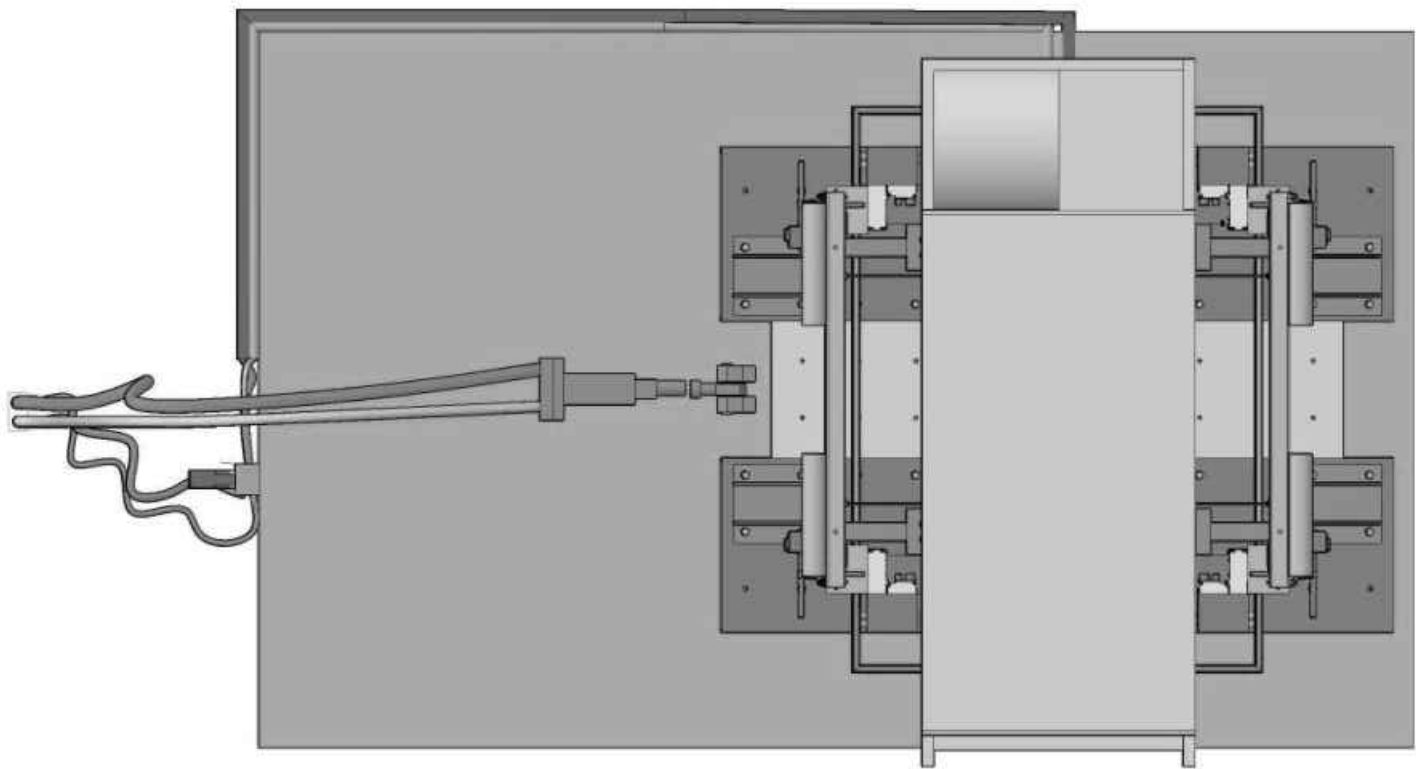
“MONTAJE EXPERIEMNTAL”



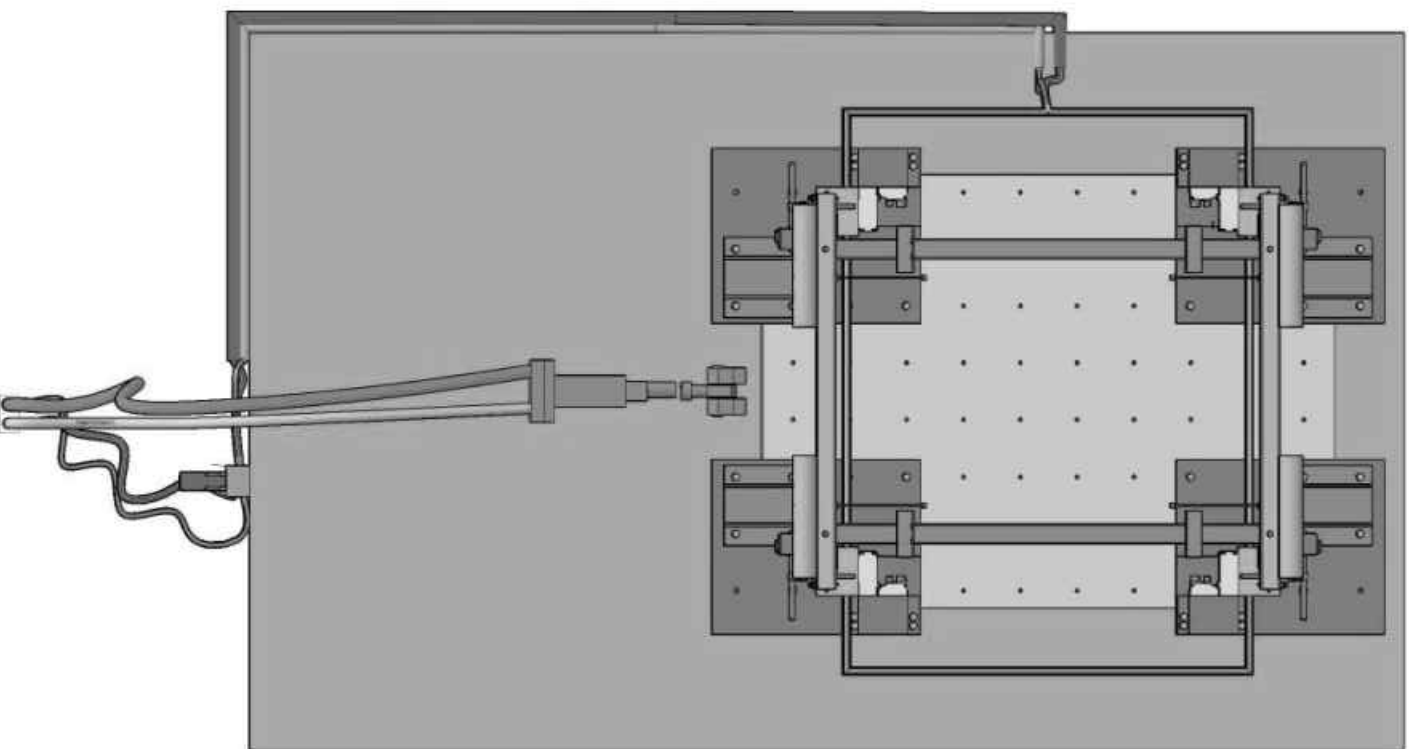
ESCALA 1:10



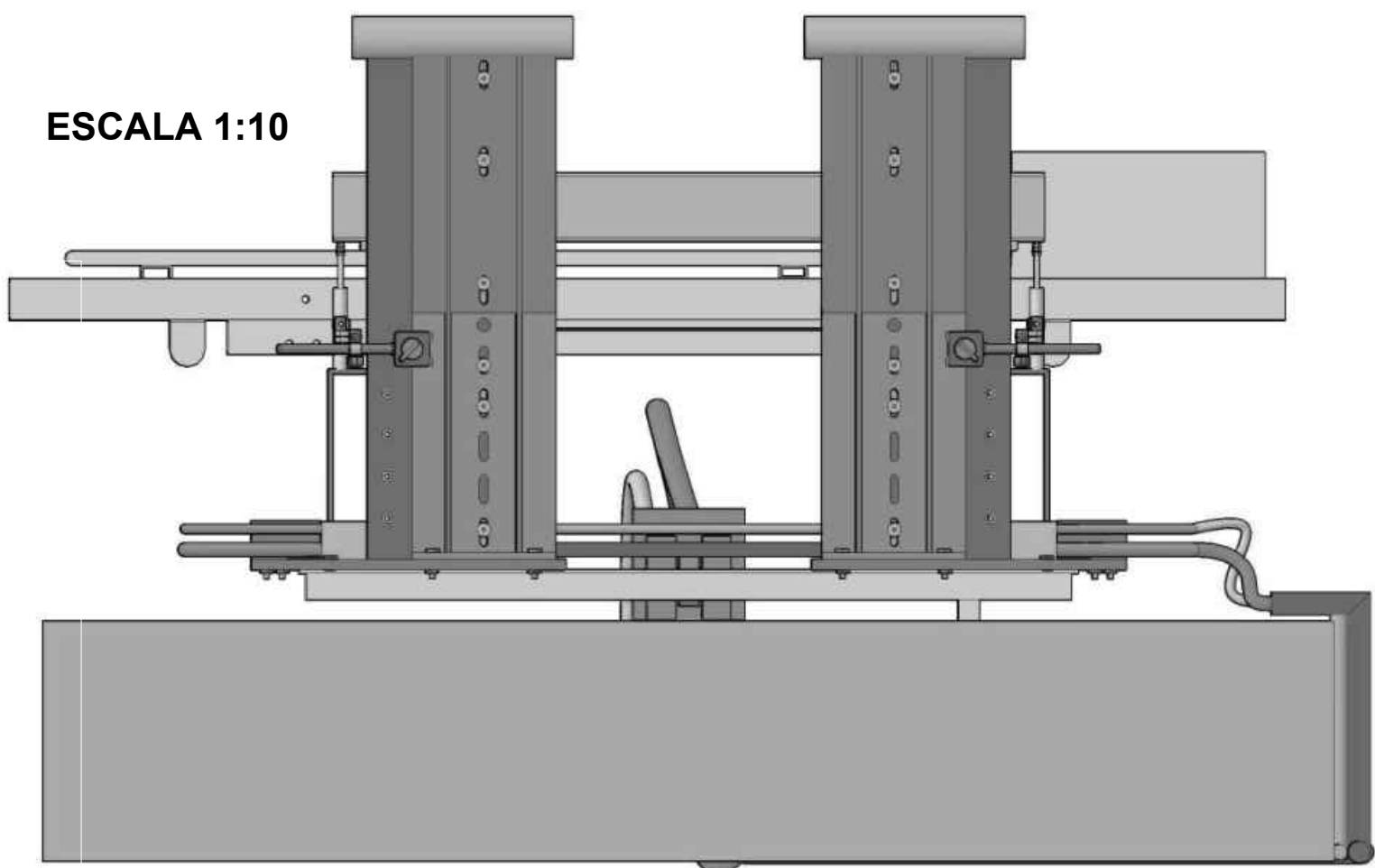
ESCALA 1:10



ESCALA 1:20

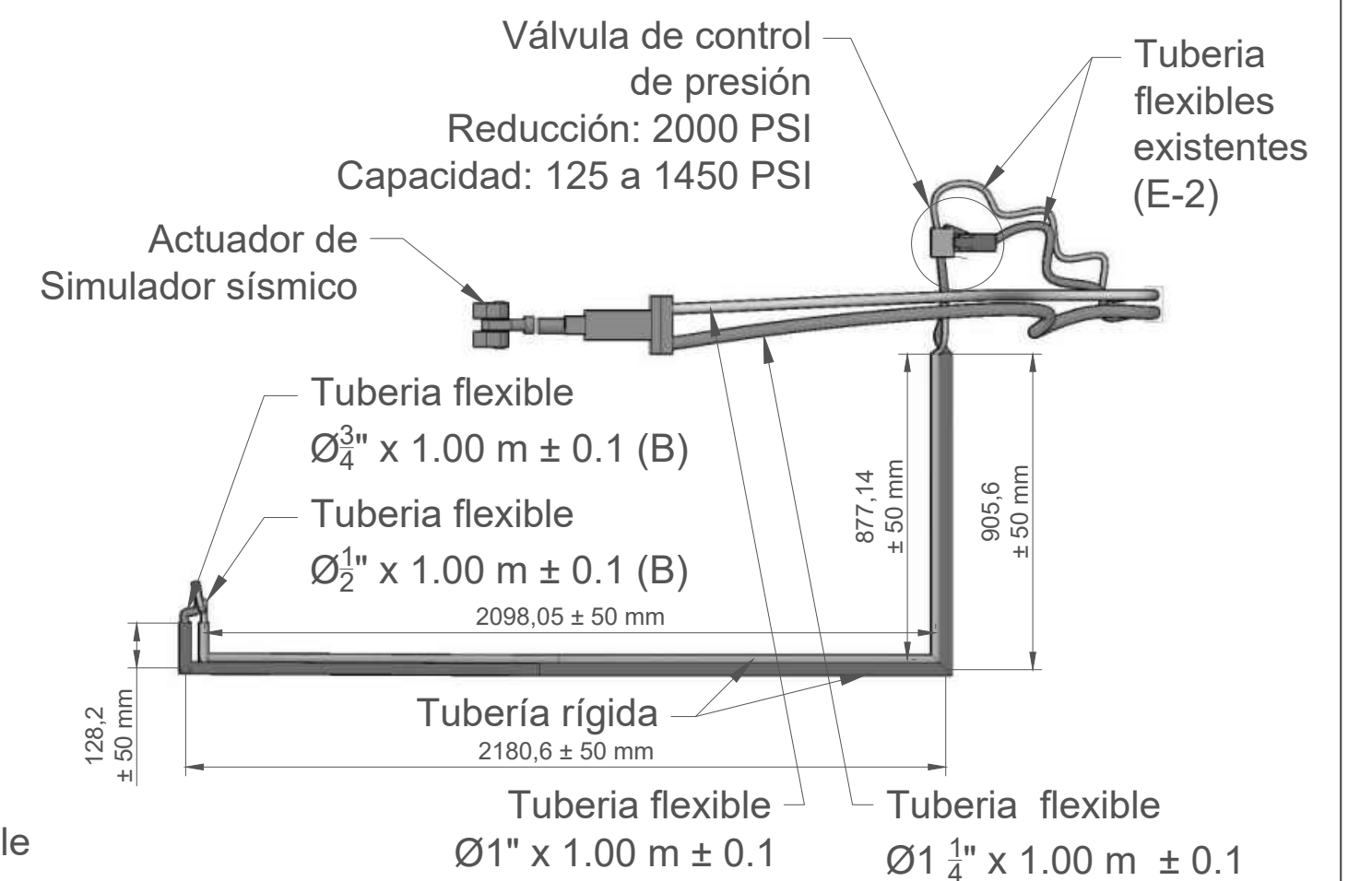
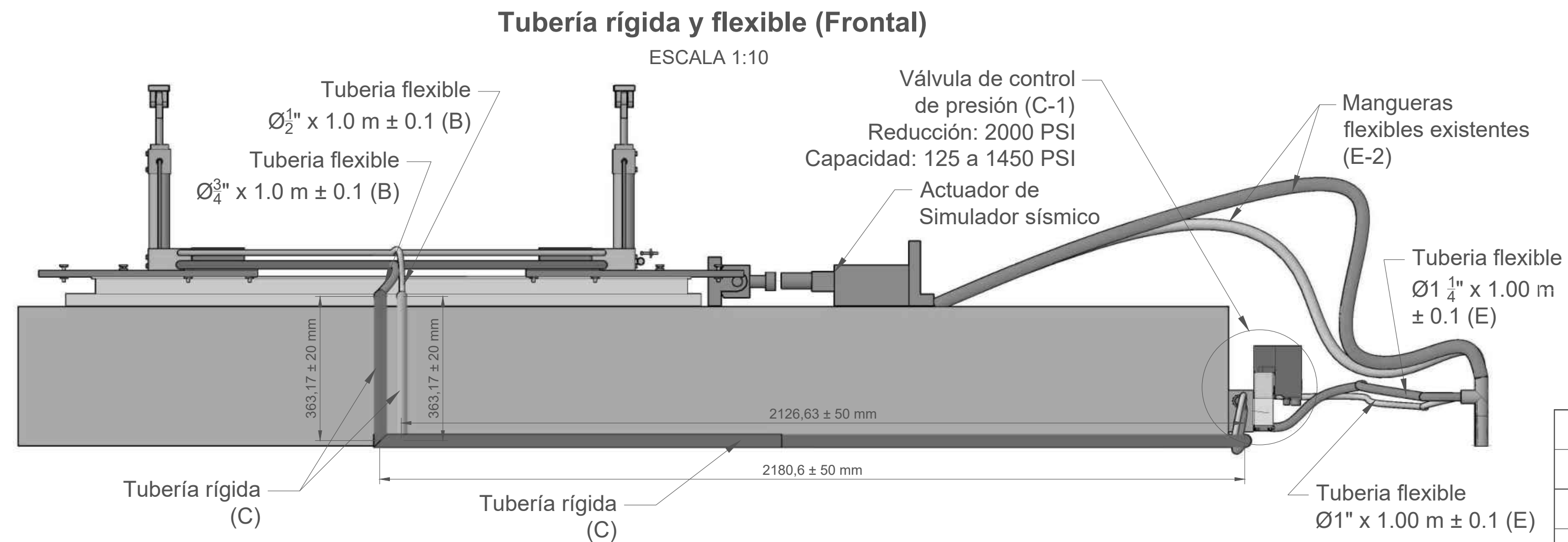
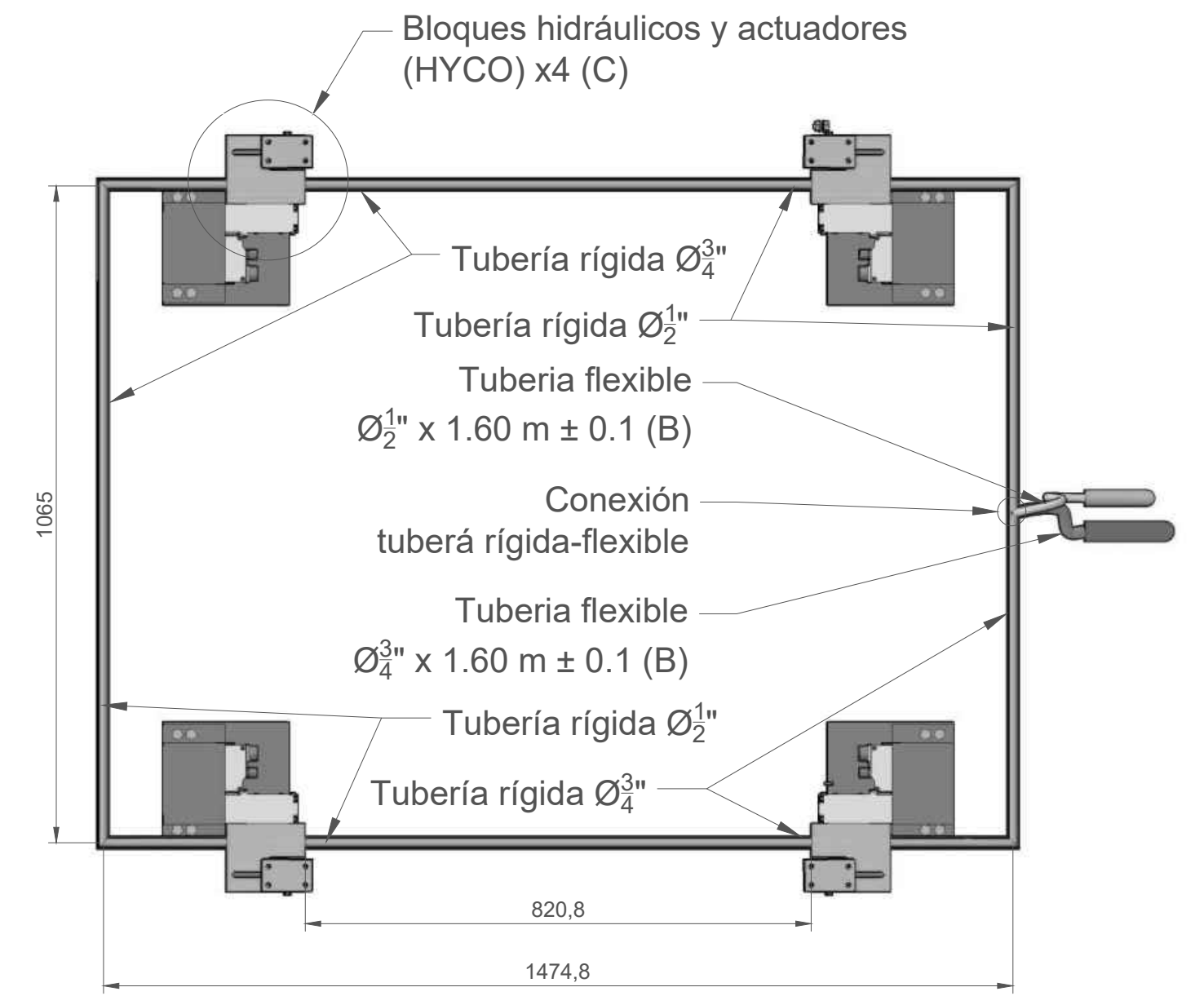
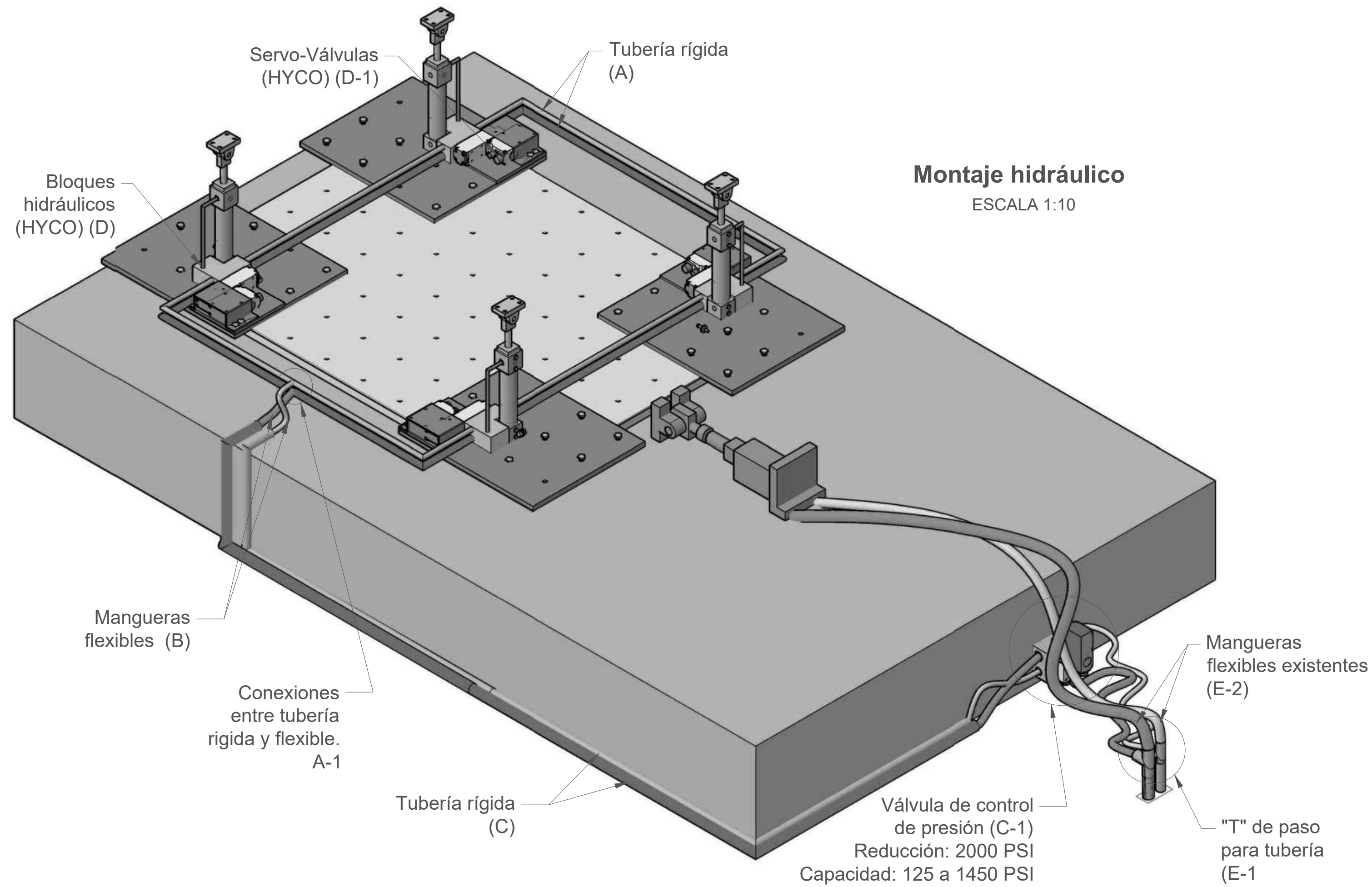


