

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**ACTUALIZACIÓN DE TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES USADAS EN
EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO EN CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JAVIER ANDRÉS CALDERÓN CORAIL

**PROFESOR GUÍA
MARÍA OFELIA MORONI YADLIN**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
GIAN MARIO GIULIANO MORBELLI
MAXIMILIANO ARTURO ASTROZA INOSTROZA**

**SANTIAGO DE CHILE
ENERO 2007**

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: JAVIER CALDERÓN CORAIL
FECHA: 15/01/2007
PROF. GUÍA: SRA. MARÍA OFELIA MORONI YADLIN

“ACTUALIZACIÓN DE TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES USADAS EN EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO EN CHILE”

El objetivo de este trabajo es revisar las tipologías estructurales usadas en edificios de hormigón armado en los últimos años, estimar su vulnerabilidad y estudiar el impacto que ha tenido la ley de revisión estructural sobre su rigidez y densidad de muros.

Este trabajo se basa en el análisis de los parámetros H/T (altura/período) y densidad de muros para el estudio de las características estructurales de los edificios. Se tomaron como antecedentes estudios anteriores de desempeño de edificios de hormigón armado, estudios de vulnerabilidad sísmica y estudios de tipologías estructurales.

Para el desarrollo de este estudio se seleccionó una muestra de 76 edificios con su documentación de cálculo y análisis sísmico lo que se normalizó en una ficha tipo. Se aplicó una metodología de Inspección Visual Rápida (ATC-21), se calcularon los parámetros H/T, densidad de muros y d_{np} , y se analizaron los resultados obtenidos los que se compararon con la información histórica para estudiar su evolución. Adicionalmente se analizó el impacto de la ley de revisión estructural.

Las conclusiones de este trabajo indican que existe una leve disminución en la rigidez y resistencia de las estructuras entre los años 1939-2006, manteniéndose aún en los rangos aceptables, lo que no necesariamente confirma un supuesto relajamiento de las prácticas de diseño estructural. Por otro lado, el impacto de la ley de revisión estructural se observa principalmente en el aumento de la rigidez de los edificios que cuentan con revisores independientes.

Como trabajo futuro se propone la extensión de la muestra, la evaluación de otras características estructurales y no estructurales además de la proposición de acciones concretas para la adaptación de la metodología de Inspección Visual Rápida para edificios chilenos. Todas estas propuestas apuntan a mejorar la precisión y la representatividad de los análisis.

AGRADECIMIENTOS

Deseo hacer presente mi agradecimiento a todas las personas que colaboraron en el desarrollo de este trabajo.

Agradezco a los profesores guías el Sr. Maximiliano Astroza y Sra. María Ofelia Moroni por su desinteresada y valiosa formación durante los últimos meses.

Se agradece a los Sres. Iván Hrepic, Pedro Bartolomé, José Jiménez, Alfonso Larraín, Demetrio Concha, Eduardo Spoerer, René Lagos, Julio Yoma y Guido Cavalla por permitir el acceso a la información de sus respectivas oficinas, y al Sr. Alejandro Hernández de la Municipalidad de Ñuñoa.

A todos mis amigos, a mi familia a los cuales les quité el tiempo que se merecen mientras duró esta etapa y espero poder retribuir a partir de hoy todo el tiempo perdido.

A todas las personas que anónimamente me ayudaron a completar esta memoria.

Con todo mi cariño esta memoria está dedicada a mis padres Gustavo y Marcela; a mis hermanas Marcela y María José

"El valor de una persona no se mide por las veces en que lo derriban, sino por las veces en que se levanta y sigue hacia adelante."

ÍNDICE GENERAL:	PÁGINA
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1. Organización de la memoria	3
CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES Y METODOLOGÍA	4
2.1. Trabajos realizados sobre la caracterización de edificios de hormigón armado chilenos	5
2.2. Metodología	6
CAPÍTULO 3: SELECCIÓN DE LA MUESTRA DE EDIFICIOS A ESTUDIAR	7
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DE EDIFICIOS	17
4.1. Parámetro H/T	17
4.2. Densidad de muros	26
4.3. Densidad de muros por unidad de piso y unidad de peso	40
4.4. Peso sísmico	48
4.5. Acoplamiento modal	49
4.6. Análisis de impacto de la ley de revisión estructural sobre la rigidez y la densidad de muros en edificios de hormigón armado	52
4.7. Comentarios relacionados con el contenido del capítulo	57
CAPÍTULO 5: INSPECCIÓN VISUAL RÁPIDA DE EDIFICIOS PARA DETERMINAR POTENCIALES PELIGROS SÍSMICOS	62
5.1. Aplicación del método	68
5.2. Discusión de la aplicación del método	69
5.3. Comparación entre daños esperados en términos de H/T y aplicando el método de inspección visual rápida	71
CAPÍTULO 6: COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	73
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	75
ANEXOS	77
Anexo 1, Plano regulador de Ñuñoa	78
Anexo 2, Fichas tipo	80