ESCALA 1:20

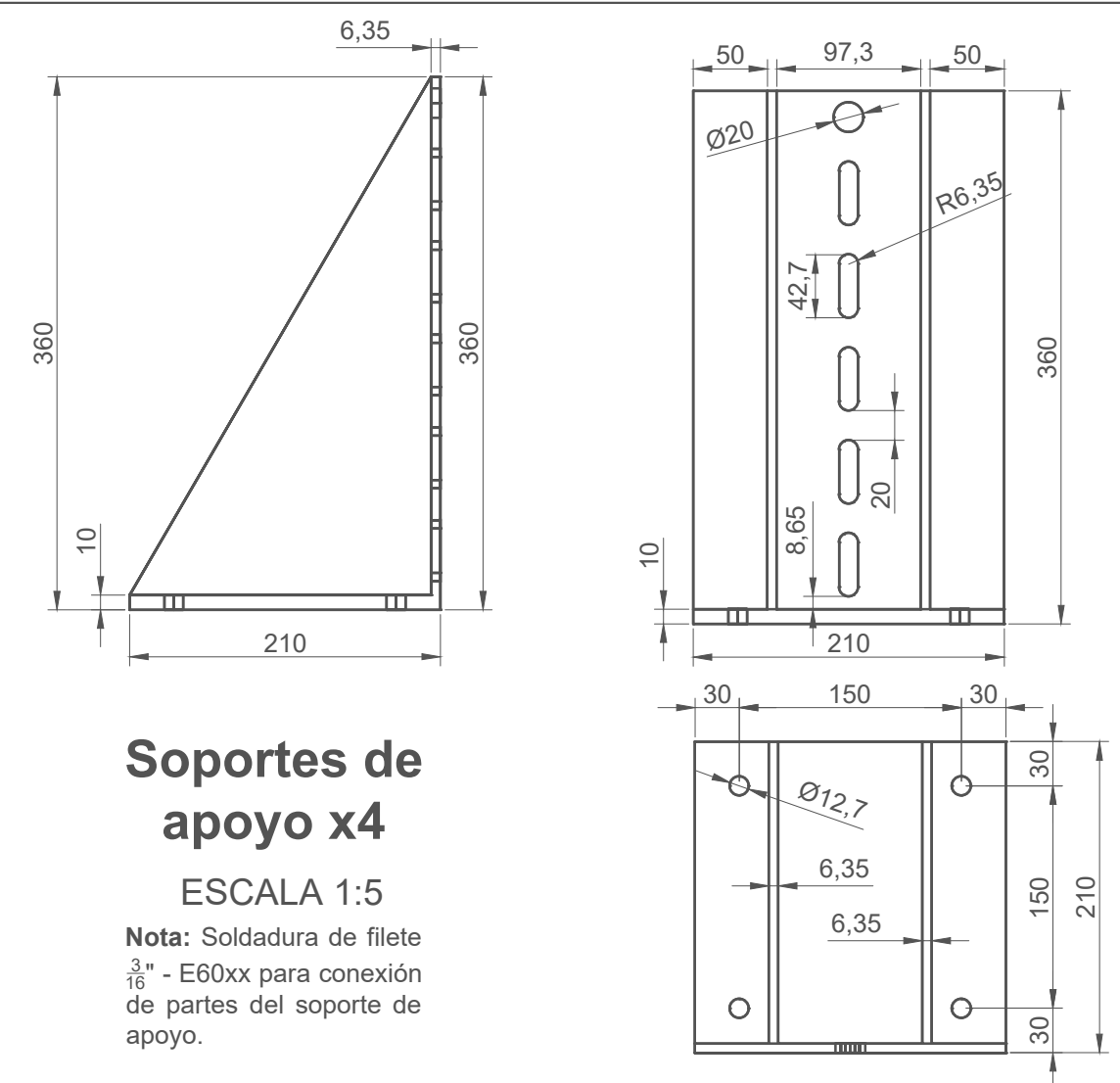


ESCALA 1:10

DIBUJÓ:	BRYAN CASTILLO TORRES	 Universidad del Valle 	ESCALA: Indicada	PLANO No. 1 de 6
DISEÑÓ:	BRYAN CASTILLO TORRES			
REVISÓ:	PROF. PETER THOMSON PH.D			
FECHA:	Agosto 2019			

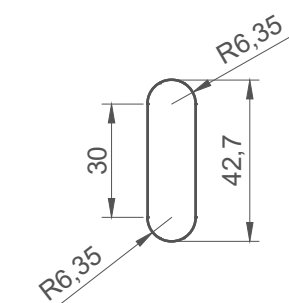


DIBUJÓ:	BRYAN CASTILLO TORRES	 Universidad del Valle 	ESCALA: Indicada	PLANO No. 2 de 6
DISEÑÓ:	BRYAN CASTILLO TORRES			
REVISÓ:	PROF. PETER THOMSON PH.D	Agosto 2019		
FECHA:				

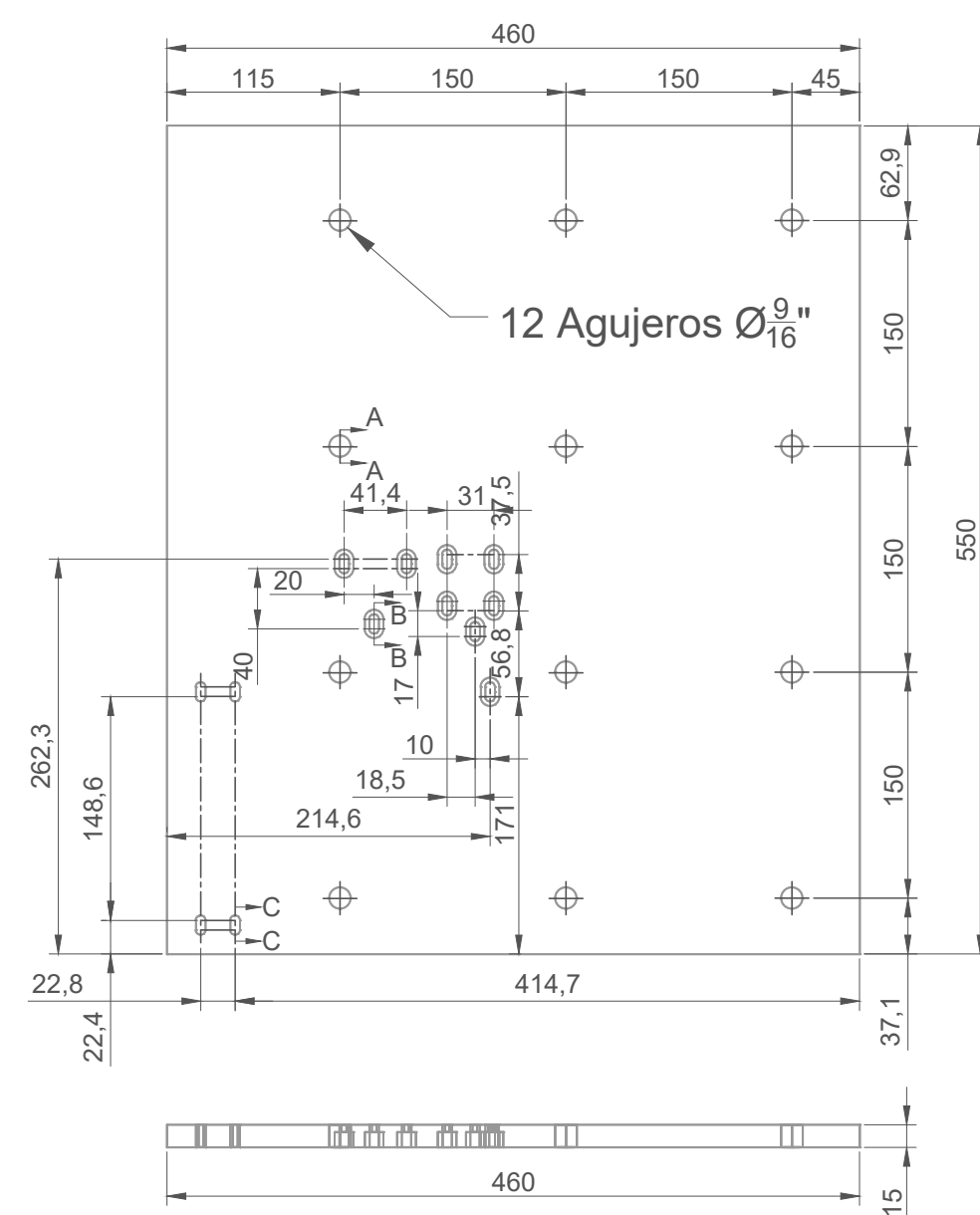
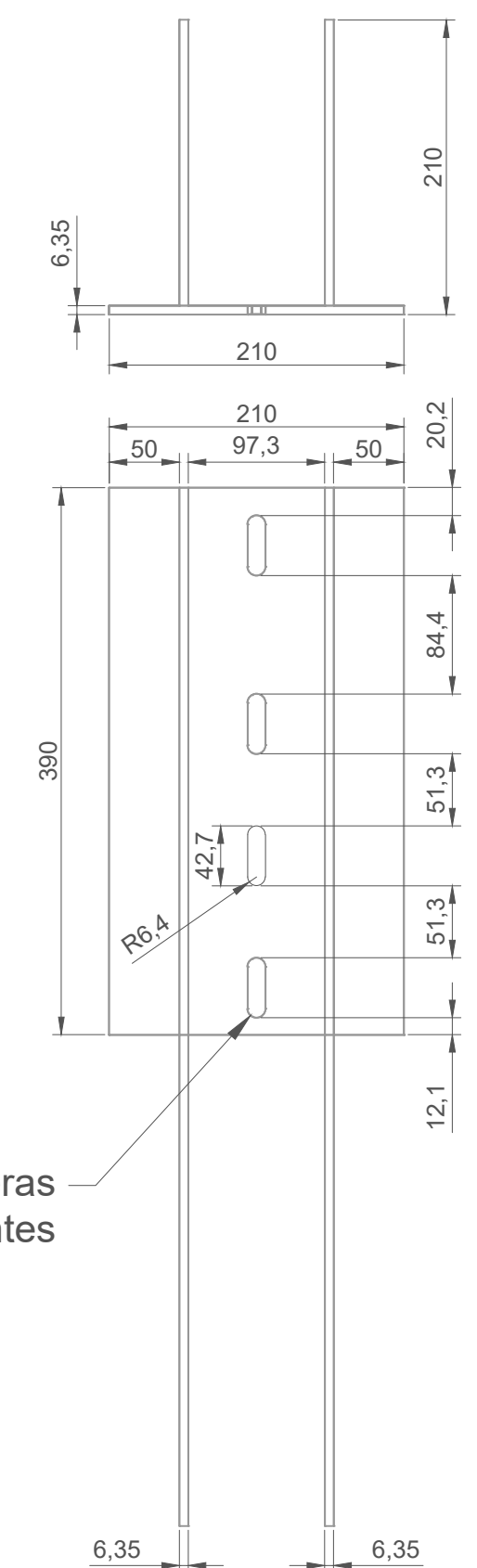


- 52 Tornillos $\varnothing \frac{1}{4}$ " x $1 \frac{1}{2}$ " largo
rosca fina, con dos arandelas
y tuerca, para sujeción de
Bloques hidráulicos, cilindros
y coraza de servos con base
estructural.

Nota: Soldadura de filete $\frac{3}{16}$ " - E60xx para conexión de partes del soporte de apoyo.

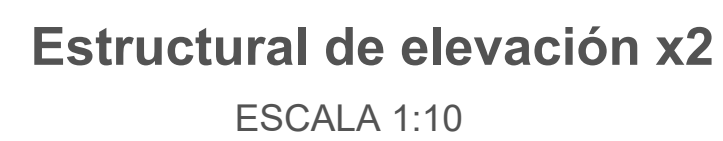


Correderas
ESCALA 1:2

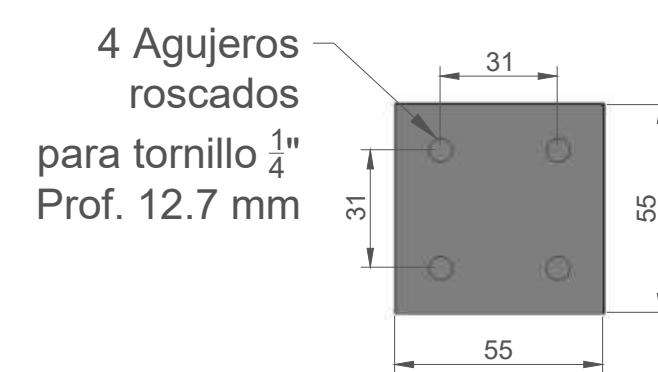
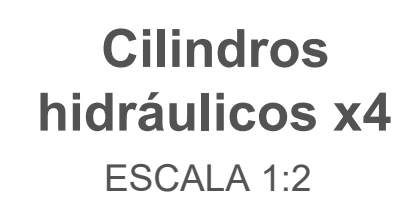


ESCALA 1:5

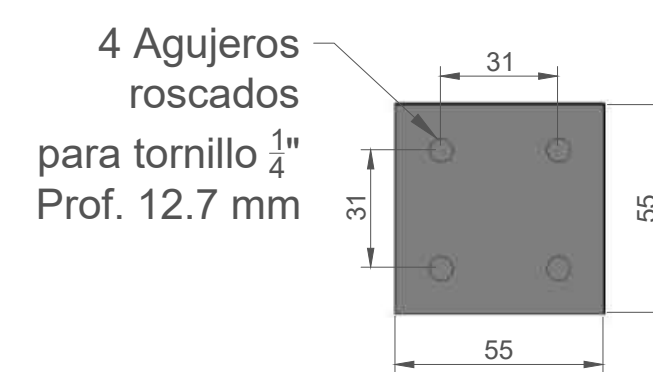
DIBUJÓ:	BRYAN CASTILLO TORRES	 Universidad del Valle 
DISEÑÓ:	BRYAN CASTILLO TORRES	
REVISÓ:	PROF. PETER THOMSON PH.D	ESCALA: Indicada PLANO No. 5 de 6
FECHA:	Agosto 2019	



DIBUJÓ:	BRYAN CASTILLO TORRES	 Universidad del Valle 
DISEÑÓ:	BRYAN CASTILLO TORRES	
REVISÓ:	PROF. PETER THOMSON PH.D	
FECHA:	Agosto 2019	



Technical drawing of a vertical shaft assembly. The drawing shows a central shaft with a diameter of $\varnothing 16$ mm. The shaft is supported by two bearings, labeled A and B. The distance between the centers of the bearings is 27.3 mm. The total height of the assembly is 316.3 mm. The distance from the bottom bearing center to the bottom flange is 46.3 mm. The distance from the top bearing center to the top flange is 59.5 mm. The top flange has a diameter of 16 mm. The shaft has a length of 64 mm between the two bearing centers. The total length of the shaft is 99.25 mm. The distance from the top bearing center to the top flange is 42 mm. The distance from the bottom bearing center to the bottom flange is 27.3 mm. The total height of the assembly is 316.3 mm. The distance between the centers of the bearings is 27.3 mm. The distance from the bottom bearing center to the bottom flange is 46.3 mm. The distance from the top bearing center to the top flange is 59.5 mm. The top flange has a diameter of 16 mm. The shaft has a length of 64 mm between the two bearing centers. The total length of the shaft is 99.25 mm. The distance from the top bearing center to the top flange is 42 mm. The distance from the bottom bearing center to the bottom flange is 27.3 mm. The total height of the assembly is 316.3 mm.



Technical drawing of a mechanical part, showing three views: front view, top view, and side view. Dimensions are given in millimeters.

Front View:

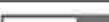
- Overall width: 80
- Overall height: 50
- Top horizontal slot: width 42, depth 12.7
- Bottom horizontal slot: width 42, depth 12.7
- Overall bottom width: 60
- Right side height: 30
- Chamfers: 45° on the top-right and bottom-right corners.
- Holes: 4 holes, diameter $\varnothing 9$, arranged in two rows of two.

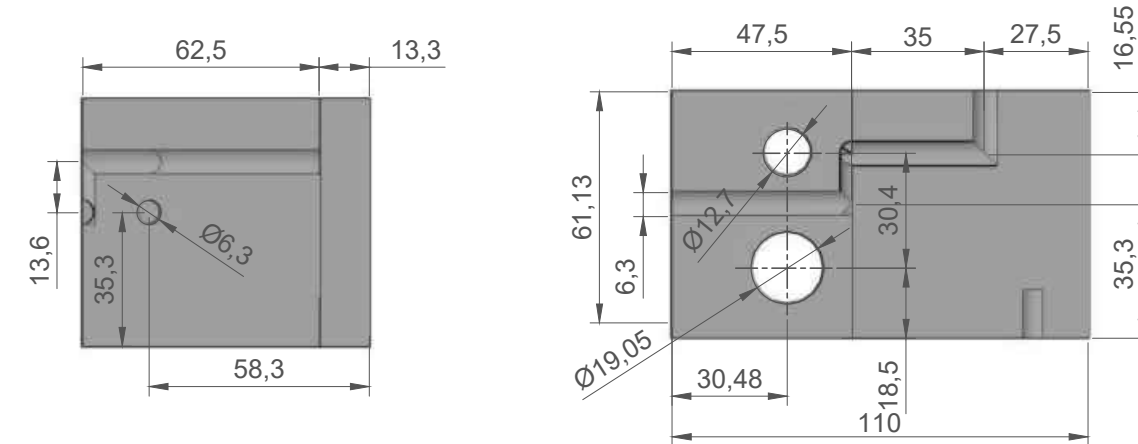
Top View:

- Overall width: 80
- Overall height: 60
- Central horizontal slot: width 42, depth 12.7
- Holes: 2 holes, diameter $\varnothing 9$, arranged in a row.

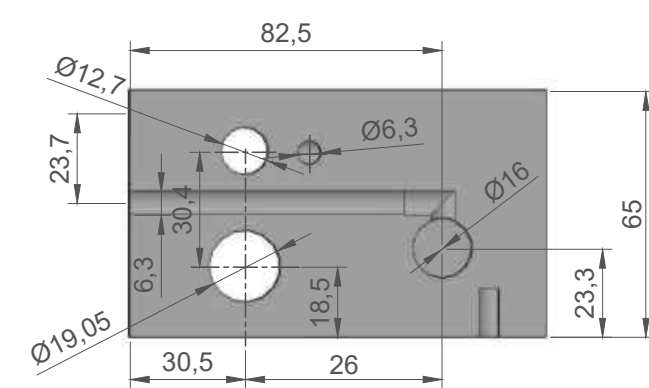
Side View:

- Overall width: 50
- Overall height: 53.7
- Top horizontal slot: width 30, depth 12.7
- Central vertical slot: width 17.3, depth 12.7
- Bottom horizontal slot: width 30, depth 12.7
- Chamfers: 45° on the top-left and bottom-left corners.
- Radius: R16 on the inner fillet.

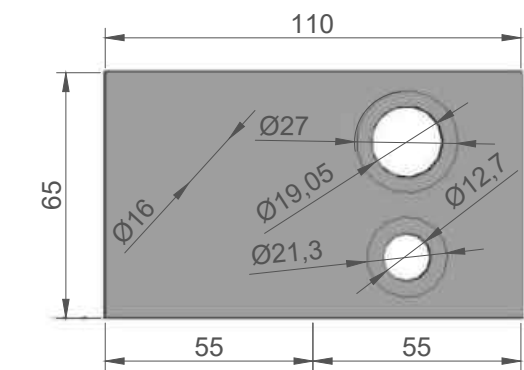
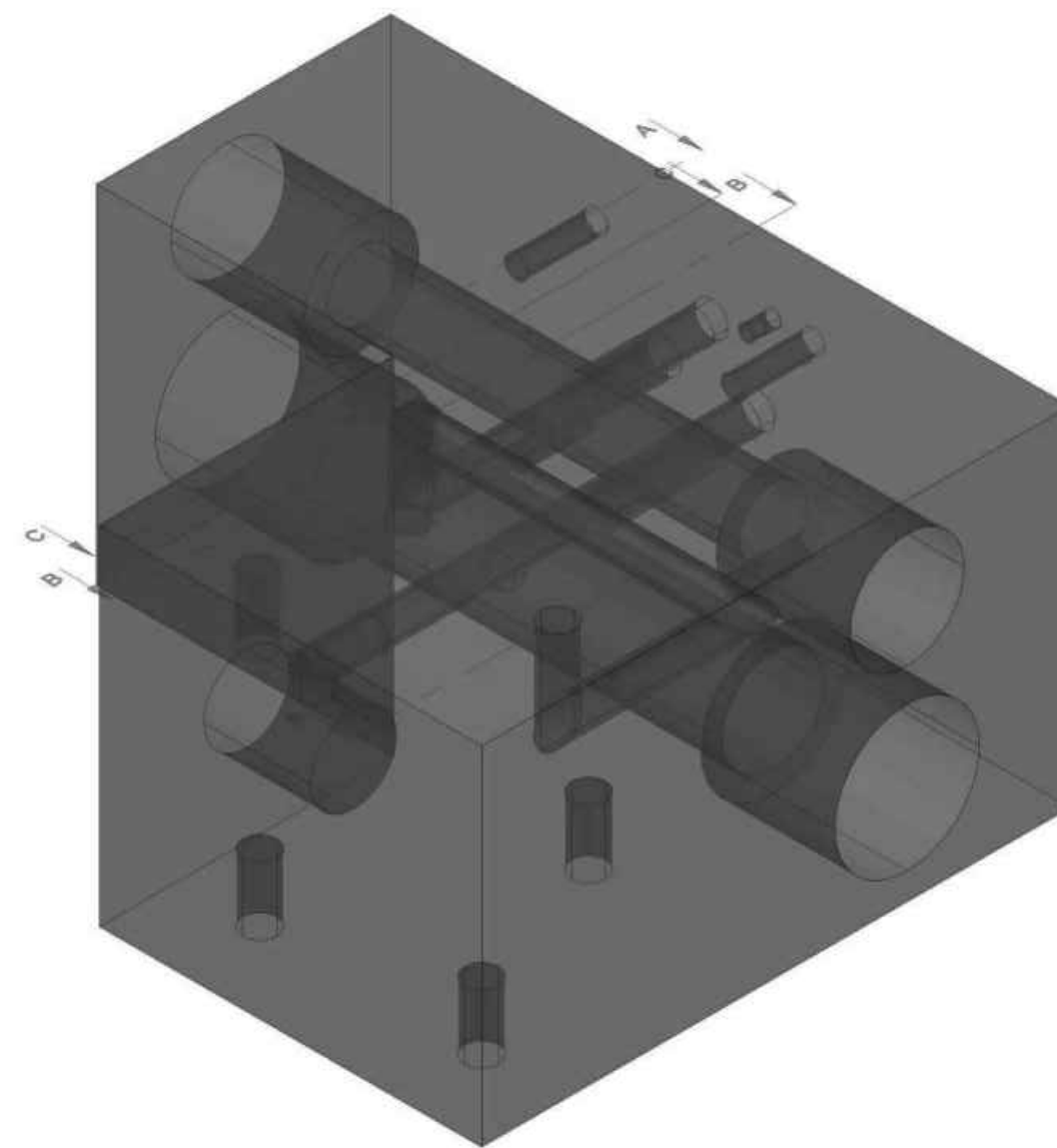
DIBUJÓ:	BRYAN CASTILLO TORRES	 Universidad del Valle 	
DISEÑÓ:	BRYAN CASTILLO TORRES		
REVISÓ:	PROF. PETER THOMSON PH.D	ESCALA: Indicada	PLANO No. 1 de 1
FECHA:	Agosto 2019		



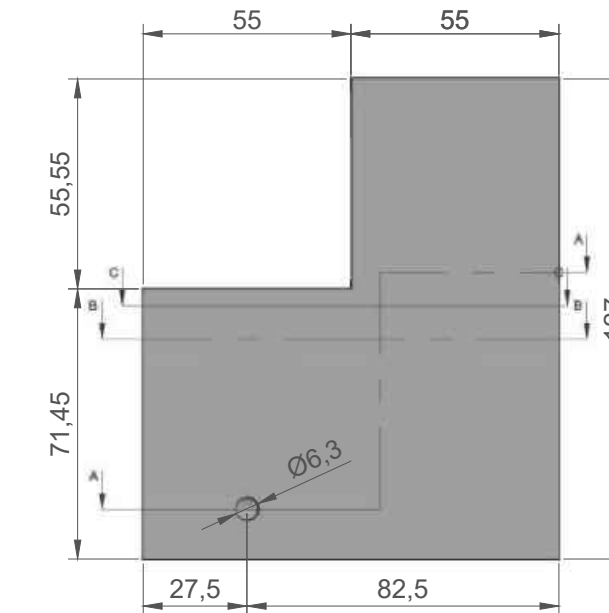
A diagram of a rectangular plate. The total height is labeled as 127. A horizontal line divides the plate into two sections. The height of the lower section is labeled as 71.45. The width of the plate is labeled as 65.



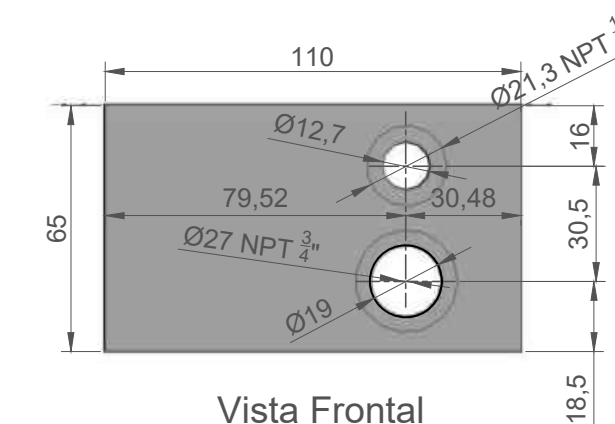
Vista Lateral
Izquierda



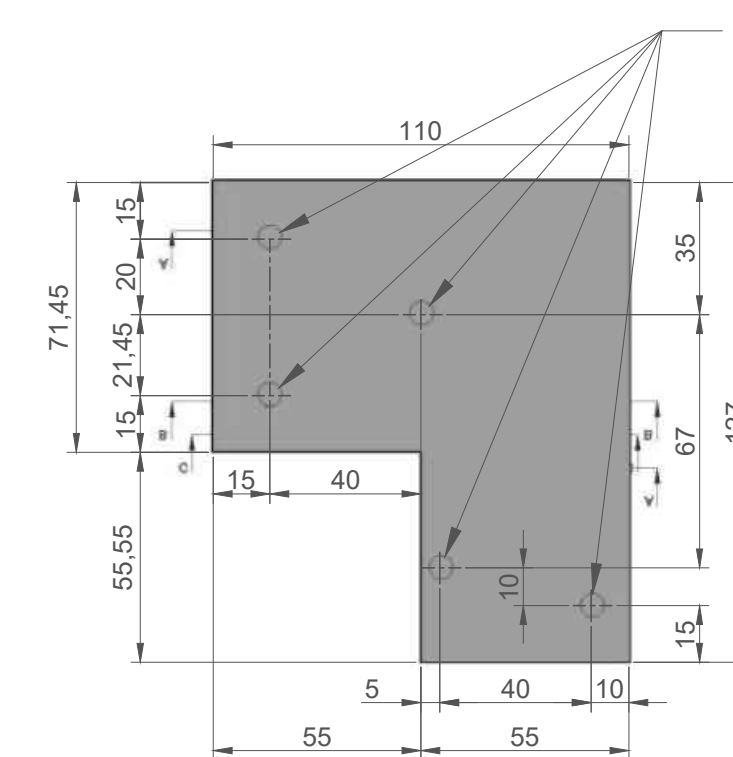
Vista Posterior



Vista Superior



Vista Frontal



Vista Inferior

[illegible]

— 5 Agujeros con rosca.
Para tornillo de $\varnothing \frac{1}{4}$ ",
Prof. 15 mm

Vistas de Bloque Hidráulico

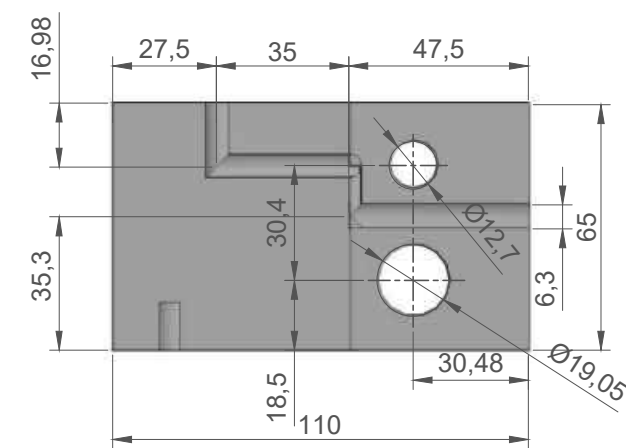
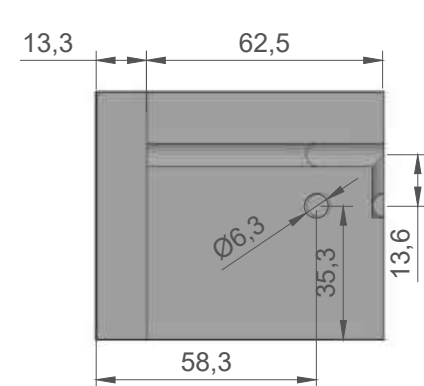
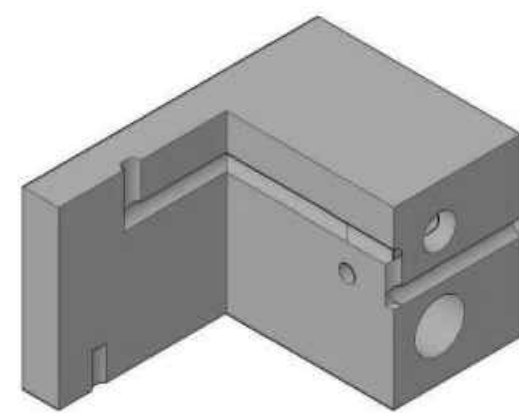
ESCALA 1:2

DIBUJÓ:	BRYAN CASTILLO TORRES	 Universidad del Valle 
DISEÑÓ:	BRYAN CASTILLO TORRES	
REVISÓ:	PROF. PETER THOMSON PH.D	ESCALA: Indicada PLANO No. 3 de 6
FECHA:	Agosto 2019	

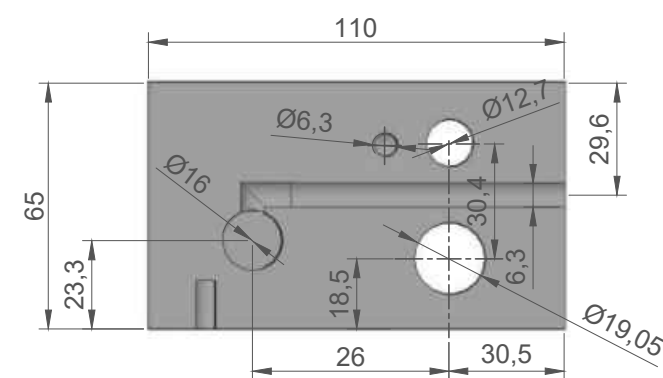
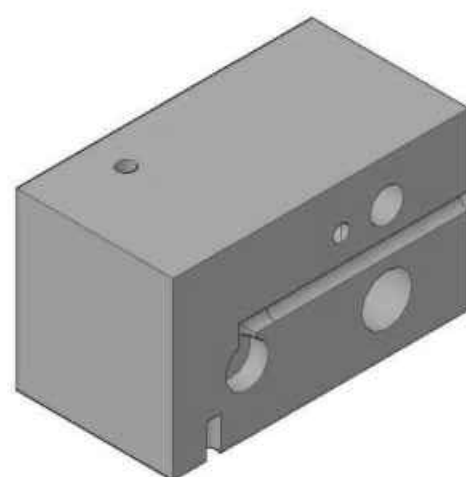
Isométrico Bloque Hidráulico

Cortes A-A, B-B Y C-C

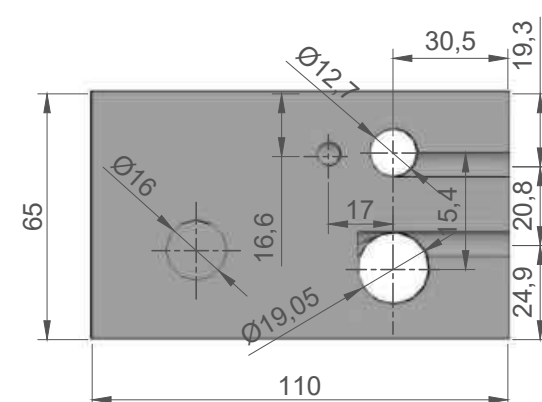
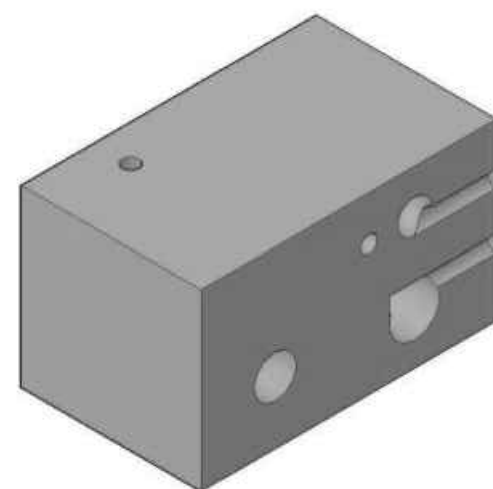
ESCALA 1:1



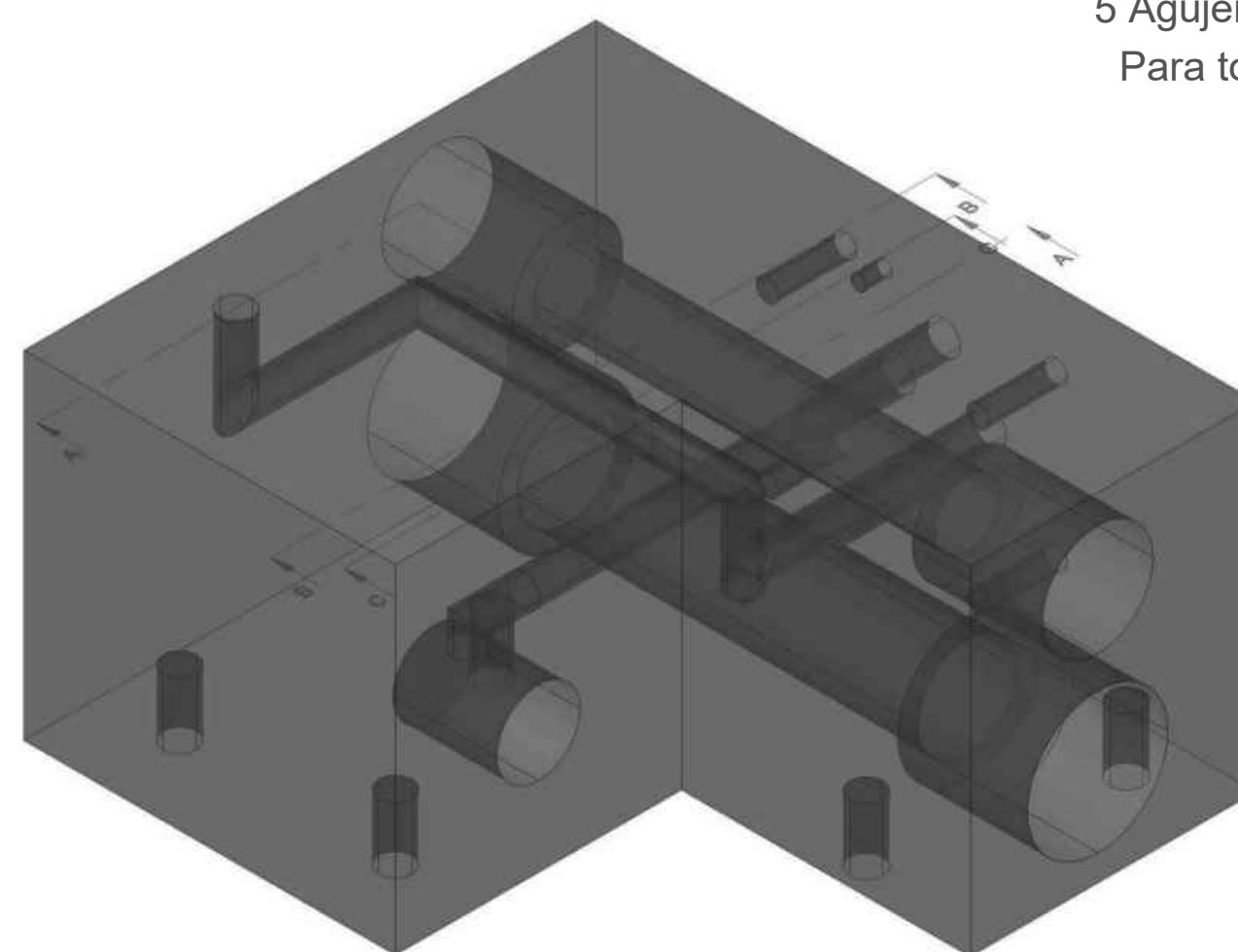
Corte A-A Bloque Hidráulico
ESCALA 1:2



Corte B-B Bloque Hidráulico
ESCALA 1:2

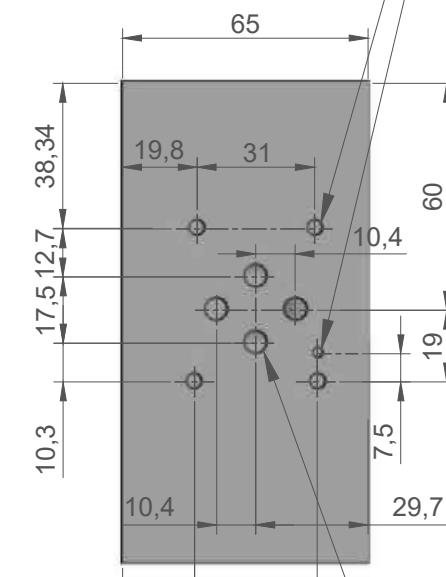


Corte C-C Bloque Hidráulico
ESCALA 1:2



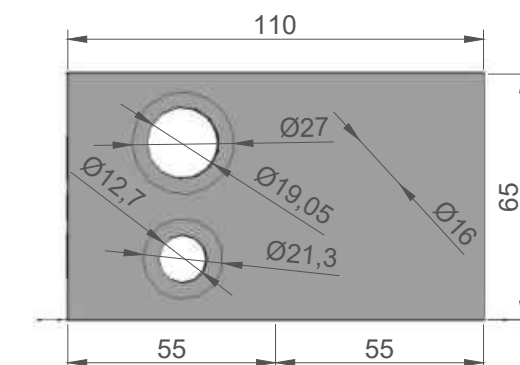
Isométrico Bloque Hidráulico
Cortes A-A, B-B Y C-C
ESCALA 1:1

Ø4.0 x 4.3 Prof.
Localización PIN
4 holes M5-6H
x12 mm Prof.
de rosca compl.

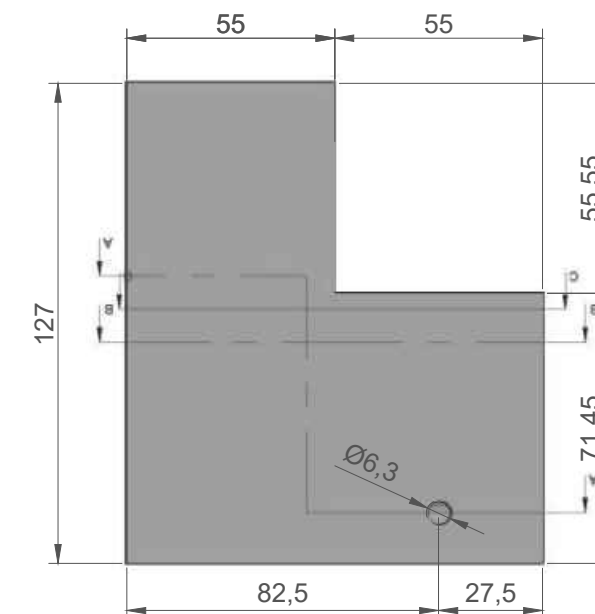


Vista Lateral
Derecha
(Cara
refrentada)

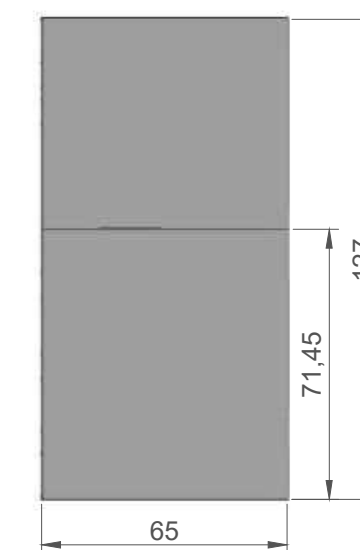
4 perfor.
Ø6.3 mm.



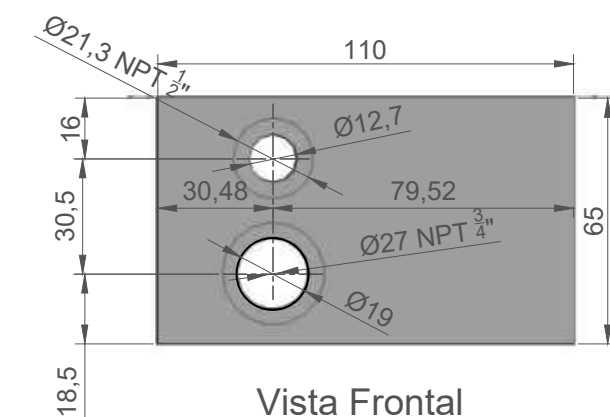
Vista Posterior



Vista Superior

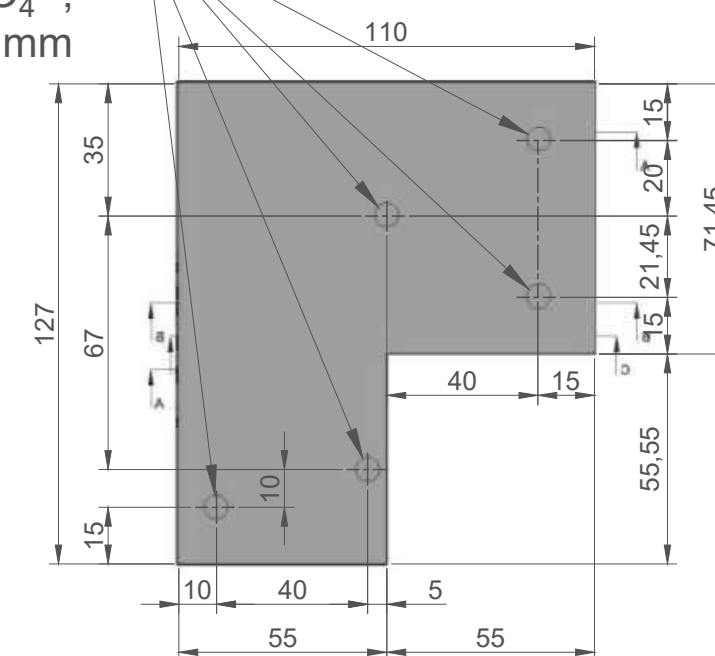


Vista Lateral
Izquierda



Vista Frontal

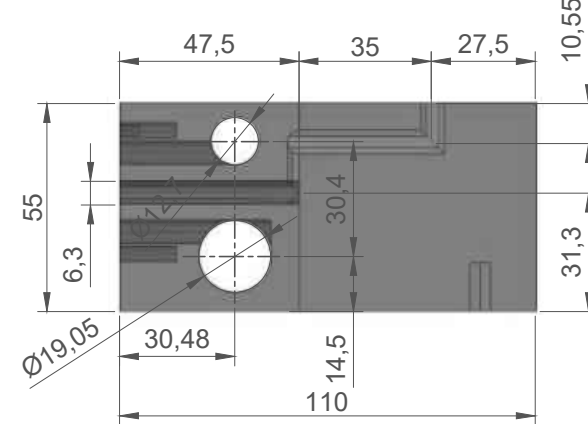
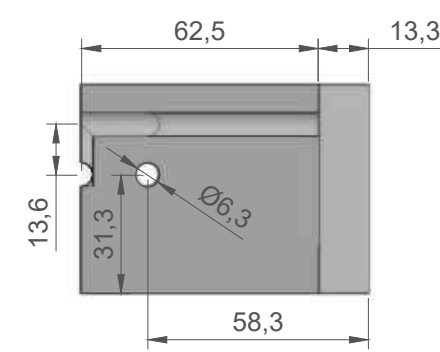
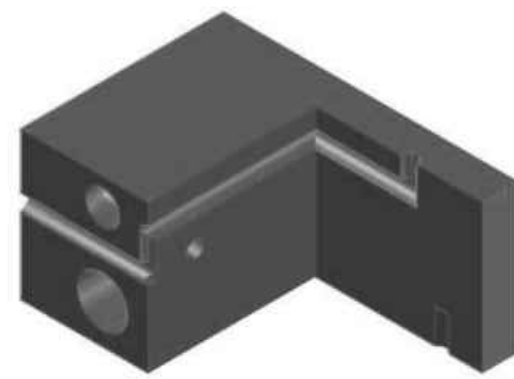
5 Agujeros con rosca.
Para tornillo de Ø1/4",
Prof. 15 mm



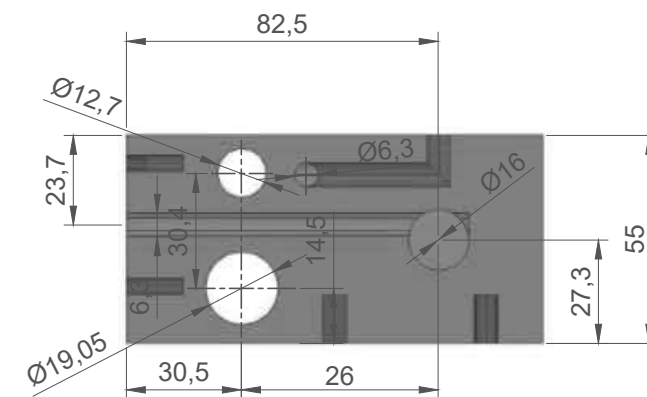
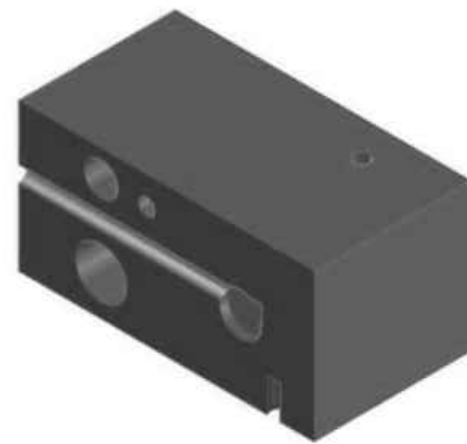
Vista Inferior

Vistas de Bloque Hidráulico
ESCALA 1:2

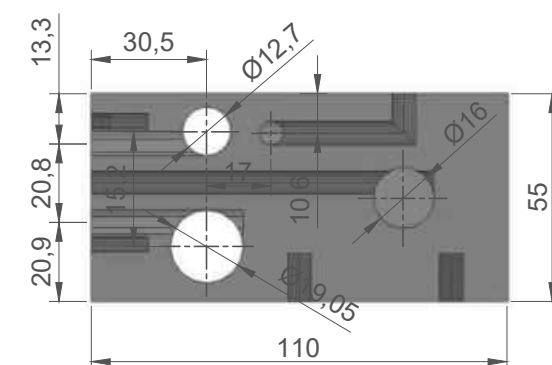
DIBUJÓ:	BRYAN CASTILLO TORRES		Universidad del Valle	
DISEÑO:	BRYAN CASTILLO TORRES			
REVISÓ:	PROF. PETER THOMSON PH.D	ESCALA: Indicada	PLANO No. 3 de 6	
FECHA:	Agosto 2019			



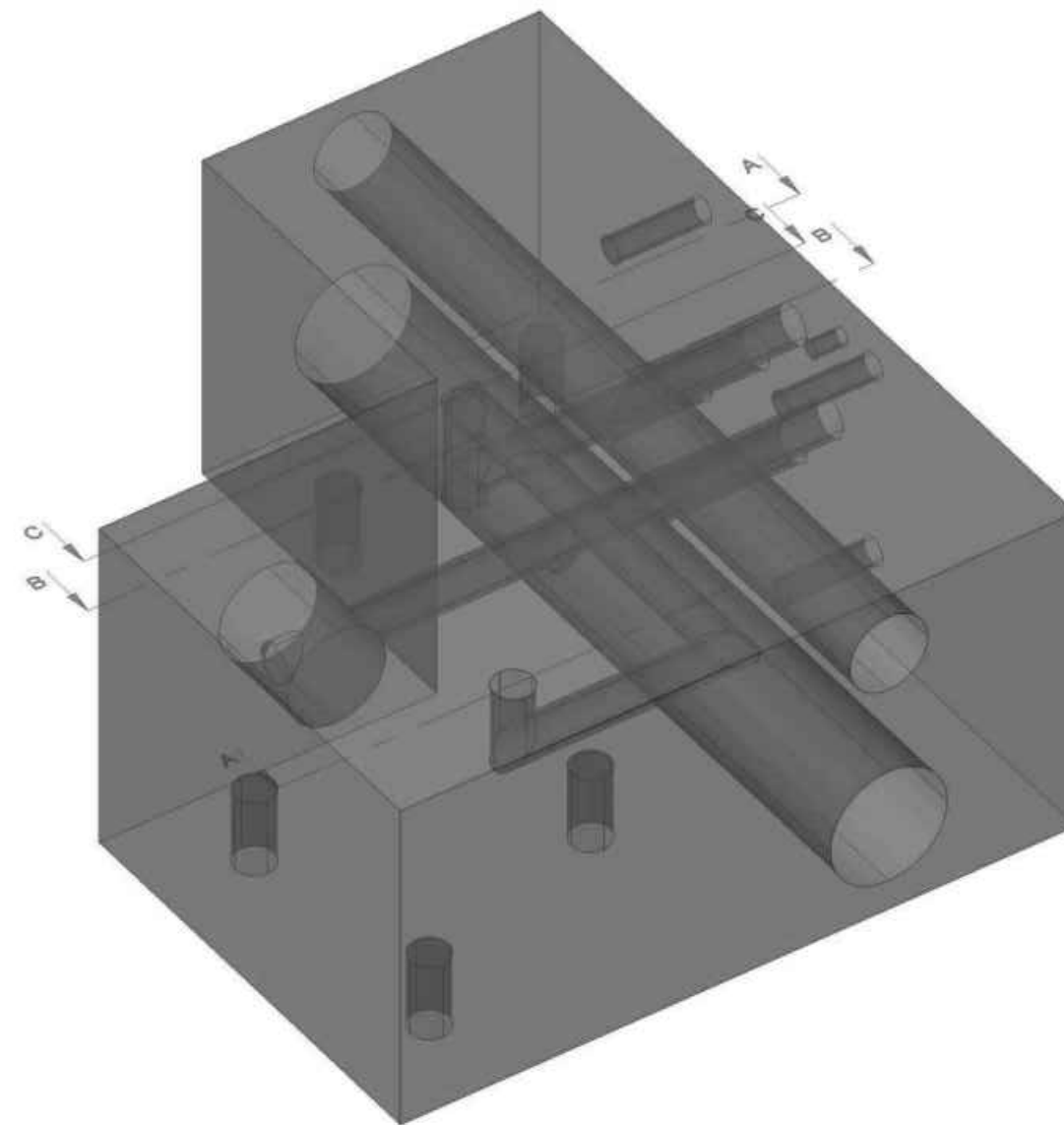
Corte A-A Bloque Hidráulico
ESCALA 1:2



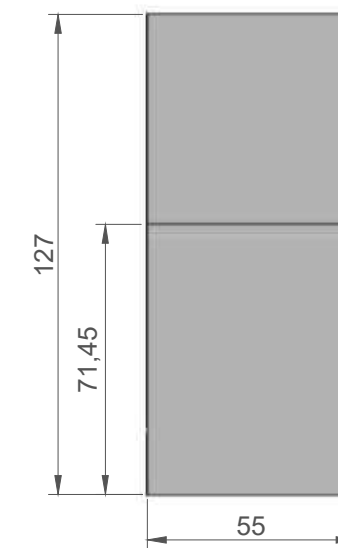
Corte B-B Bloque Hidráulico
ESCALA 1:2



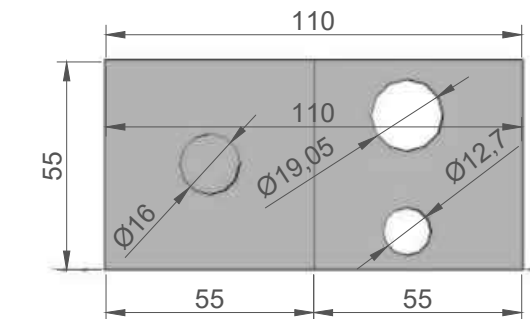
Corte C-C Bloque Hidráulico
ESCALA 1:2



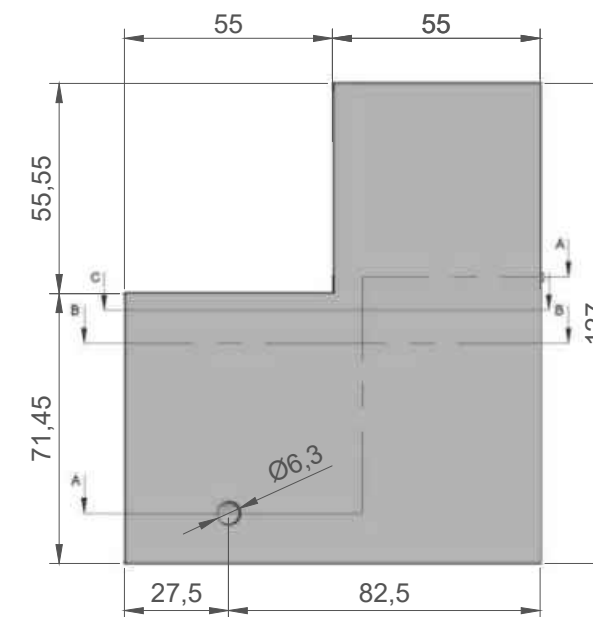
Isométrico Bloque Hidráulico
Cortes A-A, B-B Y C-C
ESCALA 1:1



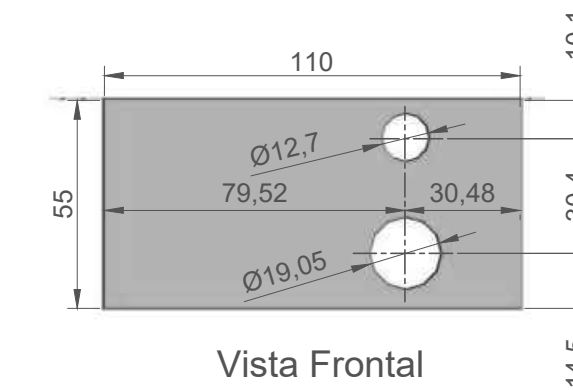
Vista Lateral
Izquierda



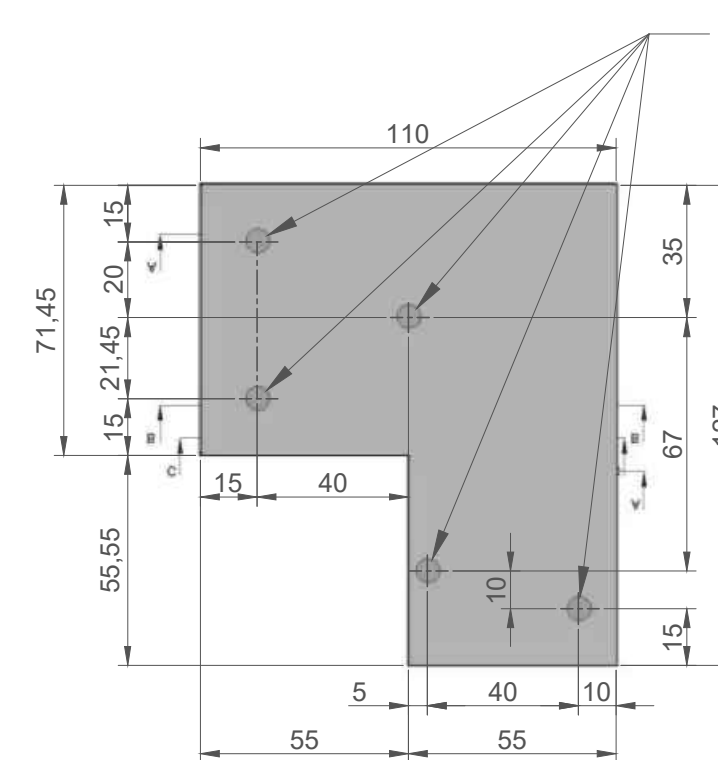
Vista Posterior



Vista Superior

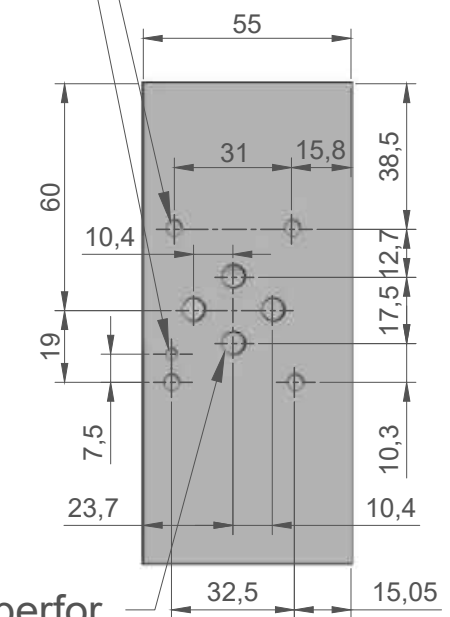


Vista Frontal



Vista Inferior

Ø4.0 x 4.3 Prof.
Localización PIN
4 holes M5-6H
x12 mm Prof.
de rosca compl.