Tabla 1, Edificios de la muestra original	10
Tabla 2, Oficinas de cálculo.	11
Gráfico 1, Distribución del número de pisos en el tiempo de los edificios de la muestra original.	11
Figura 1, Plano regulador de la Comuna de Ñuñoa.	12
Tabla 3, Zonificación de plano regulador de Ñuñoa.	13
Tabla 4, Datos de la ficha tipo.	14
Gráfico 2, Valores de H/T para los edificios de la muestra final.	18
Gráfico 3, Distribución porcentual de los edificios de la muestra final de acuerdo con los valores recomendados por Guendelman et al. (1997) para clasificar los edificios según el parámetro H/T.	19
Gráfico 4, Distribución porcentual de los edificios construidos entre los años 1939-2000 según los rangos de valores de H/T propuestos por Guendelman et al. (1997).	20
Gráfico 5, Distribución porcentual de los edificios construidos entre los años 1939-2006 según los rangos de valores de H/T propuestos por Guendelman et al. (1997).	20
Gráfico 6, Distribución detallada por año del número de casos según los valores del parámetro H/T para edificios construidos entre los años 1939-2006.	21
Gráfico 7, Tendencia de evolución del parámetro H/T entre los años 1939-2006.	22
Gráfico 8, Tendencia de evolución de la mediana del parámetro H/T entre los años 1939-2006.	23
Gráfico 9, Valores de H/T para los edificios de Concepción.	23
Gráfico 10, Distribución porcentual de los edificios de Concepción de acuerdo con los valores recomendados por Guendelman et al. (1997) para clasificar los edificios según el parámetro H/T.	24
Gráfico 11, Valores de H/T para los edificios de Antofagasta.	24
Gráfico 12, Distribución porcentual de los edificios de Antofagasta de acuerdo con los valores recomendados por Guendelman et al. (1997) para clasificar los edificios según el parámetro H/T.	25
Gráfico 13, Densidad de muros del piso tipo de los edificios de la muestra final.	27
Gráfico 14, Distribución porcentual de la densidad de muros en el piso tipo de los edificios de la muestra final.	27
Gráfico 15, Densidad de muros del primer piso de los edificios de la muestra final.	28
Gráfico 16, Distribución porcentual de la densidad de muros en el primer piso de los edificios de la muestra final.	28
Tabla 5, Espesores mínimos para piso tipo, primer piso y piso subterráneo de los edificios de la muestra final.	30
Gráfico 17, Densidad de muros del piso subterráneo de los edificios de la muestra final.	31
Gráfico 18, Distribución porcentual de la densidad de muros en el piso subterráneo de los edificios de la muestra final.	32
Gráfico 19, Distribución porcentual de la densidad de muros en el piso tipo de los edificios construidos entre los años 1939-2000.	33
Gráfico 20, Distribución porcentual de la densidad de muros en el piso tipo de los edificios de hormigón armado construidos entre los años 1939-2006.	33
Gráfico 21, Distribución del número de casos según el valor de la densidad de muros en piso tipo para la muestra de edificios construidos entre los años 1939-2006.	35
Gráfico 22, Valores de la densidad de muros en el piso tipo para los edificios de hormigón armado construidos entre los años 1939-2006.	36
Gráfico 23, Valores de la mediana de la densidad de muros en el piso tipo para los edificios de hormigón armado construidos entre los años 1939-2006.	36
Tabla 6, Densidad de muro promedio por dirección.	37
Gráfico 24, Densidad de muros del piso tipo de los edificios de Concepción.	38
Gráfico 25, Distribución porcentual de la densidad de muros en el piso tipo de los edificios de Concepción.	38
Gráfico 26, Densidad de muros del piso tipo de los edificios de Antofagasta.	39
Gráfico 27, Distribución porcentual de la densidad de muros en el piso tipo de los edificios de Antofagasta.	39
Gráfico 28, Valores de d_{np} del piso tipo de los edificios de la muestra final.	40
Gráfico 29, Distribución porcentual de d_{np} en el piso tipo de los edificios de hormigón armado de la muestra final.	41
Gráfico 30, Valores de d_{np} en el primer piso de los edificios de la muestra final.	42
Gráfico 31, Distribución porcentual de d_{np} en el primer piso de los edificios de hormigón armado de la muestra final.	42
Gráfico 32, Valores de d_{np} del piso subterráneo de los edificios de la muestra.	43
Gráfico 33, Distribución porcentual de d_{np} en el piso subterráneo de los edificios de hormigón armado de la muestra final.	43
Gráfico 34, Distribución porcentual de d_{np} en el primer piso de los edificios de hormigón armado construidos entre los años 1939-2000.	44
Gráfico 35, Distribución porcentual de d_{np} en el primer piso de los edificios construidos entre los años 1939-2006.	45
Gráfico 36, Distribución del número de casos según el valor de d_{np} en el primer piso para los edificios construidos entre los años 1939-2006.	45
Gráfico 37, Tendencia de variación de los valores de d_{np} del primer piso entre los años 1939-2006.	46
Gráfico 38, Tendencia de variación de los valores de la mediana de d_{np} del primer piso entre los años 1939-2006.	46