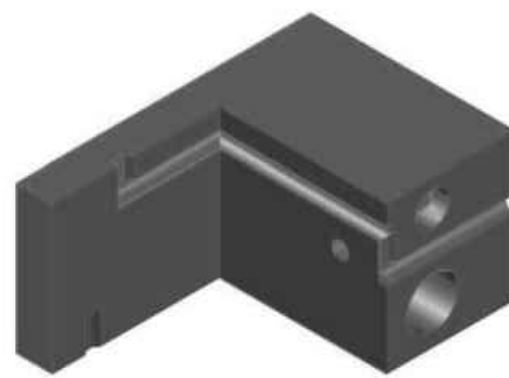
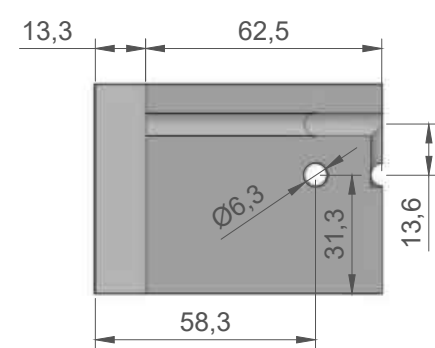
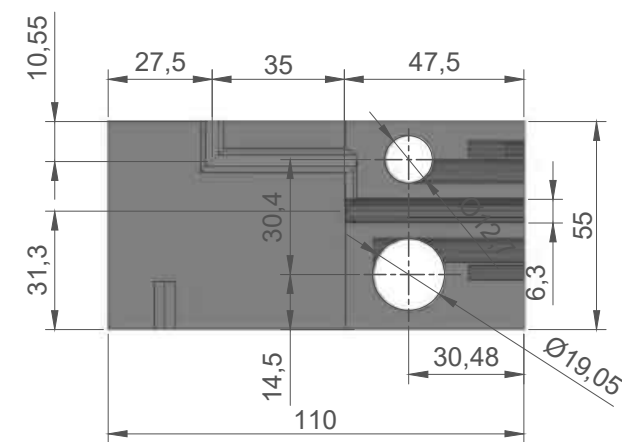
4 perfor.
Ø6.3 mm.

Vista Lateral
Derecha
(Cara
refrentada)

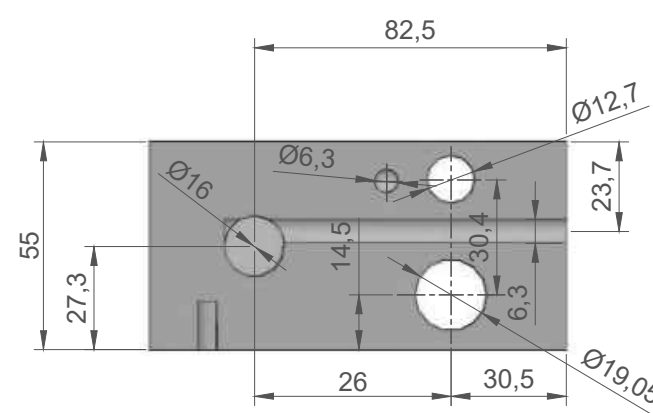
5 Agujeros con rosca.
Para tornillo de Ø $\frac{1}{4}$ ",
Prof. 15 mm

Vistas de Bloque Hidráulico
ESCALA 1:2

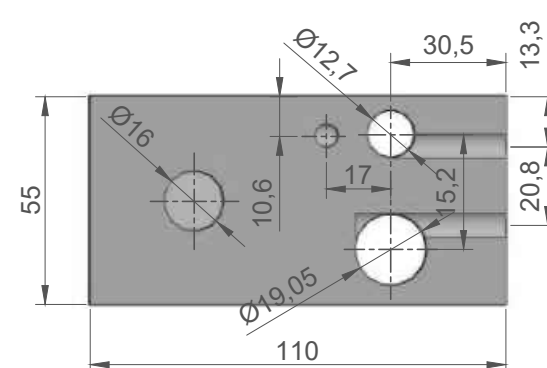
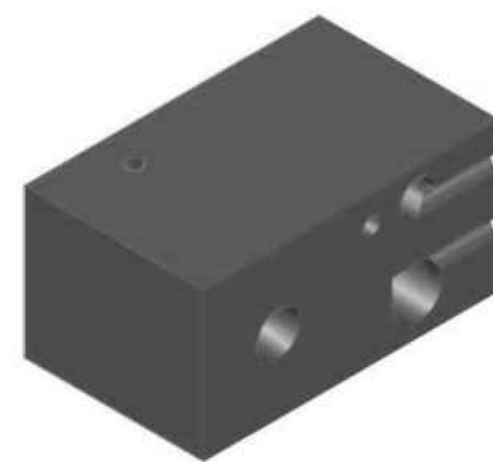
DIBUJÓ:	BRYAN CASTILLO TORRES	 Universidad del Valle 	
DISEÑÓ:	BRYAN CASTILLO TORRES		
REVISÓ:	PROF. PETER THOMSON PH.D	ESCALA: Indicada	PLANO No. 3 de 6
FECHA:	Agosto 2019		



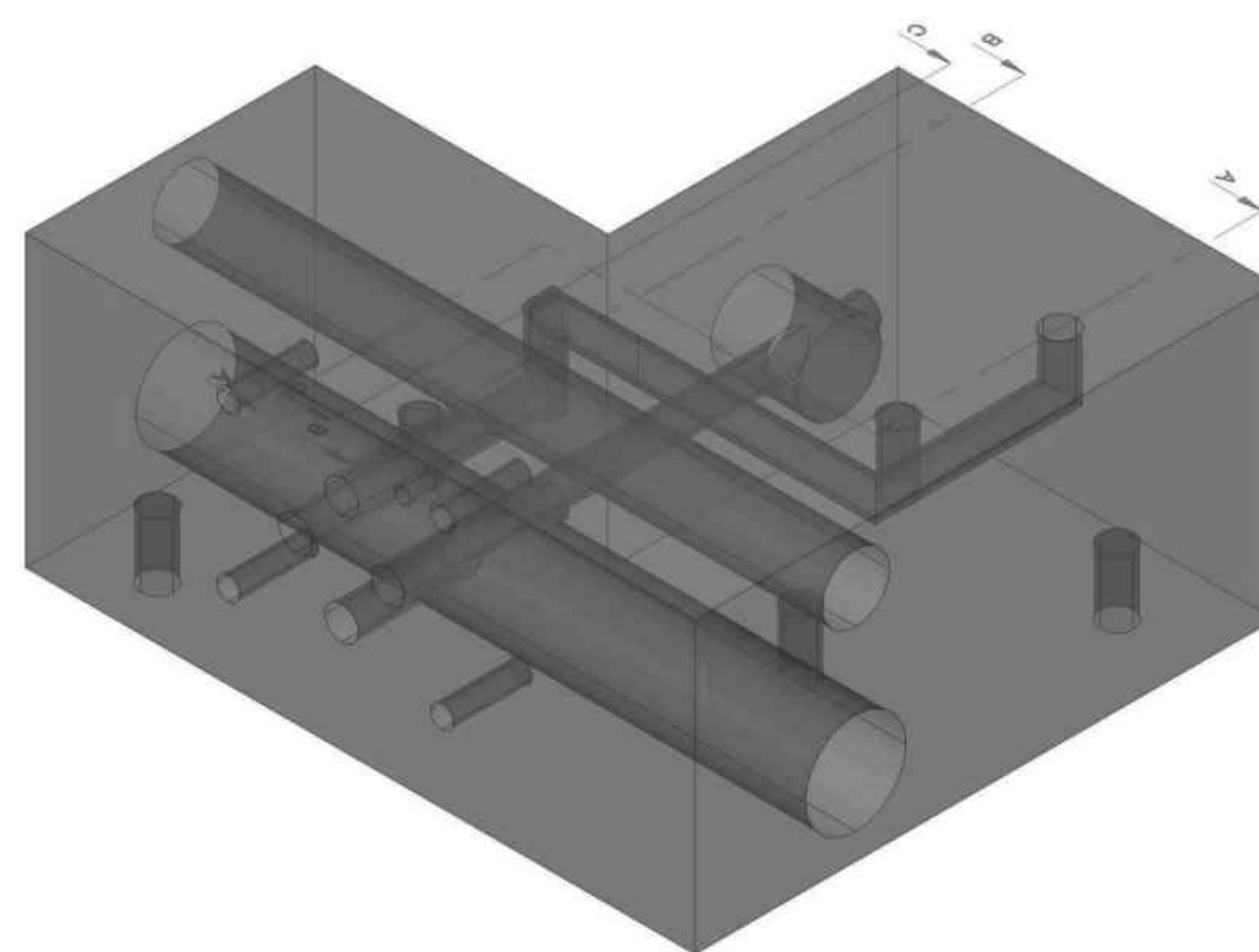
Corte A-A Bloque Hidráulico
ESCALA 1:2



Corte B-B Bloque Hidráulico
ESCALA 1:2

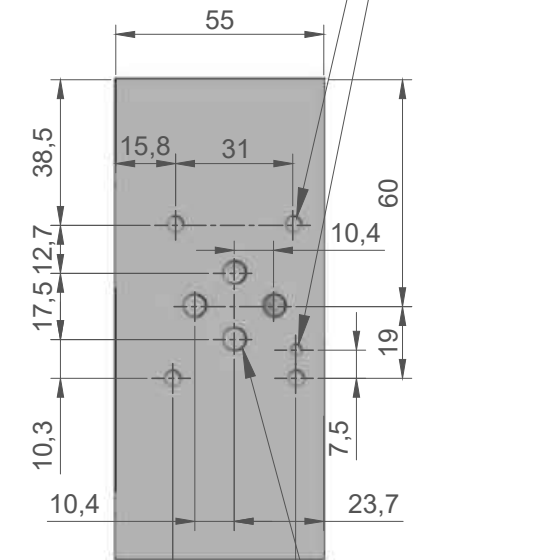


Corte C-C Bloque Hidráulico
ESCALA 1:2

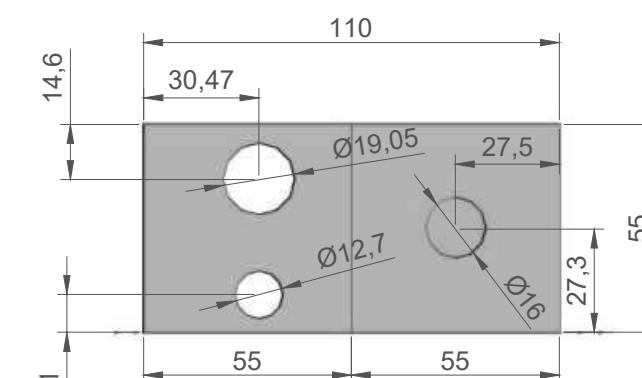


Isométrico Bloque Hidráulico
Cortes A-A, B-B Y C-C
ESCALA 1:1

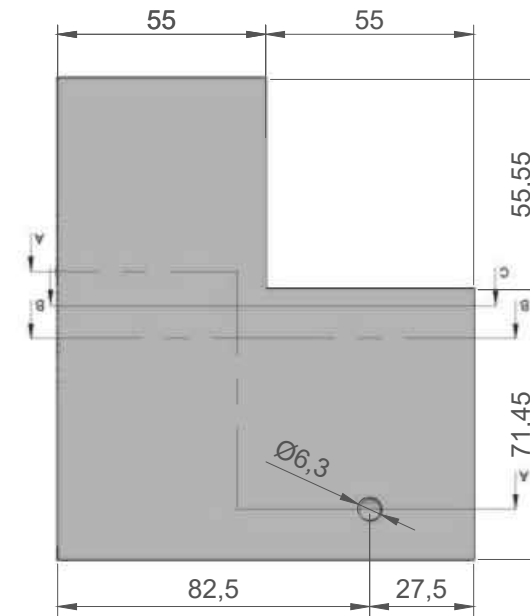
Ø4.0 x 4.3 Prof.
Localización PIN
4 holes M5-6H
x12 mm Prof.
de rosca compl.



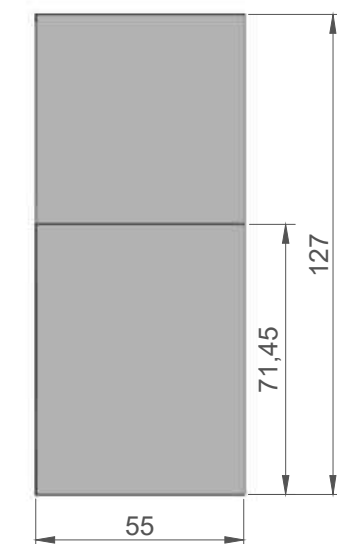
Vista Lateral
Izquierda



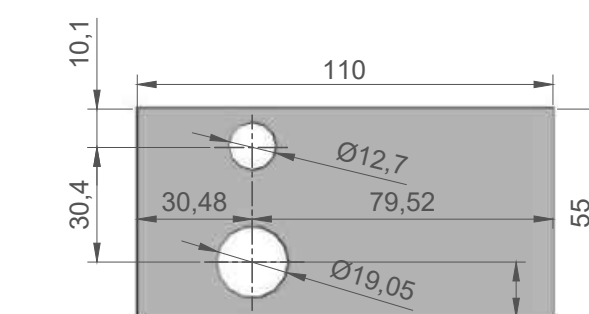
Vista Posterior



Vista Superior

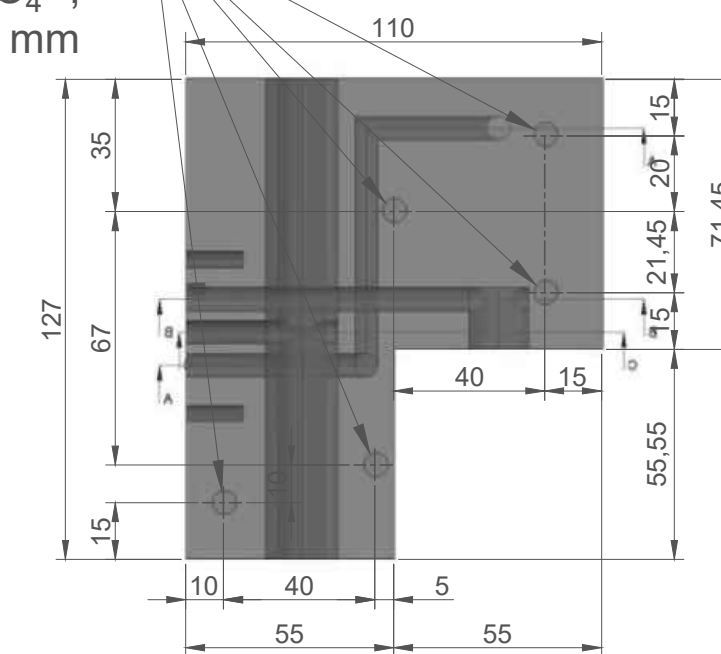


Vista Lateral
Derecha



Vista Frontal

5 Agujeros con rosca.
Para tornillo de $\frac{1}{4}$ ",
Prof. 15 mm



Vista Inferior

Vistas de Bloque Hidráulico
ESCALA 1:2

DIBUJÓ:	BRYAN CASTILLO TORRES	 Universidad del Valle 	ESCALA: Indicada	PLANO No. 4 de 6
DISEÑÓ:	BRYAN CASTILLO TORRES			
REVISÓ:	PROF. PETER THOMSON PH.D	ESCALA: Indicada	PLANO No. 4 de 6	
FECHA:	Agosto 2019			

TABLERO DE CONEXIONES

PRIMERA EDICIÓN



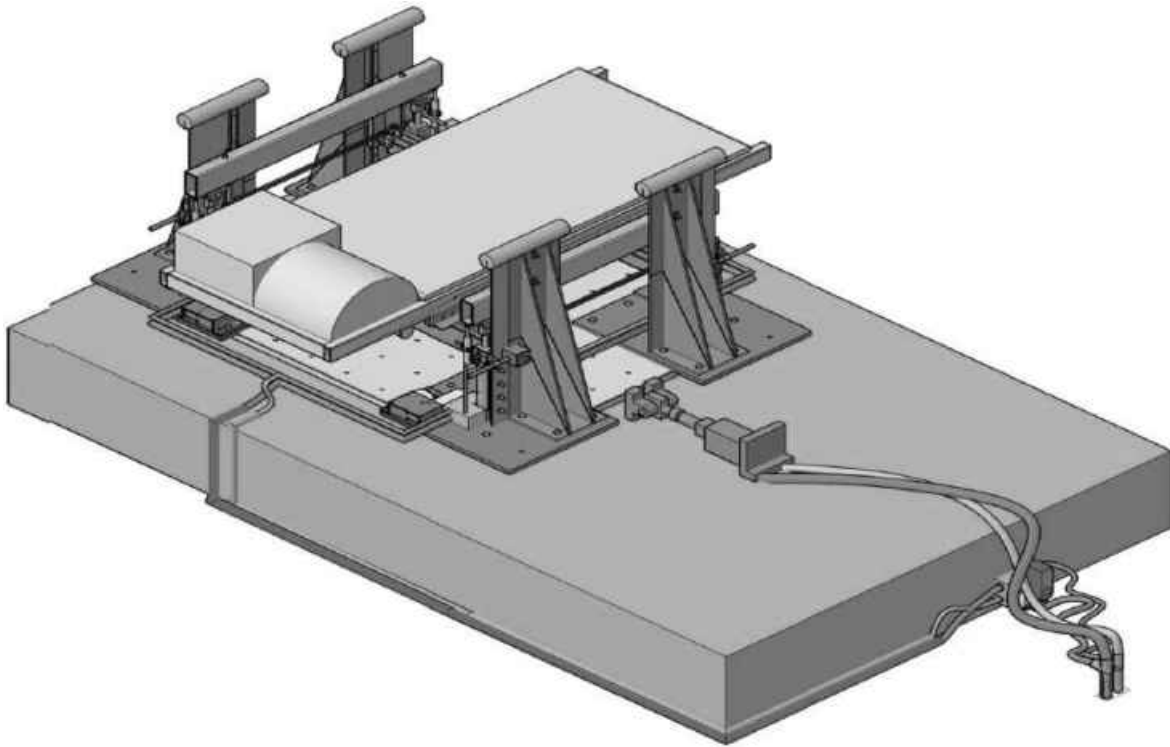
MANUAL TABLERO LUCY

Cableado y distribución
Diagramas de conexión
Sensores y actuadores

2022
MAOB

LUCY

TABLERO DE CONEXIONES CAMINADORA SOBRE MESA SISMICA



TABLERO DE CONEXIONES CAMINADORA SOBRE MESA SISMICA MANUAL DE CONEXIONES, DIAGRAMAS Y DISTRIBUCIÓN

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
UNIVERSIDAD DEL VALLE

MILER ANDREUS OCAMPO BIOJO

Lenguaje: español
Febrero 2022
Cali (Colombia)

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Conector de 2 pines para acelerómetro y color de cables	2
Tabla 2. Conector de 3 pines para sensor de presión y color de cables	2
Tabla 3. Conector de 4 pines para celdas de carga y color de cables	2
Tabla 4. Conector de 4 pines para potenciómetro y color de cables.....	3
Tabla 5. Conector de 7 pines para servoválvula y color de cables.....	3
Tabla 6. Conector de 7 pines para la caminadora y color de cables	4
Tabla 7. Distribución de pines	5

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Conector de 2 pines para acelerómetro.....	2
Figura 2. Conector de 3 pines para sensor de presión.....	2
Figura 3. Conector de 4 pines para celdas de carga.....	2
Figura 4. Conector de 4 pines para potenciómetros.....	3
Figura 5. Conector de 4 pines para servoválvula	3
Figura 6. Conector de 4 pines para la caminadora.....	4
Figura 7. NI PCI/PXI-6229 Pinout.....	6
Figura 8. Pinouts TC0, (1. Terminales de tornillo, 2. Conector de E / S de 68 pines, 3. Pie de separación de metal).....	8
Figura 9. Pinouts TC1, (1. Terminales de tornillo, 2. Conector de E / S de 68 pines, 3. Pie de separación de metal).....	9

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	ii
1. MESA SISMICA	1
2. CONECTORES	2
3. DISTRIBUCIÓN Y CONEXIÓN DE SENSORES Y ACTUADORES	5
3.1. PINOUT (Disposición De Los Pines Conectados)	5
3.2. PINOUT Dispositivo NI 6229	6
3.3. Diagrama localizador de pines CB-68LPR	7
3.3.1. Conector 0	7
3.3.2. Conector 1	9
3.4. Colores De Cables Al Interior Del Tablero	10

1. MESA SISMICA

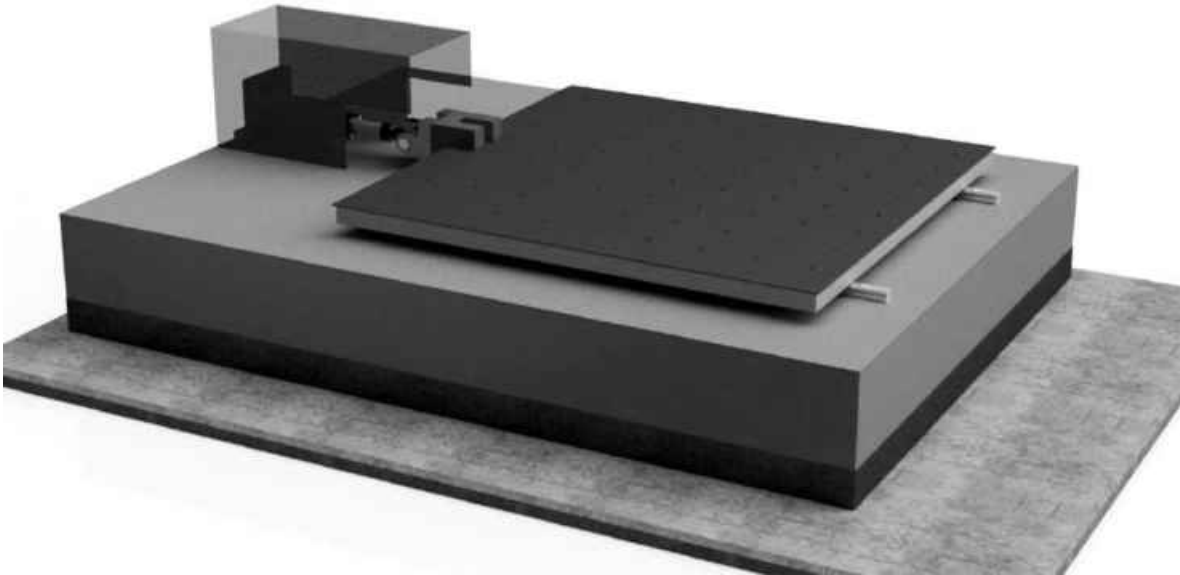


Ilustración 1. Simulador Sísmico Uniaxial

El simulador sísmico uniaxial que se muestra en la Ilustración 1, consiste en una placa de aluminio de 1.1 m x 1.5 m montado en cojinetes lineales Schneeberger. La placa de aluminio es desplazada horizontalmente por un actuador hidráulico de 45 KN (10 kip) que tiene servo válvulas duales de 15 gpm cada una. El simulador fue diseñado para operar en un rango de frecuencias de 0-50 Hz, tener un recorrido total de 15 cm, alcanzar velocidades de 90 cm/s, e impartir aceleraciones de 4 g's sobre modelos de 1 tonelada.

El sistema hidráulico consiste en un actuador hidráulico lineal de alto rendimiento, una unidad de potencia hidráulica y un controlador digital. El actuador de Shore Western Inc, tiene dos servo-válvulas duales de 15 gpm cada una, un LVDT interno y fue seleccionado para cumplir con las especificaciones de aceleración, velocidad y rango de frecuencias. La unidad de potencia hidráulica, opera a 3000 psi y tiene un caudal máximo de 32 gpm.

2. CONECTORES

Tabla 1. Conector de 2 pines para acelerómetro y color de cables

ACELERÓMETRO		Cable
 Figura 1. Conector de 2 pines para acelerómetro	① Output	Rojo
	② GND	Negro

Tabla 2. Conector de 3 pines para sensor de presión y color de cables

PRESIÓN		Cable
 Figura 2. Conector de 3 pines para sensor de presión	① Supply +	Rojo
	② GND	Blanco
	③ Output	Verde

Tabla 3. Conector de 4 pines para celdas de carga y color de cables

CELDAS DE CARGA		Cable
 Figura 3. Conector de 4 pines para celdas de carga	① Supply +	Rojo
	② GND	Negro
	③ Output +	Verde
	④ Output -	Blanco

Tabla 4. Conector de 4 pines para potenciómetro y color de cables

POTENCIÓMETRO		Cable
	① GND	Negro-Blanco
	② Output	Verde
	③ Supply +	Rojo
	④ NC	

Figura 4. Conector de 4 pines para potenciómetros

Tabla 5. Conector de 7 pines para servoválvula y color de cables

SERVOVÁLVULA		Cable
	① A. Supply +	Rojo
	② B. GND	Negro
	③ C. NC	---
	④ D. +VE	Blanco
	⑤ E. -VE	Café
	⑥ F. SPOOL	Azul
	⑦ G. Earth	

Figura 5. Conector de 7 pines para servoválvula

Tabla 6. Conector de 7 pines para la caminadora y color de cables

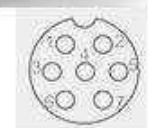
CAMINADORA		Cable
 	① INICIAR	<i>Azul</i>
	② FINALIZAR	<i>Gris</i>
	③ SUBIR	<i>Amarillo</i>
	④ BAJAR	<i>Verde</i>
	⑤ COMÚN	<i>Café</i>
	⑥ VEL_K	<i>Blanco</i>
	⑦ VEL_A	<i>Rojo</i>

Figura 6. Conector de 4 pines para la caminadora

3. DISTRIBUCIÓN Y CONEXIÓN DE SENSORES Y ACTUADORES

3.1. PINOUT (Disposición De Los Pines Conectados)

Tabla 7. Distribución de pines

Sensor o Actuador	Pin Matlab	Pin CB-68LPR TC0	Pin NI 6229 CONECTOR 0 (AI 0-15)	Sensor o Actuador	Pin Matlab	Pin CB-68LPR TC1	Pin NI 6229 CONECTOR 1 (AI 16-31)		
SALIDAS									
SERVO VÁLVULA				SERVO VÁLVULA					
SERVO_A	1	J22	AO 0	22	SERVO_C	3	J22	AO 2	22
SERVO_B	2	J21	AO 1	21	MANDO CAMINADORA				
SEGURIDAD				MC_I	17	J11	P0.16	11	
SEG_COR	3	J49	P0.2	49	MC_F	18	J10	P0.17	10
SEG_DES	4	J47	P0.3	47	MC_S	19	J43	P0.18	43
				MC_B	20	J42	P0.19	42	
ENTRADAS									
CELDA DE CARGA VERTICAL				ACELERACIÓN					
CCV_A	1	J68	AI 0	68	ACE_A	17	J68	AI 16	68
CCV_B	9	J34	AI 8	34	ACE_B	25	J34	AI 24	34
CCV_C	2	J33	AI 1	33	ACE_C	18	J33	AI 17	33
CCV_D	10	J66	AI 9	66	ACE_D	26	J66	AI 25	66
CELDA DE CARGA HORIZONTAL				PRESIÓN					
CCH_A	3	J65	AI 2	65	PRE_A	19	J65	AI 18	65
CCH_B	11	J31	AI 10	31	PRE_B	27	J31	AI 26	31
CCH_C	4	J30	AI 3	30	PRE_C	20	J30	AI 19	30
CCH_D	12	J63	AI 11	63	PRE_D	28	J63	AI 27	63
CELDA DE CARGA LONGITUDINAL				POTENCIÓMETRO					
CCL_A	5	J28	AI 4	28	POT_A	21	J28	AI 20	28
CCL_B	13	J61	AI 12	61	POT_B	29	J61	AI 28	61
CCL_C	6	J60	AI 5	60	POT_C	22	J60	AI 21	60
CCL_D	14	J26	AI 13	26	POT_D	30	J26	AI 29	26
SPOOL POSITION				SPOOL POSITION					
SPP_A	7	J25	AI 6	25	SPP_C	23	J25	AI 22	25
SPP_B	15	J58	AI 14	58	CORRIENTE SERVO				
CORRIENTE SERVO				COS_C	31	J58	AI 30	58	
COS A	8	J57	AI 7	57	VELOCIDAD CAMINADORA				

3.2. PINOUT Dispositivo NI 6229

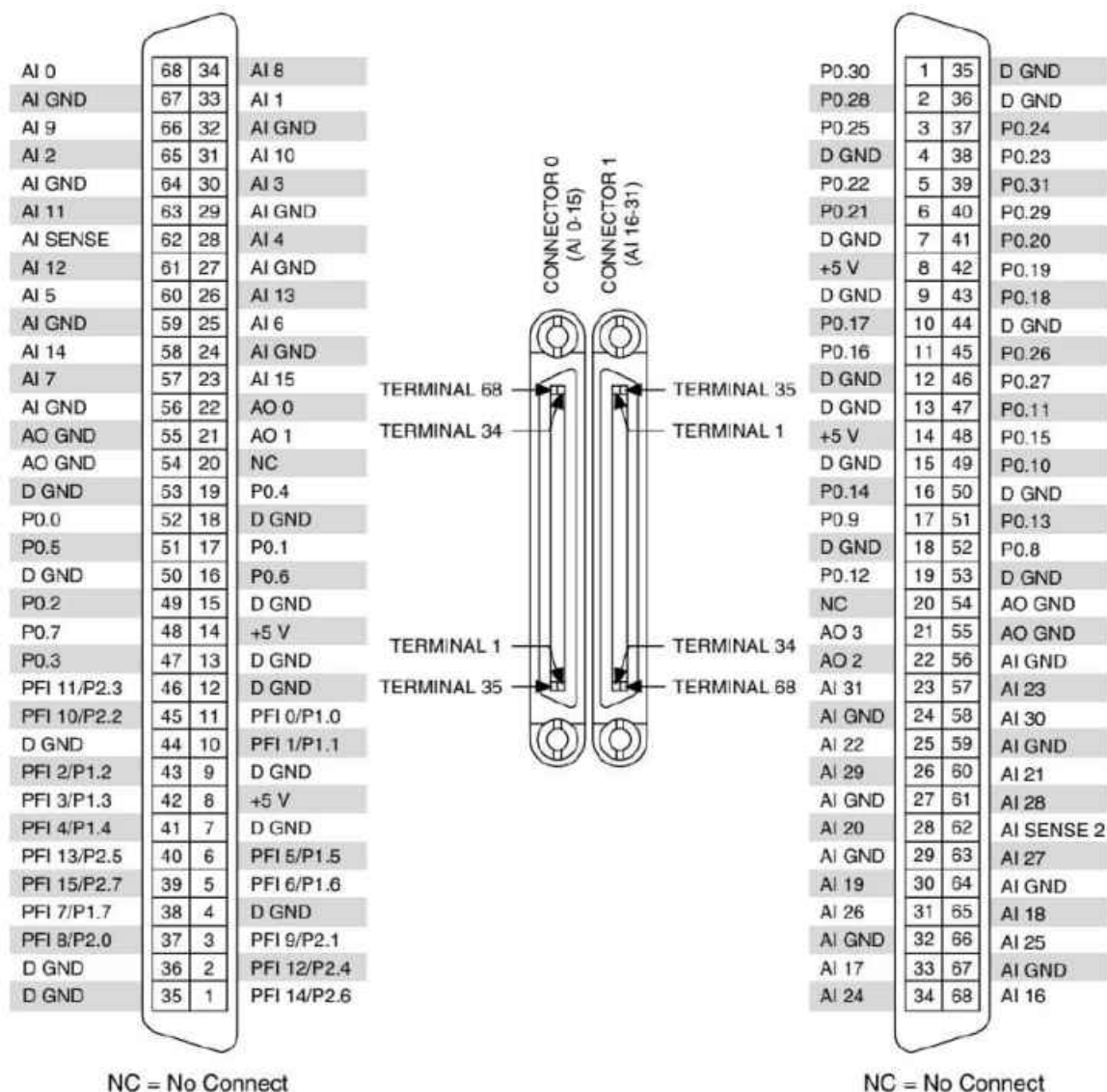


Figura 7. NI PCI/PXI-6229 Pinout

3.3. Diagrama localizador de pines CB-68LPR

3.3.1. Conector 0

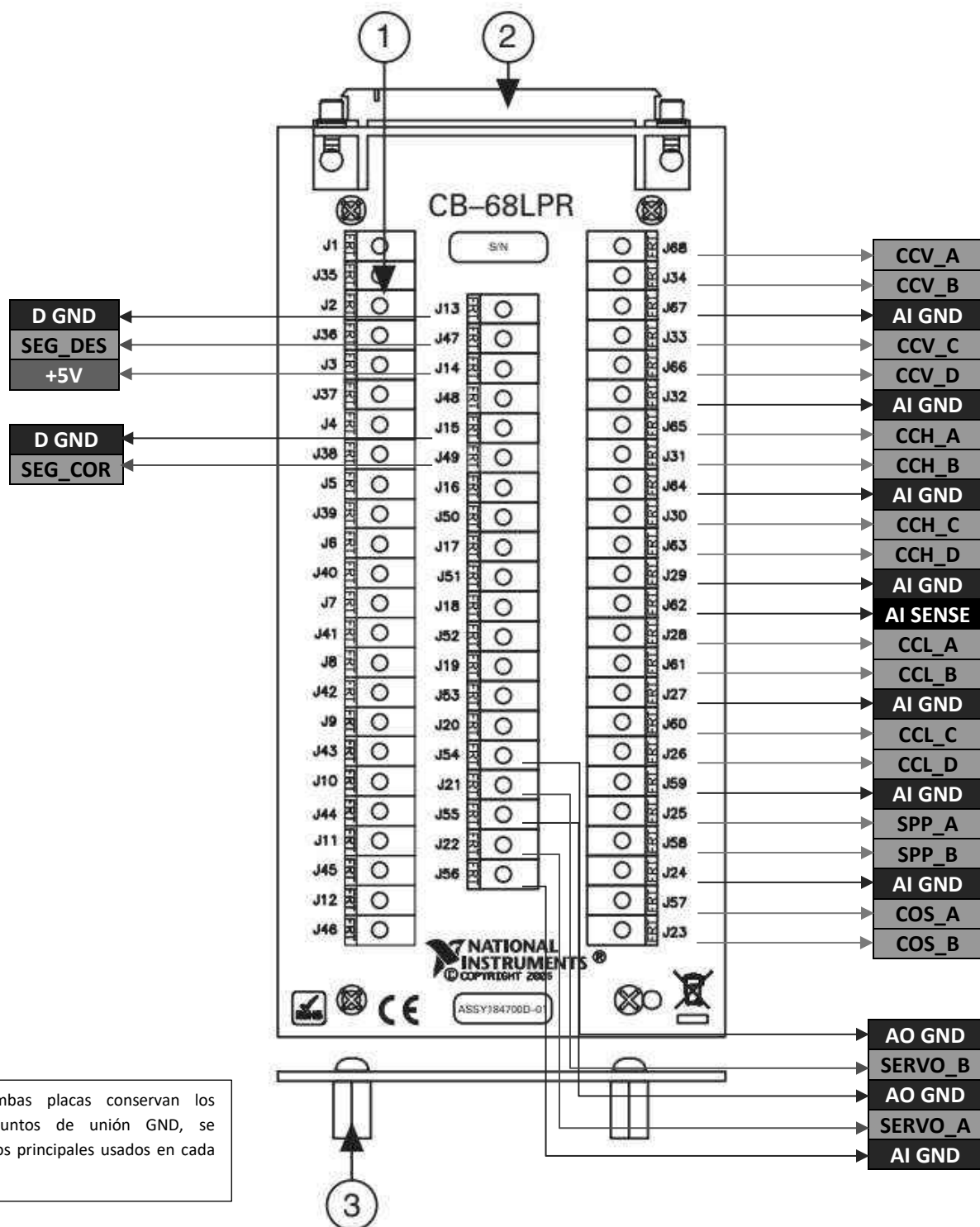


Figura 8. Pinouts TCO, (1. Terminales de tornillo, 2. Conector de E / S de 68 pines, 3. Pie de separación de metal)

3.3.2. Conector 1

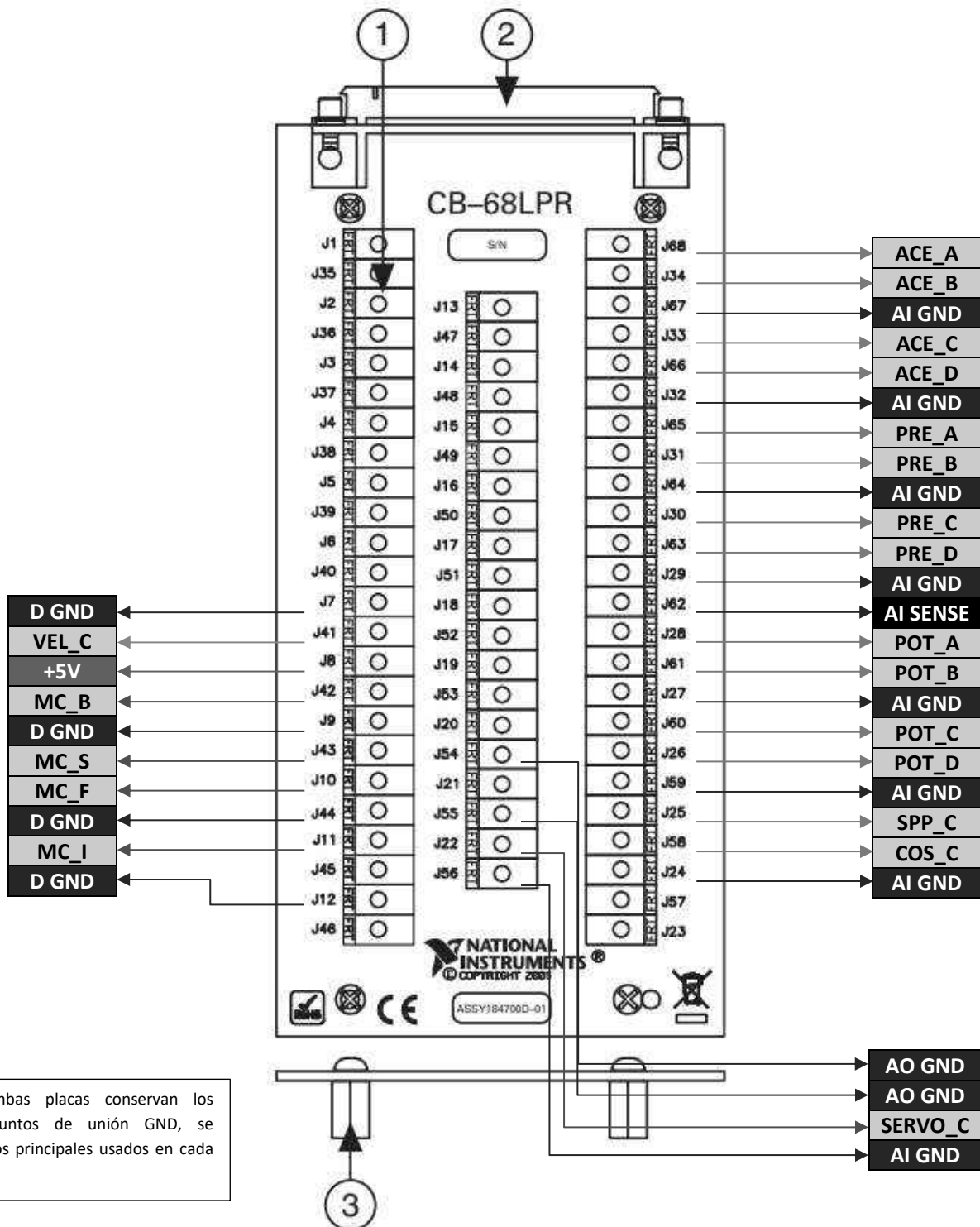


Figura 9. Pinouts TC1, (1. Terminales de tornillo, 2. Conector de E / S de 68 pines, 3. Pie de separación de metal)

3.4. Colores De Cables Al Interior Del Tablero

A

B

C

D

ACELERÓMETRO	
SEÑAL ①	GND ②
ROJO	BLANCO
VERDE	CAFÉ
AMARILLO	AZUL
ROSADO	GRIS

PRESIÓN		
VCC ①	GND ②	SEÑAL ③
ROJO	NEGRO	ROSADO
ROJO/NEGRO	NEGRO/BLANCO	VIOLETA
VERDE	BLANCO	AMARILLO
VERDE OSCURO	GRIS	AZUL

POTENCIÓMETRO		
GND ①	SEÑAL ②	VCC ③
NEGRO	ROSADO	ROJO
NEGRO/BLANCO	VIOLETA	ROJO/NEGRO
BLANCO	AMARILLO	VERDE
GRIS	AZUL	VERDE OSCURO

A

B

C

D

CELDA DE CARGA VERTICAL			
VCC ①	GND ②	OUTPUT + ③	OUTPUT - ④
ROJO	NEGRO	ROJO/BLANCO	ROJO/NEGRO
VERDE	CAFÉ	VERDE/BLANCO	VERDE/NEGRO
BLANCO	GRIS	CAFÉ/BLANCO	GRIS/NEGRO
NARANJA	AMARILLO	NARANJA/BLANCO	AMARILLO/NEGRO

CELDA DE CARGA HORIZONTAL			
VCC ①	GND ②	OUTPUT + ③	OUTPUT - ④
VIOLETA	ROSADO	VIOLETA/BLANCO	ROSADO/NEGRO
AZUL	PURPURA	AZUL/BLANCO	BLANCO/NEGRO
ROJO	NEGRO	ROJO/BLANCO	ROJO/NEGRO
VERDE	CAFÉ	VERDE/BLANCO	VERDE/NEGRO

CELDA DE CARGA LONGITUDINAL			
VCC ①	GND ②	OUTPUT + ③	OUTPUT - ④
BLANCO	GRIS	CAFÉ/BLANCO	GRIS/NEGRO
NARANJA	AMARILLO	NARANJA/BLANCO	AMARILLO/NEGRO
VIOLETA	ROSADO	VIOLETA/BLANCO	ROSADO/NEGRO
AZUL	PURPURA	AZUL/BLANCO	BLANCO/NEGRO

A

B

C

SERVOVÁLVULA				
VCC ①	GND ②	+VE ④	-VE ⑤	SPOOL ⑥
ROJO	PANTALLA	BLANCO	NEGRO	VERDE
ROJO	PANTALLA	NEGRO	BLANCO	VERDE
ROJO	PANTALLA	BLANCO	NEGRO	VERDE

CAMINADORA						
INICIAR ①	FINALIZAR ②	SUBIR ③	BAJAR ④	COMÚN ⑤	VEL_K ⑥	VEL_A ⑦
AZUL	GRIS	AMARILLO	VERDE	CAFÉ	BLANCO	ROJO

ANEXO No.2

“PRUEBAS EXPERIMENTALES”

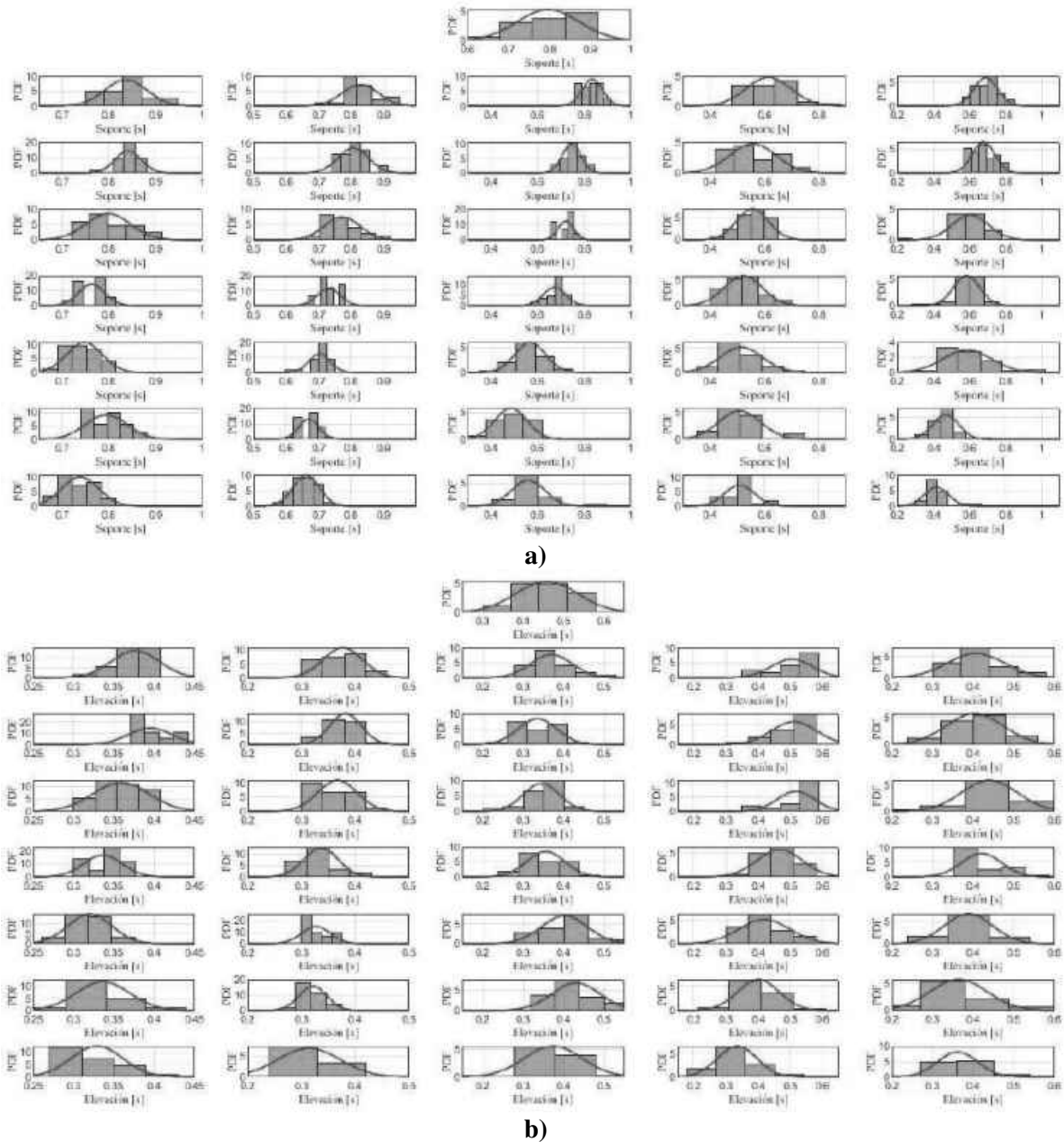


Figura 42. Anexo No.2 - SP No.2, Tiempos de soporte y elevación de pasos de marcha; a) Tiempos de soporte; b) Tiempos de elevación.

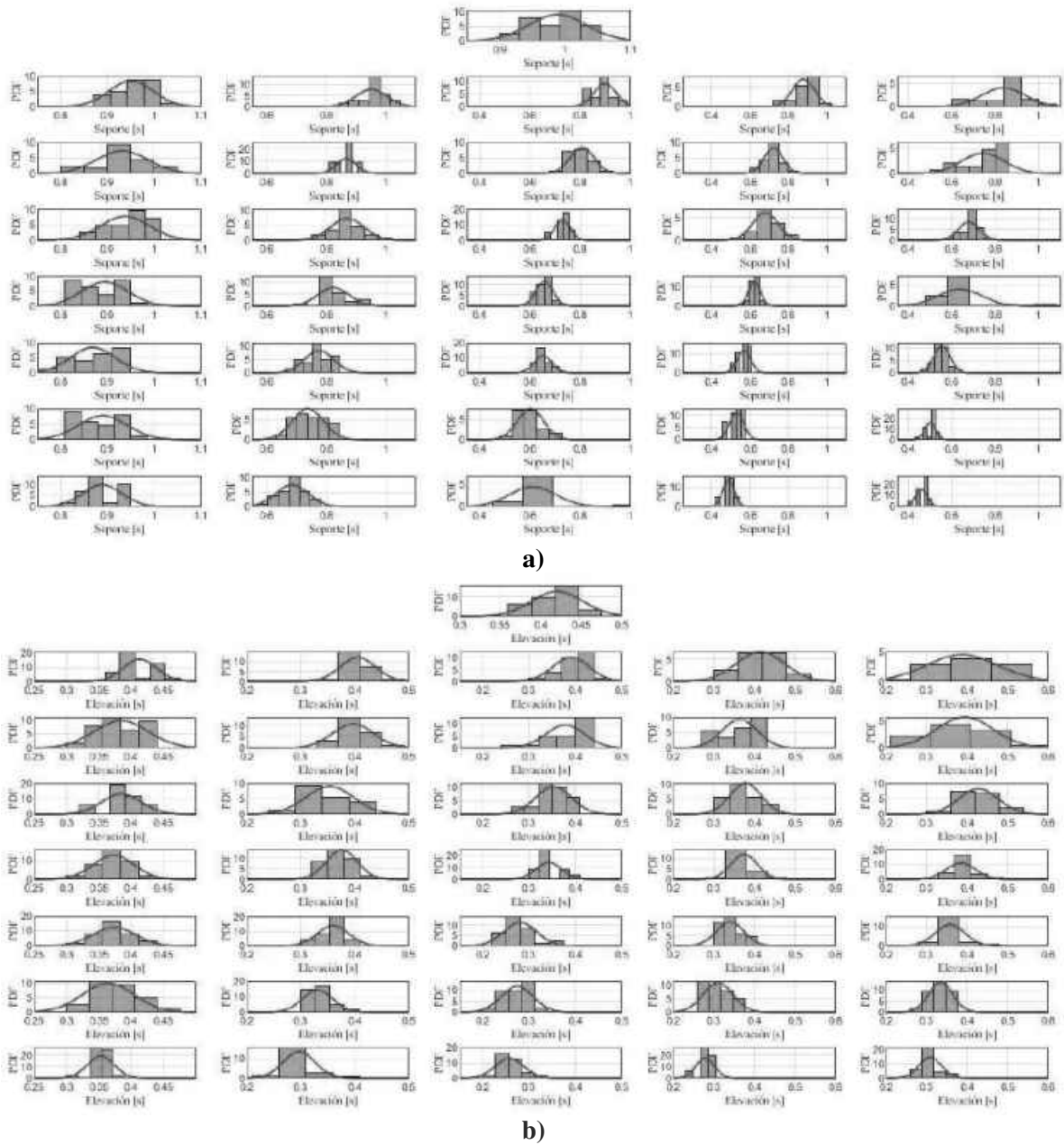


Figura 43. Anexo No.2 - SP No.3, Tiempos de soporte y elevación de pasos de marcha; **a)** Tiempos de soporte; **b)** Tiempos de elevación.

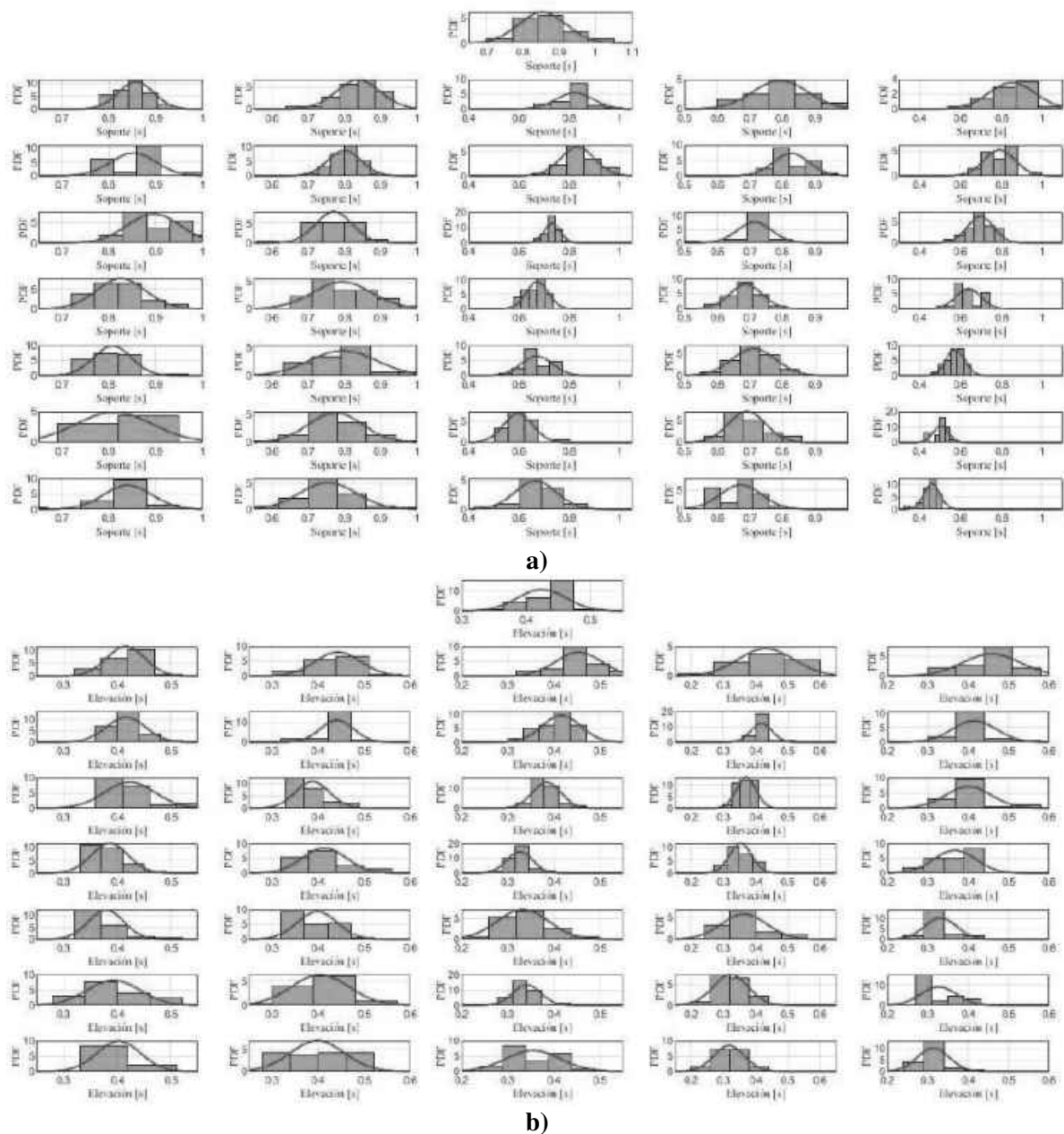


Figura 44. Anexo No.2 - SP No.4, Tiempos de soporte y elevación de pasos de marcha; **a)** Tiempos de soporte; **b)** Tiempos de elevación.

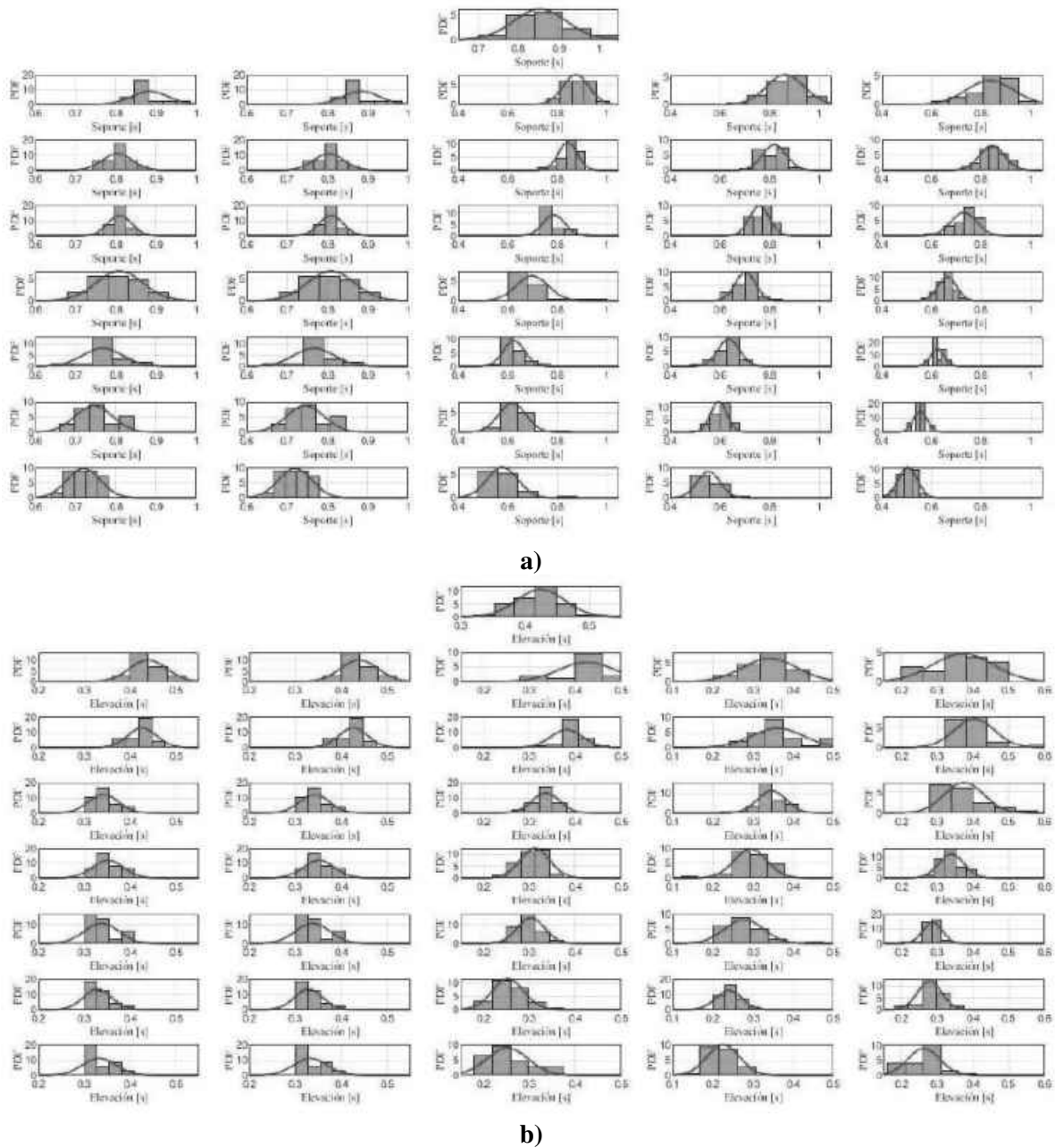


Figura 45. Anexo No.2 - SP No.5, Tiempos de soporte y elevación de pasos de marcha; a) Tiempos de soporte; b) Tiempos de elevación.

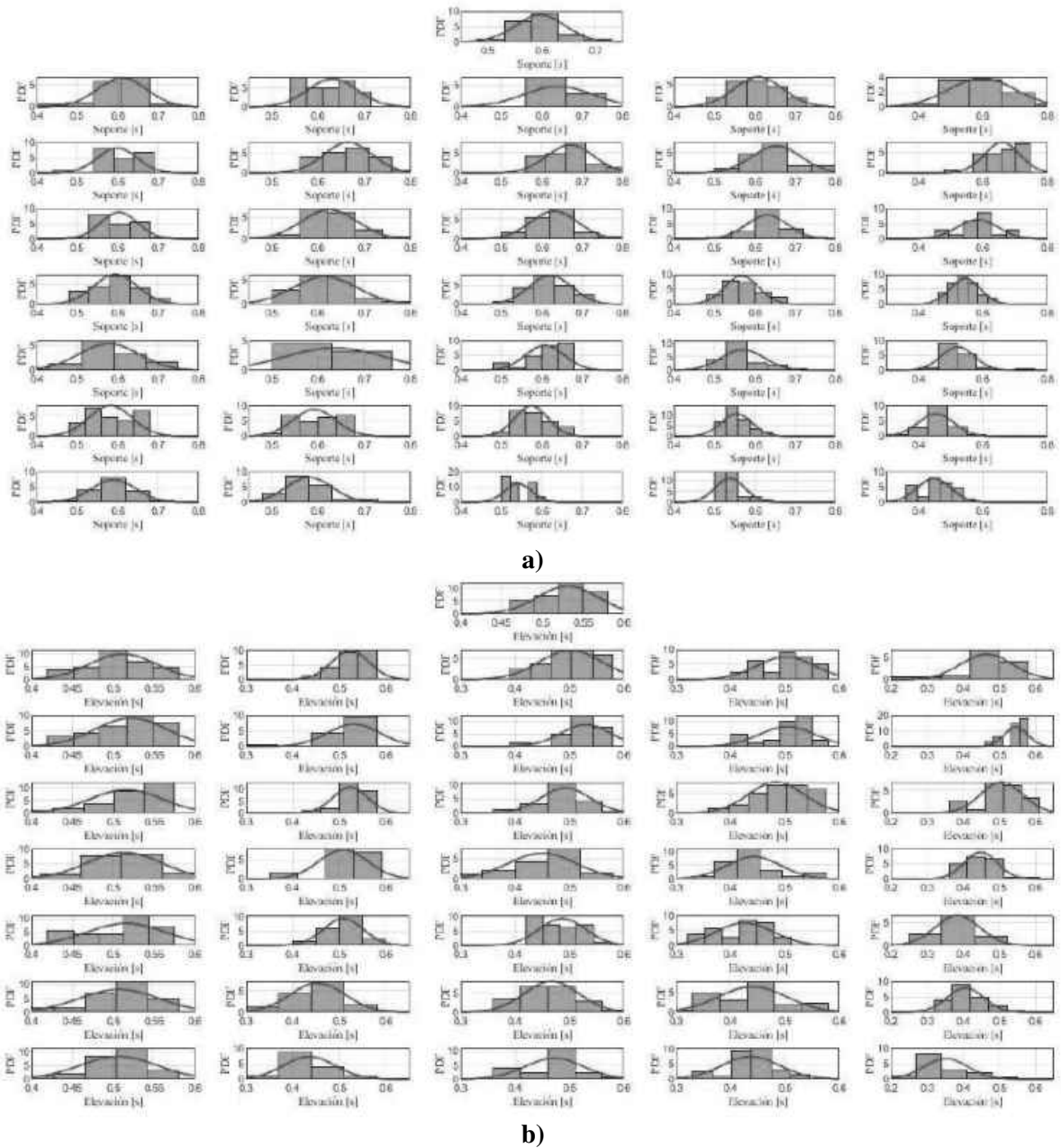


Figura 46. Anexo No.2 - SP No.6, Tiempos de soporte y elevación de pasos de marcha; **a)** Tiempos de soporte; **b)** Tiempos de elevación.

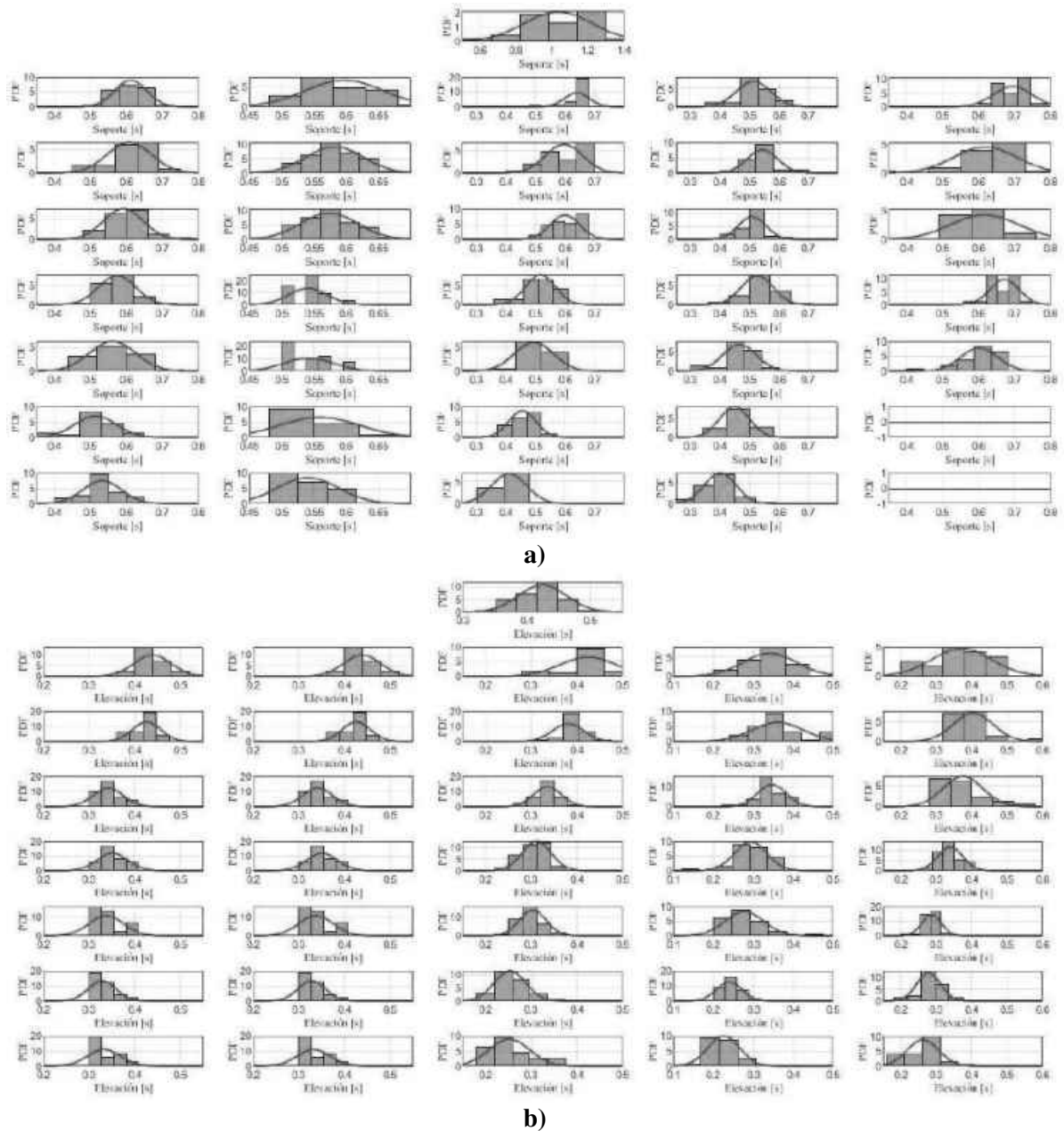


Figura 47. Anexo No.2 - SP No.7, Tiempos de soporte y elevación de pasos de marcha; a) Tiempos de soporte; b) Tiempos de elevación.

Tabla 7. Valores medios de soporte de pie sobre suelo durante un paso, SP No. 1→7.

	5 mm		10 mm		20 mm		30 mm		50 mm	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
<i>rígida</i>	0,895	0,039	0,895	0,039	0,895	0,039	0,895	0,039	0,895	0,039
0,7	0,898	0,050	0,829	0,036	0,952	0,043	0,831	0,063	0,829	0,036
0,8	0,894	0,056	0,856	0,122	0,900	0,041	0,865	0,040	0,857	0,123
0,9	0,818	0,044	0,833	0,039	0,895	0,055	0,822	0,046	0,833	0,039
1,0	0,821	0,033	0,785	0,048	0,895	0,039	0,819	0,034	0,785	0,048
1,1	0,829	0,045	0,799	0,044	0,884	0,048	0,810	0,051	0,799	0,044
1,2	0,824	0,053	0,802	0,045	0,881	0,048	0,810	0,046	0,802	0,044
1,3	0,823	0,050	0,822	0,062	0,841	0,066	0,795	0,041	0,823	0,062
<i>rígida</i>	0,798	0,075	0,798	0,075	0,798	0,075	0,798	0,075	0,798	0,075
0,7	0,836	0,045	0,829	0,055	0,835	0,044	0,616	0,083	0,689	0,066
0,8	0,842	0,028	0,807	0,047	0,746	0,040	0,558	0,085	0,677	0,062
0,9	0,799	0,047	0,773	0,054	0,722	0,033	0,557	0,058	0,605	0,100
1,0	0,763	0,028	0,732	0,035	0,674	0,048	0,522	0,070	0,584	0,072
1,1	0,748	0,038	0,704	0,032	0,569	0,066	0,516	0,078	0,588	0,132
1,2	0,795	0,045	0,671	0,031	0,486	0,069	0,510	0,078	0,469	0,072
1,3	0,738	0,039	0,662	0,040	0,561	0,072	0,509	0,054	0,418	0,066
<i>rígida</i>	0,989	0,044	0,989	0,044	0,989	0,044	0,989	0,044	0,989	0,044
0,7	0,951	0,047	0,952	0,052	0,899	0,044	0,879	0,058	0,837	0,099
0,8	0,932	0,055	0,867	0,034	0,808	0,048	0,722	0,049	0,744	0,098
0,9	0,938	0,052	0,871	0,055	0,730	0,030	0,680	0,066	0,678	0,048
1,0	0,895	0,050	0,824	0,052	0,658	0,034	0,623	0,031	0,638	0,101
1,1	0,869	0,047	0,775	0,048	0,654	0,035	0,569	0,034	0,555	0,037
1,2	0,891	0,052	0,738	0,052	0,603	0,051	0,531	0,037	0,501	0,024
1,3	0,889	0,041	0,685	0,054	0,612	0,090	0,489	0,029	0,461	0,027
<i>rígida</i>	0,853	0,066	0,853	0,066	0,853	0,066	0,853	0,066	0,853	0,066
0,7	0,858	0,038	0,838	0,060	0,823	0,074	0,793	0,084	0,852	0,114
0,8	0,853	0,049	0,800	0,047	0,833	0,068	0,827	0,055	0,791	0,076
0,9	0,896	0,056	0,771	0,050	0,733	0,032	0,714	0,053	0,697	0,064
1,0	0,826	0,052	0,794	0,080	0,673	0,043	0,688	0,050	0,638	0,059
1,1	0,808	0,041	0,796	0,091	0,672	0,061	0,712	0,067	0,574	0,046
1,2	0,812	0,082	0,775	0,075	0,597	0,058	0,692	0,056	0,503	0,038
1,3	0,841	0,052	0,755	0,078	0,667	0,082	0,673	0,063	0,460	0,039

<i>rígida</i>	0,853	0,066	0,853	0,066	0,853	0,066	0,853	0,066	0,853	0,066
<i>0,7</i>	0,884	0,045	0,884	0,045	0,876	0,053	0,864	0,075	0,837	0,095
<i>0,8</i>	0,804	0,037	0,804	0,037	0,843	0,038	0,820	0,048	0,845	0,050
<i>0,9</i>	0,809	0,030	0,809	0,030	0,786	0,044	0,759	0,041	0,731	0,052
<i>1,0</i>	0,809	0,058	0,809	0,058	0,699	0,064	0,702	0,041	0,663	0,038
<i>1,1</i>	0,767	0,050	0,767	0,050	0,625	0,042	0,635	0,043	0,624	0,027
<i>1,2</i>	0,745	0,046	0,745	0,046	0,618	0,055	0,594	0,033	0,555	0,028
<i>1,3</i>	0,720	0,041	0,720	0,041	0,579	0,062	0,554	0,046	0,504	0,038
<i>rígida</i>	0,597	0,046	0,597	0,046	0,597	0,046	0,597	0,046	0,597	0,046
<i>0,7</i>	0,611	0,061	0,632	0,053	0,641	0,085	0,609	0,061	0,597	0,103
<i>0,8</i>	0,599	0,049	0,665	0,052	0,671	0,058	0,654	0,061	0,659	0,055
<i>0,9</i>	0,604	0,046	0,624	0,060	0,631	0,058	0,631	0,051	0,584	0,063
<i>1,0</i>	0,595	0,054	0,615	0,068	0,622	0,052	0,568	0,042	0,545	0,046
<i>1,1</i>	0,579	0,074	0,636	0,106	0,608	0,048	0,570	0,053	0,522	0,051
<i>1,2</i>	0,582	0,053	0,592	0,046	0,574	0,040	0,555	0,038	0,454	0,055
<i>1,3</i>	0,591	0,055	0,581	0,049	0,542	0,033	0,538	0,036	0,448	0,052
<i>rígida</i>	1,036	0,192	1,036	0,192	1,036	0,192	1,036	0,192	1,036	0,192
<i>0,7</i>	0,612	0,045	0,597	0,061	0,640	0,042	0,514	0,058	0,695	0,054
<i>0,8</i>	0,608	0,062	0,582	0,044	0,597	0,064	0,544	0,053	0,619	0,088
<i>0,9</i>	0,592	0,055	0,573	0,044	0,599	0,050	0,509	0,047	0,617	0,094
<i>1,0</i>	0,574	0,051	0,541	0,030	0,516	0,051	0,526	0,054	0,672	0,041
<i>1,1</i>	0,562	0,064	0,542	0,038	0,494	0,066	0,467	0,057	0,602	0,052
<i>1,2</i>	0,515	0,057	0,559	0,061	0,455	0,046	0,449	0,051	NaN	NaN
<i>1,3</i>	0,533	0,053	0,541	0,047	0,410	0,060	0,400	0,054	NaN	NaN

$\mu \rightarrow$ Valor medio

$\sigma \rightarrow$ Valor desviación estándar

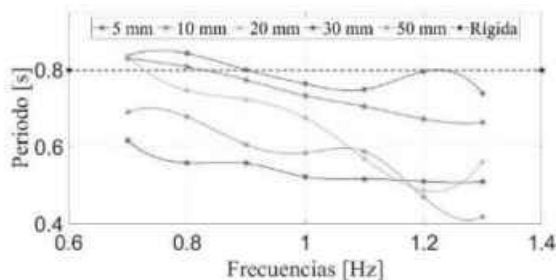
Tabla 8. Valores medios de suspensión de pie sobre suelo durante un paso, SP No. 1→7.

	5 mm		10 mm		20 mm		30 mm		50 mm	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
<i>rígida</i>	0,453	0,030	0,453	0,030	0,895	0,030	0,453	0,030	0,453	0,030
0,7	0,438	0,032	0,478	0,035	0,392	0,045	0,352	0,033	0,481	0,053
0,8	0,441	0,031	0,478	0,026	0,372	0,027	0,386	0,027	0,467	0,084
0,9	0,496	0,030	0,493	0,044	0,383	0,022	0,325	0,026	0,444	0,085
1,0	0,507	0,036	0,493	0,036	0,350	0,024	0,345	0,028	0,481	0,058
1,1	0,506	0,026	0,471	0,045	0,364	0,037	0,351	0,039	0,468	0,037
1,2	0,499	0,043	0,473	0,041	0,361	0,031	0,357	0,039	0,482	0,044
1,3	0,495	0,033	0,474	0,056	0,352	0,034	0,353	0,039	0,472	0,065
<i>rígida</i>	0,459	0,076	0,459	0,076	0,798	0,076	0,459	0,076	0,459	0,076
0,7	0,377	0,030	0,377	0,037	0,370	0,051	0,505	0,064	0,408	0,071
0,8	0,395	0,027	0,382	0,030	0,336	0,048	0,511	0,069	0,405	0,071
0,9	0,359	0,035	0,367	0,036	0,346	0,044	0,517	0,057	0,441	0,069
1,0	0,337	0,024	0,337	0,032	0,356	0,047	0,467	0,070	0,421	0,049
1,1	0,320	0,027	0,327	0,027	0,402	0,056	0,420	0,078	0,389	0,059
1,2	0,336	0,033	0,322	0,025	0,431	0,059	0,401	0,063	0,365	0,070
1,3	0,329	0,032	0,314	0,058	0,375	0,071	0,336	0,061	0,362	0,049
<i>rígida</i>	0,421	0,032	0,421	0,032	0,989	0,032	0,421	0,032	0,421	0,032
0,7	0,414	0,026	0,406	0,033	0,391	0,039	0,415	0,060	0,388	0,089
0,8	0,385	0,042	0,397	0,038	0,379	0,041	0,364	0,043	0,394	0,070
0,9	0,385	0,031	0,354	0,044	0,354	0,038	0,378	0,039	0,428	0,048
1,0	0,373	0,031	0,376	0,029	0,343	0,028	0,375	0,033	0,385	0,036
1,1	0,374	0,032	0,360	0,029	0,281	0,035	0,341	0,034	0,358	0,036
1,2	0,365	0,040	0,332	0,028	0,275	0,034	0,311	0,036	0,335	0,030
1,3	0,353	0,021	0,297	0,029	0,258	0,030	0,279	0,023	0,309	0,028
<i>rígida</i>	0,425	0,037	0,425	0,037	0,853	0,037	0,425	0,037	0,425	0,037
0,7	0,416	0,035	0,443	0,049	0,454	0,050	0,432	0,086	0,459	0,071
0,8	0,416	0,036	0,441	0,036	0,417	0,041	0,418	0,033	0,416	0,054
0,9	0,423	0,047	0,388	0,037	0,385	0,031	0,371	0,030	0,401	0,057
1,0	0,386	0,034	0,413	0,047	0,326	0,028	0,354	0,034	0,368	0,052
1,1	0,379	0,033	0,398	0,043	0,333	0,056	0,365	0,070	0,332	0,039
1,2	0,393	0,049	0,404	0,062	0,342	0,030	0,323	0,054	0,328	0,044
1,3	0,403	0,040	0,398	0,058	0,356	0,059	0,318	0,048	0,314	0,039

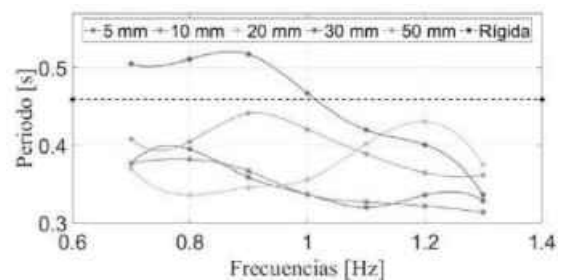
<i>rígida</i>	0,425	0,037	0,425	0,037	0,853	0,037	0,425	0,037	0,425	0,037
<i>0,7</i>	0,439	0,040	0,439	0,040	0,425	0,061	0,342	0,067	0,372	0,084
<i>0,8</i>	0,426	0,031	0,426	0,031	0,381	0,034	0,361	0,064	0,404	0,056
<i>0,9</i>	0,342	0,033	0,342	0,033	0,336	0,030	0,347	0,036	0,375	0,056
<i>1,0</i>	0,351	0,033	0,351	0,033	0,312	0,032	0,294	0,041	0,339	0,035
<i>1,1</i>	0,338	0,038	0,338	0,038	0,303	0,030	0,278	0,048	0,287	0,028
<i>1,2</i>	0,328	0,030	0,328	0,030	0,253	0,034	0,240	0,032	0,278	0,034
<i>1,3</i>	0,333	0,036	0,333	0,036	0,252	0,045	0,226	0,040	0,262	0,045
<i>rígida</i>	0,531	0,036	0,531	0,036	0,597	0,036	0,531	0,036	0,531	0,036
<i>0,7</i>	0,512	0,041	0,524	0,040	0,502	0,057	0,502	0,053	0,464	0,071
<i>0,8</i>	0,522	0,044	0,531	0,056	0,530	0,046	0,504	0,051	0,546	0,032
<i>0,9</i>	0,516	0,044	0,523	0,037	0,493	0,045	0,484	0,051	0,506	0,058
<i>1,0</i>	0,514	0,045	0,509	0,052	0,450	0,062	0,443	0,049	0,449	0,045
<i>1,1</i>	0,516	0,048	0,508	0,043	0,487	0,043	0,426	0,053	0,384	0,062
<i>1,2</i>	0,507	0,049	0,453	0,059	0,467	0,050	0,440	0,063	0,406	0,051
<i>1,3</i>	0,507	0,047	0,436	0,055	0,472	0,053	0,437	0,053	0,353	0,060
<i>rígida</i>	0,533	0,042	0,533	0,042	1,036	0,042	0,533	0,042	0,533	0,042
<i>0,7</i>	0,529	0,040	0,486	0,058	0,466	0,074	0,423	0,050	0,232	0,047
<i>0,8</i>	0,555	0,021	0,502	0,041	0,484	0,044	0,446	0,063	0,219	0,056
<i>0,9</i>	0,543	0,032	0,534	0,036	0,512	0,049	0,448	0,034	0,240	0,042
<i>1,0</i>	0,506	0,048	0,497	0,034	0,483	0,044	0,477	0,040	0,287	0,038
<i>1,1</i>	0,510	0,042	0,469	0,045	0,422	0,064	0,435	0,053	0,308	0,047
<i>1,2</i>	0,494	0,049	0,377	0,055	0,379	0,034	0,387	0,044	NaN	NaN
<i>1,3</i>	0,486	0,044	0,401	0,035	0,368	0,045	0,376	0,042	NaN	NaN

$\mu \rightarrow$ Valor medio

$\sigma \rightarrow$ Valor desviación estándar



a)



b)

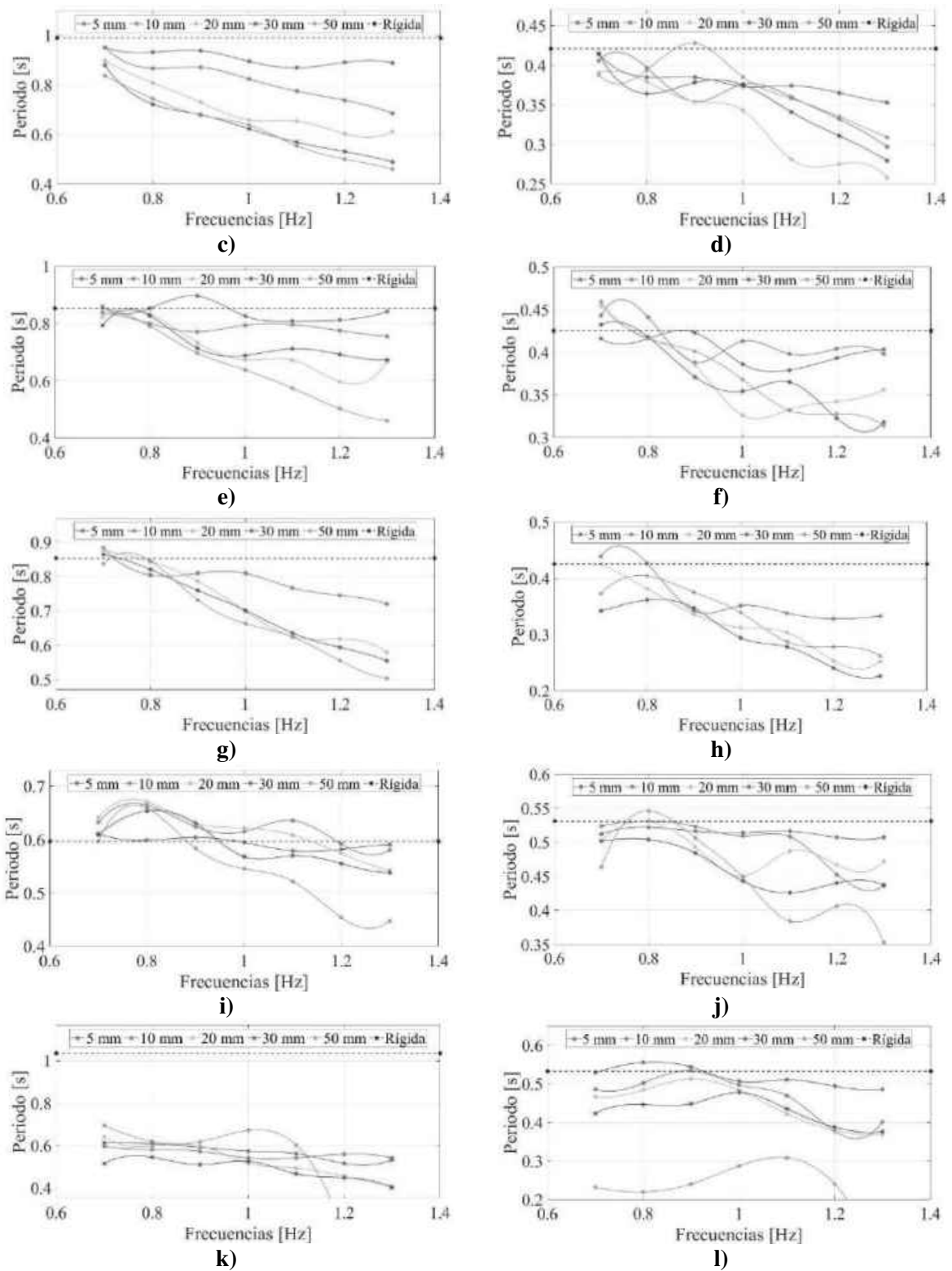


Figura 48. Anexo No.2: Periodos de soporte y elevación vs Frecuencia; [a, b]) SP No. 2; [c, d]) SP No. 3; [e, f]) SP No. 4; [g, h]) SP No. 5; [i, j]) SP No. 6; [k, l]) SP No. 7.

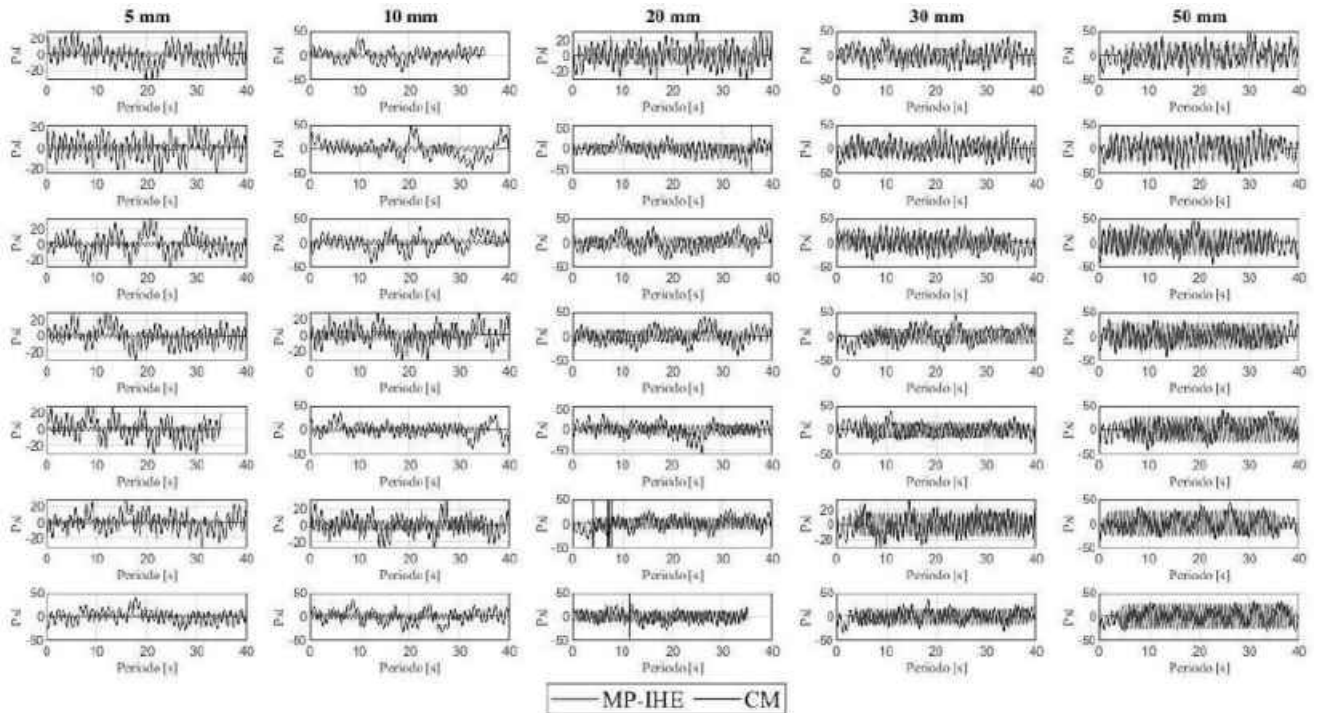


Figura 49. Anexo No.2, Desplazamientos en pixeles del CM y del MP-IHE, SP No.2.

Tabla 9. Anexo No.2, Valores de correlación de desplazamientos CM y MP-IHE, SP No.2.

Frec. Lat.	Desplazamientos				
	5 mm	10 mm	20 mm	30 mm	50 mm
0.7	0.007	0.003	0.000	0.011	0.142
0.8	0.232	0.001	0.000	0.060	0.287
0.9	0.059	0.010	0.056	0.006	0.070
1.0	0.004	0.004	0.048	0.184	0.001
1.1	0.000	0.000	0.003	0.024	0.019
1.2	0.004	0.000	0.000	0.010	0.035
1.3	0.001	0.000	0.005	0.000	0.075

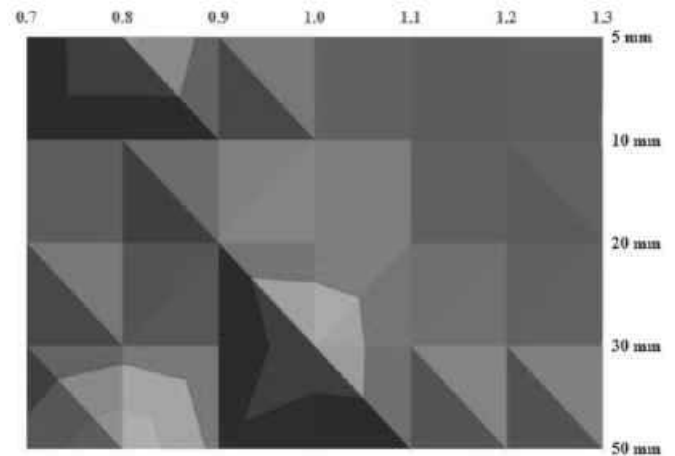


Figura 50. Anexo No.2, Superficies de correlaciones entre desplazamientos del CM y MP-IHE, SP No.2.

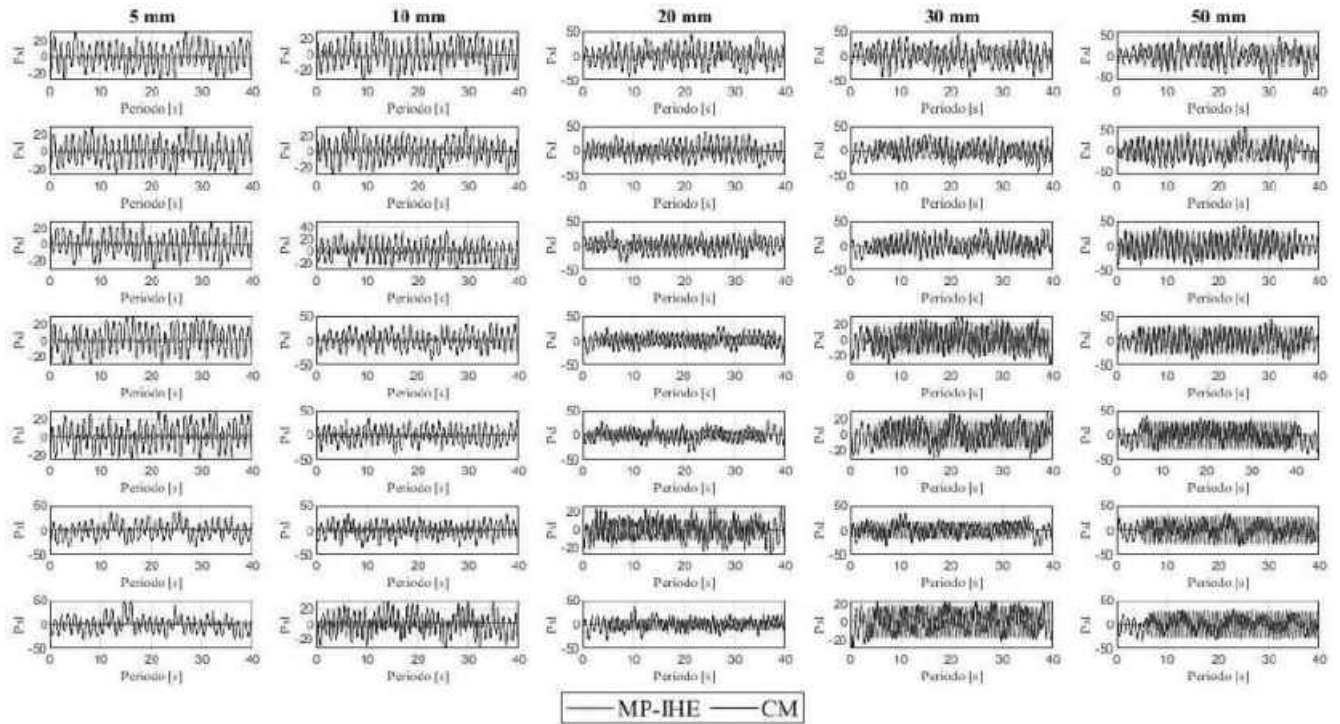


Figura 51. Anexo No.2, Desplazamientos en pixeles del CM y del MP-IHE, SP No.3.

Tabla 10. Anexo No.2, Valores de correlación de desplazamientos CM y MP-IHE, SP No.3.

Frec. Lat.	Desplazamientos				
	5 mm	10 mm	20 mm	30 mm	50 mm
0.7	0.000	0.237	0.028	0.096	0.123
0.8	0.013	0.179	0.023	0.074	0.315
0.9	0.000	0.029	0.017	0.118	0.232
1.0	0.001	0.001	0.283	0.000	0.253
1.1	0.000	0.000	0.035	0.129	0.013
1.2	0.000	0.000	0.045	0.149	0.025
1.3	0.001	0.000	0.001	0.350	0.079

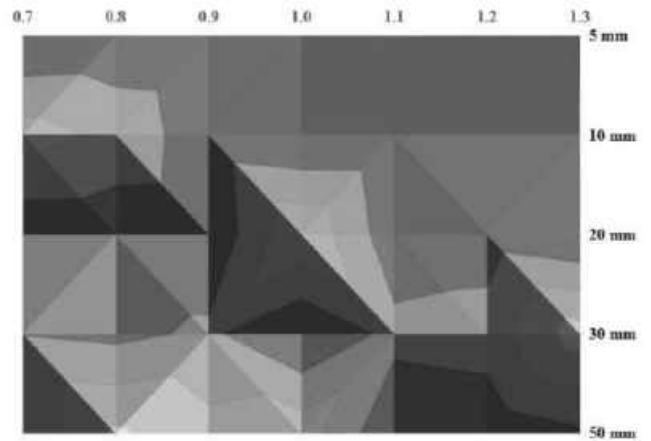


Figura 52. Anexo No.2, Superficies de correlaciones entre desplazamientos del CM y MP-IHE, SP No.3.

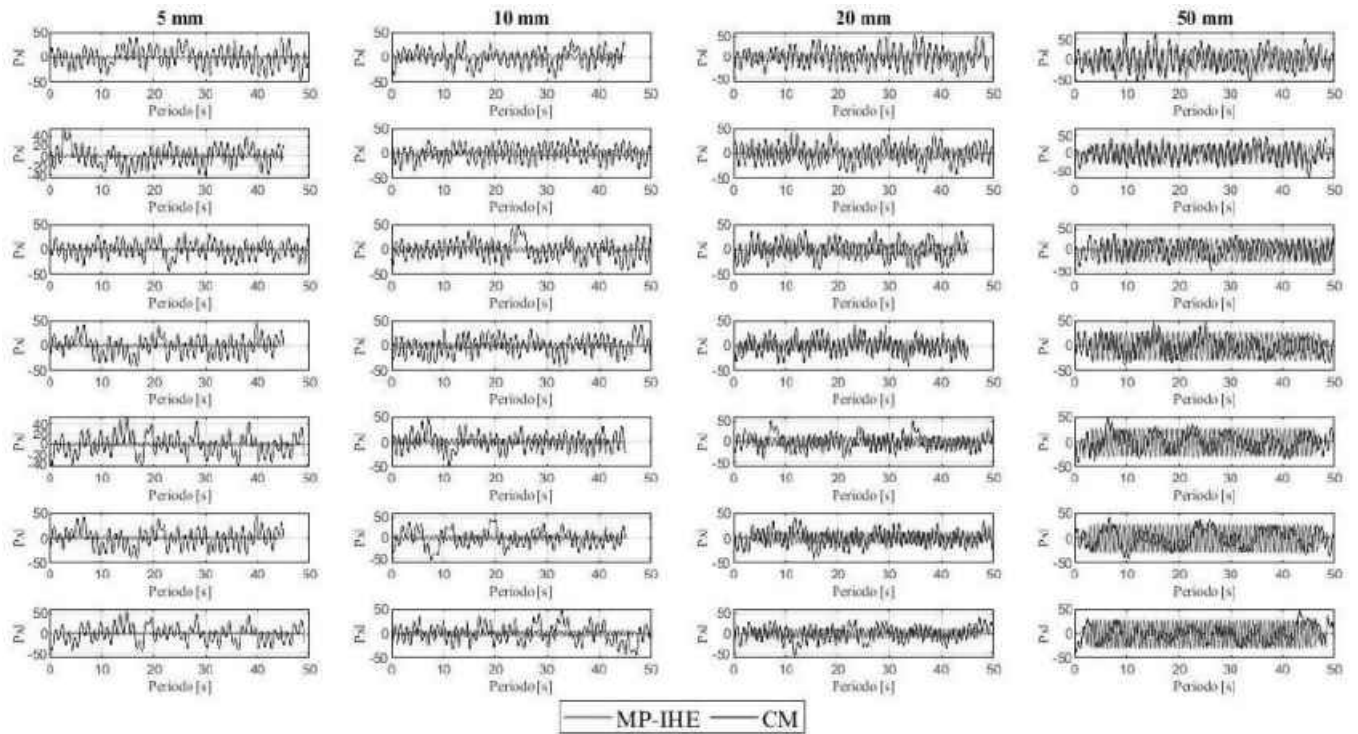


Figura 53. Anexo No.2, Desplazamientos en pixeles del CM y del MP-IHE, SP No.4.

Tabla 11. Anexo No.2, Valores de correlación de desplazamientos CM y MP-IHE, SP No.4.

Frec. Lat.	Desplazamientos				
	5 mm	10 mm	20 mm	30 mm	50 mm
0.7	0.010	0.014	0.063	0.000	0.017
0.8	0.006	0.438	0.137	0.000	0.289
0.9	0.002	0.161	0.270	0.000	0.016
1.0	0.002	0.013	0.208	0.000	0.010
1.1	0.000	0.002	0.011	0.000	0.084
1.2	0.002	0.003	0.007	0.000	0.139
1.3	0.000	0.001	0.011	0.000	0.097

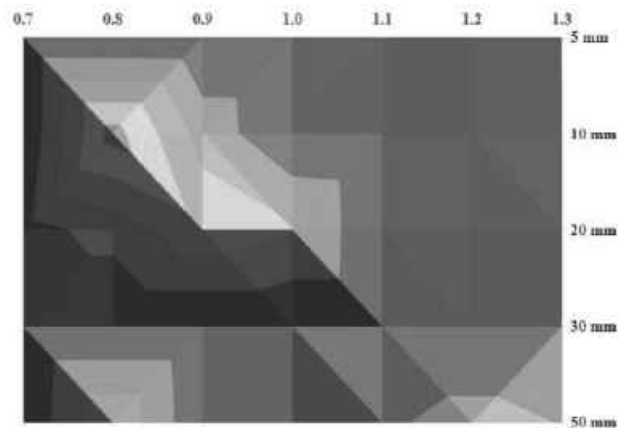


Figura 54. Anexo No.2, Superficies de correlaciones entre desplazamientos del CM y MP-IHE, SP No.4.

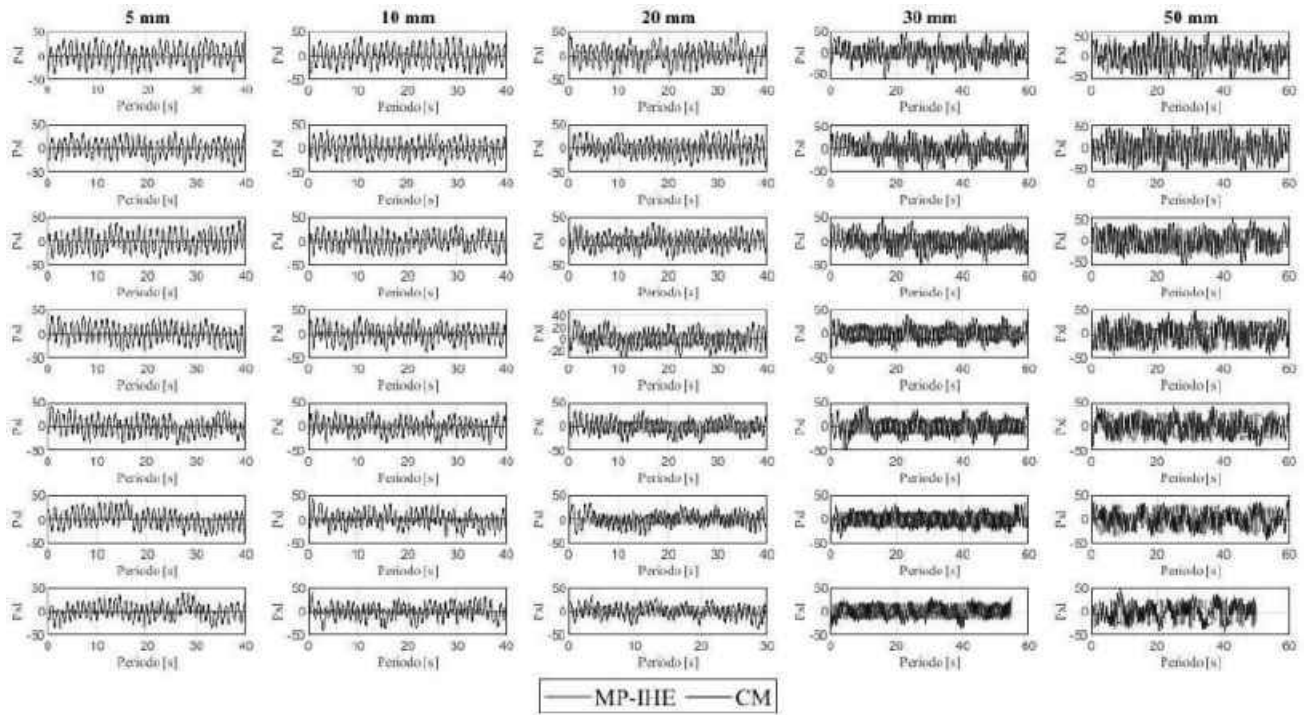


Figura 55. Anexo No.2, Desplazamientos en pixeles del CM y del MP-IHE, SP No.5.

Tabla 12. Anexo No.2, Valores de correlación de desplazamientos CM y MP-IHE, SP No.5.

Frec. Lat.	Desplazamientos				
	5 mm	10 mm	20 mm	30 mm	50 mm
0.7	0.017	0.150	0.050	0.050	0.183
0.8	0.580	0.001	0.009	0.007	0.284
0.9	0.003	0.102	0.307	0.252	0.140
1	0.004	0.007	0.371	0.571	0.062
1.1	0.001	0.001	0.323	0.402	0.002
1.2	0.000	0.003	0.002	0.616	0.006
1.3	0.001	0.000	0.011	0.573	0.000

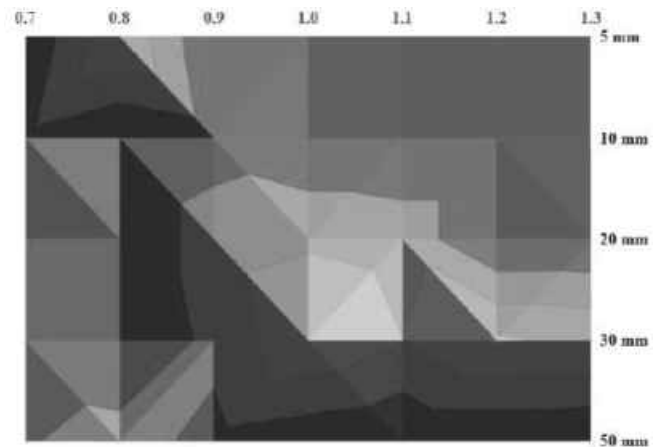


Figura 56. Anexo No.2, Superficies de correlaciones entre desplazamientos del CM y MP-IHE, SP No.5.

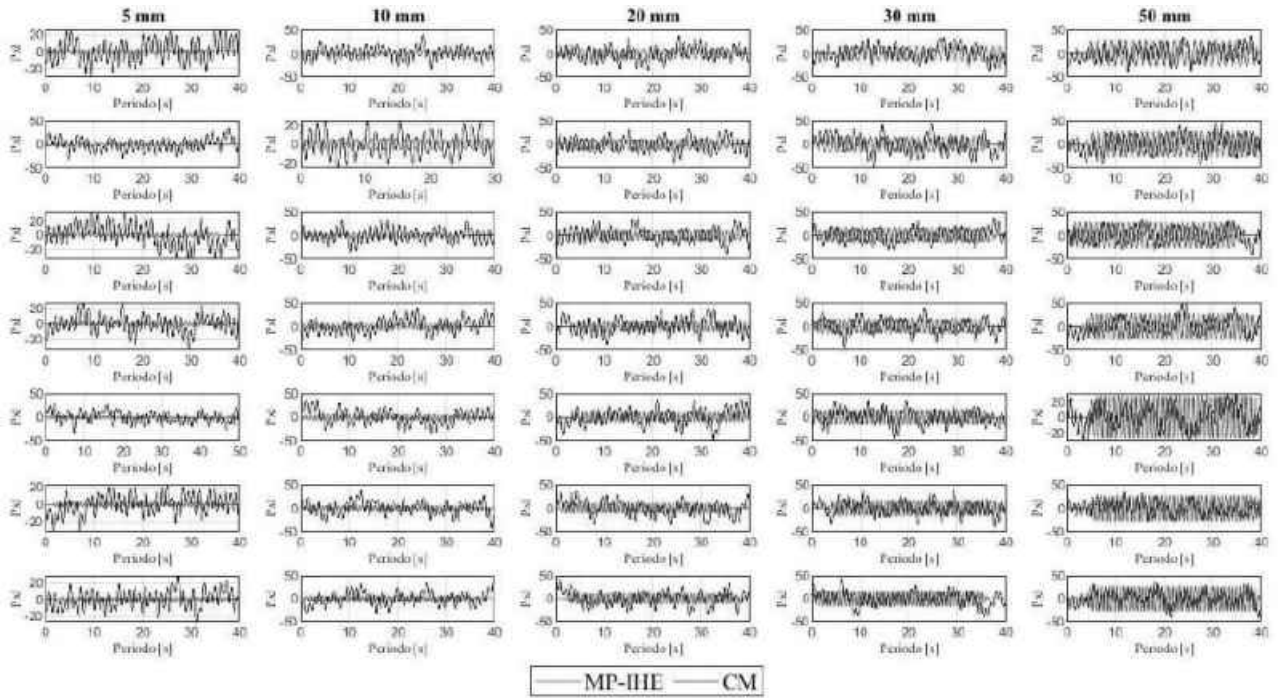


Figura 57. Anexo No.2, Desplazamientos en pixeles del CM y del MP-IHE, SP No.6.

Tabla 13. Anexo No.2, Valores de correlación de desplazamientos CM y MP-IHE, SP No.6.

Frec. Lat.	Desplazamientos				
	5 mm	10 mm	20 mm	30 mm	50 mm
0.7	0.001	0.002	0.002	0.003	0.006
0.8	0.004	0.225	0.231	0.001	0.092
0.9	0.127	0.081	0.194	0.420	0.372
1.0	0.006	0.008	0.044	0.329	0.270
1.1	0.005	0.000	0.012	0.014	0.128
1.2	0.003	0.002	0.007	0.005	0.023
1.3	0.001	0.001	0.003	0.002	0.085

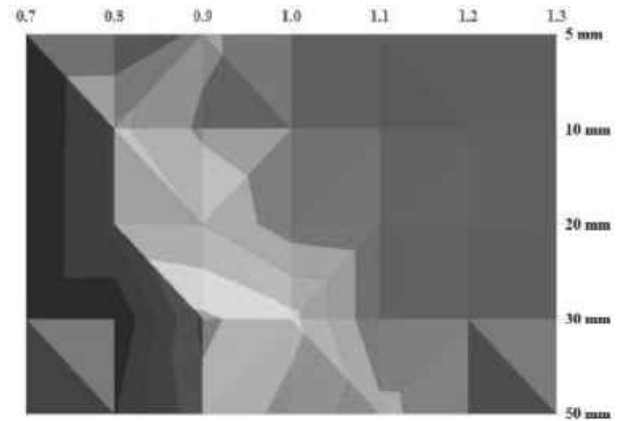


Figura 58. Anexo No.2, Superficies de correlaciones entre desplazamientos del CM y MP-IHE, SP No.6.

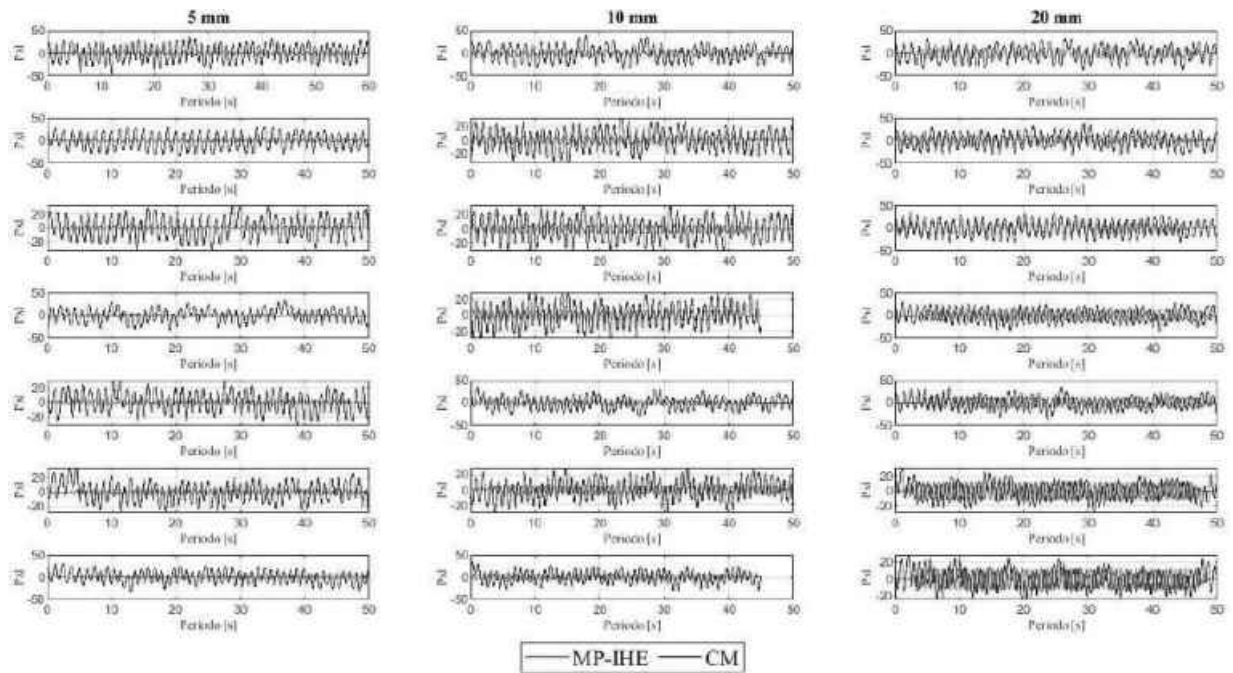


Figura 59. Anexo No.2, Desplazamientos en pixeles del CM y del MP-IHE, SP No.7.

Tabla 14. Anexo No.2, Valores de correlación de desplazamientos CM y MP-IHE, SP No.7.

Frec. Lat.	Desplazamientos				
	5 mm	10 mm	20 mm	30 mm	50 mm
0.7	0.003	0.004	0.012	NA	NA
0.8	0.129	0.062	0.056	NA	NA
0.9	0.046	0.352	0.502	NA	NA
1.0	0.003	0.302	0.178	NA	NA
1.1	0.000	0.007	0.175	NA	NA
1.2	0.001	0.004	0.391	NA	NA
1.3	0.000	0.001	0.471	NA	NA

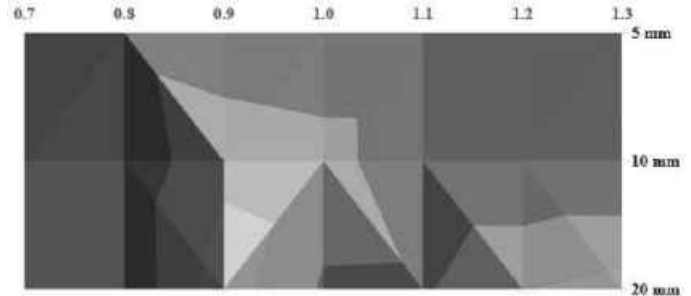


Figura 60. Anexo No.2, Superficies de correlaciones entre desplazamientos del CM y MP-IHE, SP No.7.

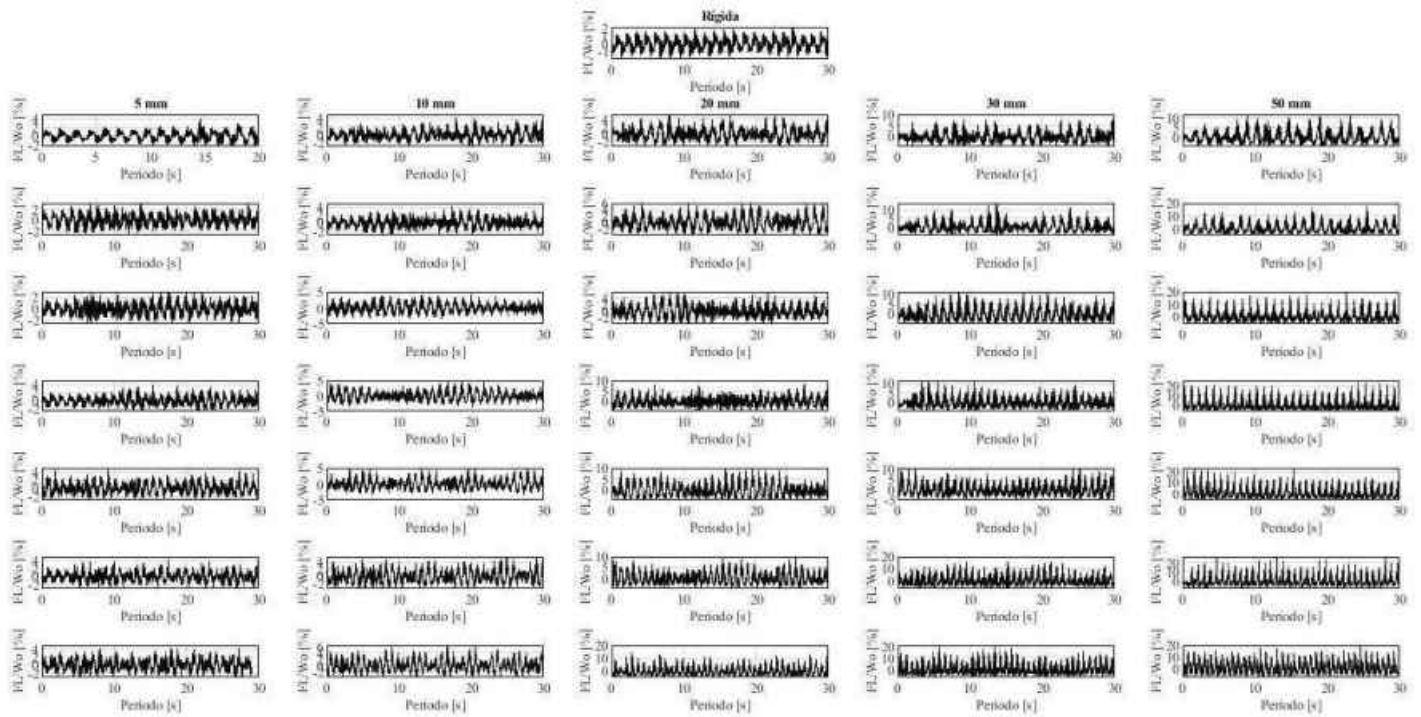


Figura 61. Anexo No.2, Fuerzas laterales inducidas por la marcha, SP No.2.

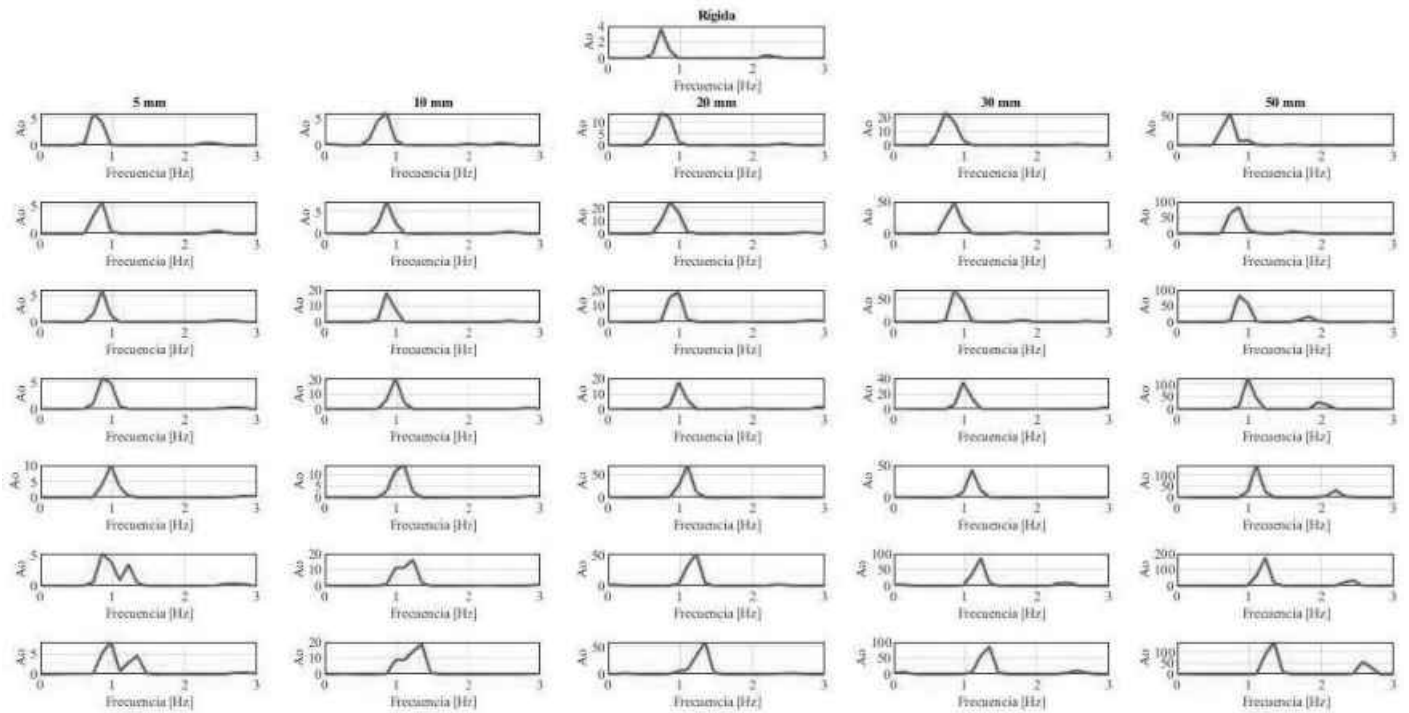


Figura 62. Anexo No.2, Datos en frecuencia de las fuerzas laterales inducidas por la marcha, SP No.2.

Tabla 15. Anexo No.2, Valores de coeficientes de las fuerzas laterales inducidas por SP No.2.

Frec. Lat.	Desplazamientos				
	5 mm	10 mm	20 mm	30 mm	50 mm
0.7	4.03	4.19	5.37	7.97	11.74
0.8	3.17	4.14	6.10	13.79	18.18
0.9	2.96	4.11	5.84	11.22	19.82
1.0	3.96	4.46	8.62	11.68	25.44
1.1	4.55	4.66	9.64	10.78	23.65
1.2	4.20	5.61	9.58	15.36	26.81
1.3	4.46	6.39	15.22	20.66	18.25

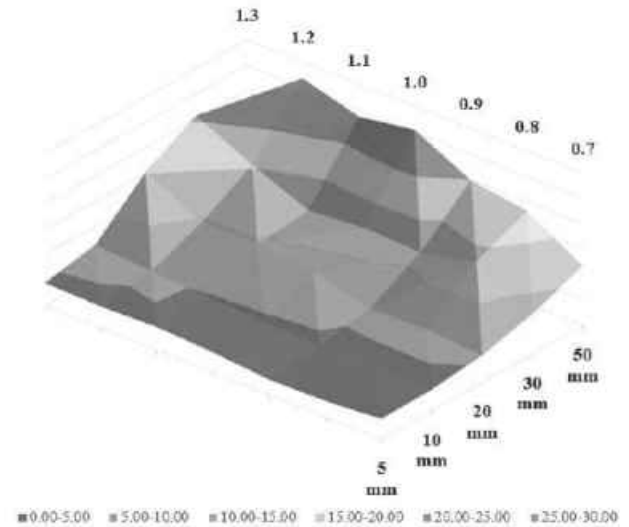


Figura 63. Anexo No.2, Superficies de los valores de coeficientes de las fuerzas laterales inducidas por SP No.2.

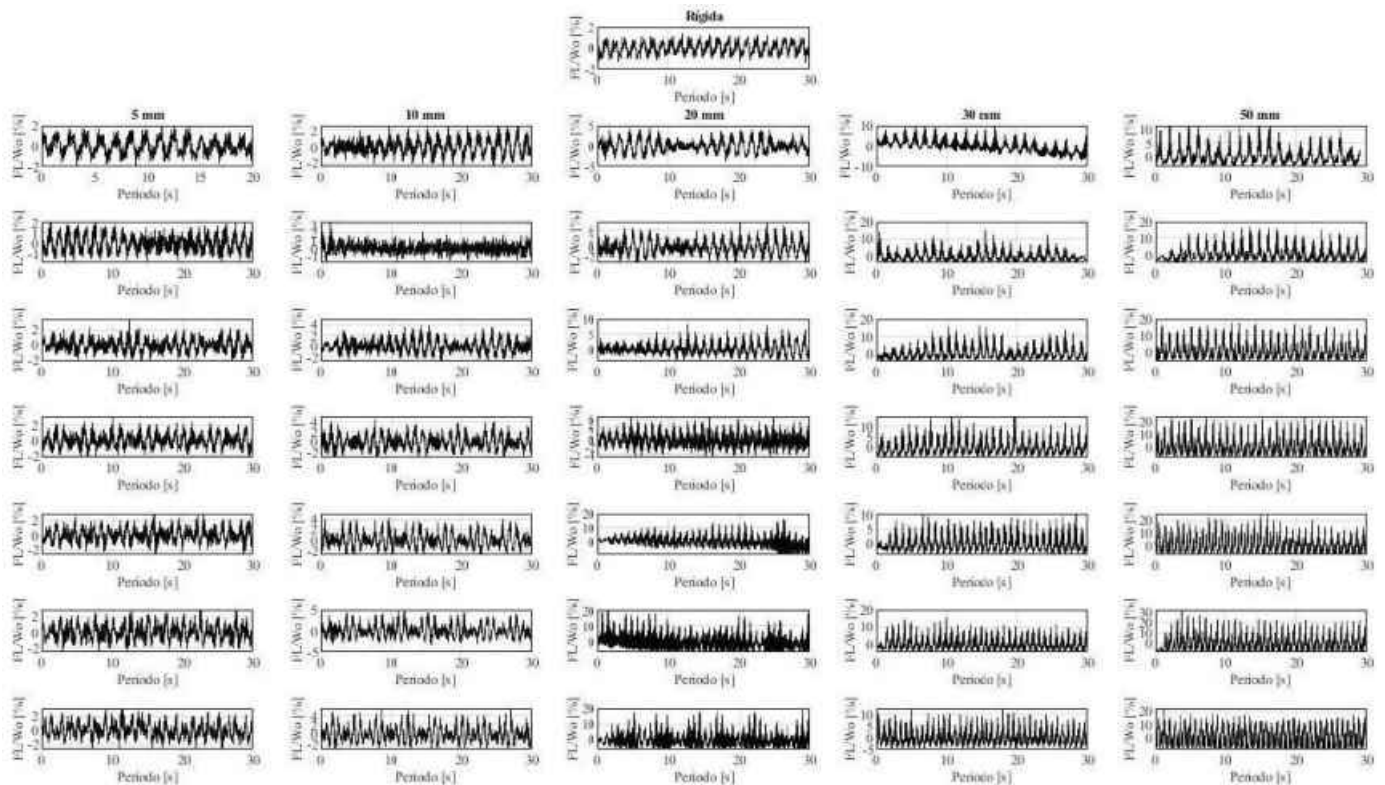


Figura 64. Anexo No.2, Fuerzas laterales inducidas por la marcha, SP No.3.

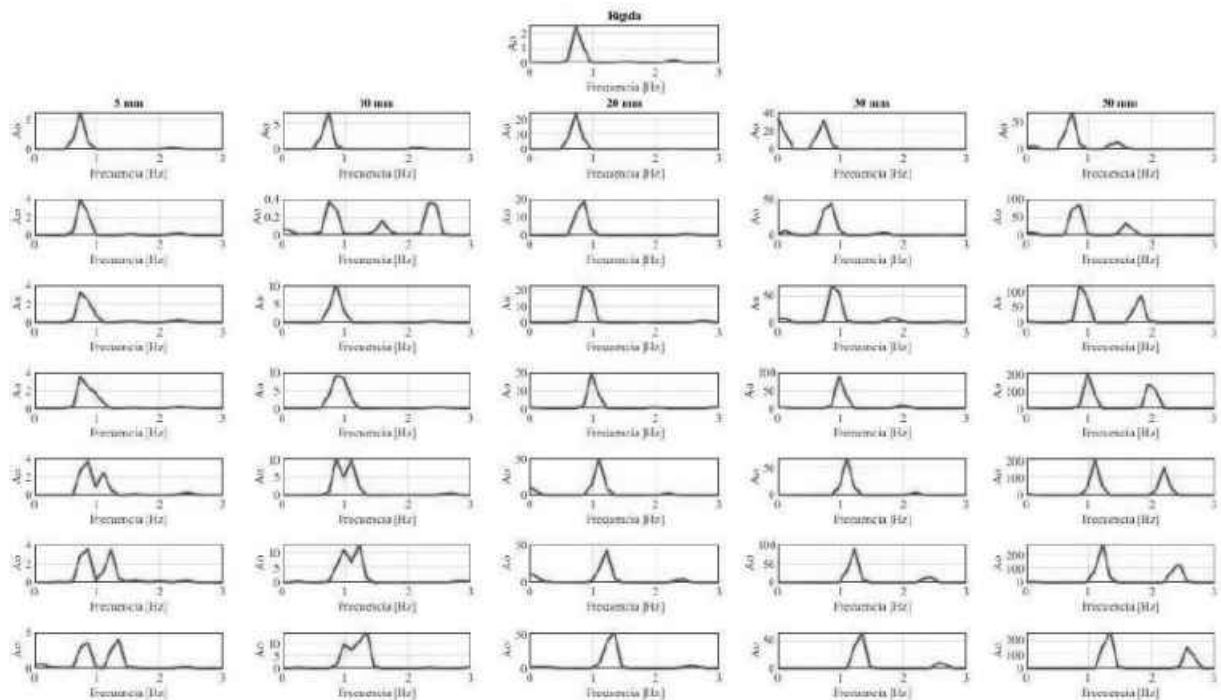


Figura 65. Anexo No.2, Datos en frecuencia de las fuerzas laterales inducidas por la marcha, SP No.3.

Tabla 16. Anexo No.2, Valores de coeficientes de las fuerzas laterales inducidas por SP No.3.

Frec. Lat.	Desplazamientos				
	5 mm	10 mm	20 mm	30 mm	50 mm
0.7	1.91	2.60	4.44	9.57	11.56
0.8	2.08	3.42	5.75	16.15	16.95
0.9	3.41	3.84	8.26	16.26	17.72
1.0	3.07	4.42	6.78	14.54	23.38
1.1	2.92	4.29	16.34	10.43	25.09
1.2	2.90	4.88	20.86	15.15	32.06
1.3	3.16	5.52	18.91	12.68	22.21

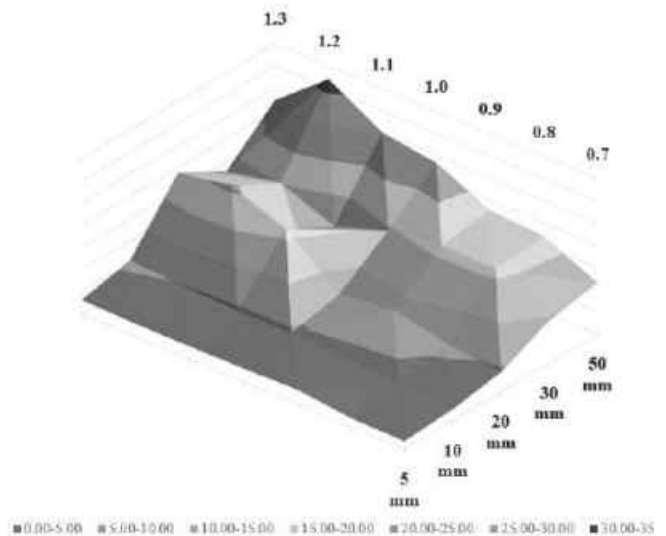


Figura 66. Anexo No.2, Superficies de los valores de coeficientes de las fuerzas laterales inducidas por SP No.3.