Gráfico 39, Evolución del peso sísmico.	48
Gráfico 40, Distribución porcentual de los edificios de la muestra final de acuerdo con los valores recomendados por Guendelman et al. (1997) para clasificar los edificios según el parámetro T_y/T_x	49
Gráfico 41, Distribución porcentual de los edificios de la muestra final de acuerdo con los valores recomendados por Guendelman et al. (1997) para clasificar los edificios según el parámetro T_ϕ/T_x	50
Gráfico 42, Distribución porcentual de los edificios de la muestra final de acuerdo con los valores recomendados por Guendelman et al. (1997) para clasificar los edificios según el parámetro T_ϕ/T_y	50
Gráfico 43, Distribución porcentual del valor de la relación H/T para edificios sometidos a revisión estructural.	55
Gráfico 44, Distribución porcentual de la densidad de muros en el piso tipo para los edificios sometidos a revisión estructural.	55
Gráfico 45, Distribución porcentual de d_{np} en el primer piso para edificios sometidos a revisión estructural.	56
Tabla 7, Nivel de daño esperado en función de H/T.	57
Gráfico 46, Distribución porcentual de los edificios de la muestra final de acuerdo con los valores recomendados por Guendelman et al. (1997) para clasificar los edificios según el parámetro H/T, con H medido desde el último subterráneo.	58
Gráfico 47, Tendencia de evolución del parámetro H/T entre los años 1939-2006, con H medido desde el último subterráneo.	59
Figura 2, Tabla de recolección de datos.	64
Gráfico 48, Resultado de la aplicación del método de inspección visual rápida sobre la muestra final de edificios.	68
Gráfico 49, Resultado de la aplicación del método de inspección visual rápida sobre la muestra final de edificios.	68
Tabla 8, Ejemplos de aplicación del método de inspección visual rápida.	69
Gráfico 50, Distribución porcentual de los edificios de la muestra final de acuerdo al nivel de daños esperados en términos de H/T.	71
Gráfico 51, Distribución porcentual de los edificios de la muestra final de acuerdo a su puntaje estructural final S.	72

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Públicamente se ha discutido durante el último tiempo el tema de la calidad de las obras en Chile, principalmente en lo relacionado con su comportamiento estructural frente a terremotos, dado que Chile es uno de los países más sísmicos del mundo.

Si bien en Chile se han aplicado criterios de diseño que han dado como resultado un edificio conocido como *edificio chileno* - que se caracteriza por tener un sistema de muchos muros estructurales y que tuvo un comportamiento satisfactorio durante el terremoto de Chile Central del 3 de marzo de 1985, esta tipología ha ido variando producto de haber cambiado los criterios de diseño y de incorporar edificios de mayor altura con una estructuración basada en marcos de nudos rígidos y plantas libres. Sobre este punto, el presidente de ACHISINA, (Baeza, 2001), observó que “con la evolución de la arquitectura mundial, los arquitectos empezaron a imitar lo que se hacía en otros lugares y, efectivamente, comenzó a perderse el típico edificio chileno que había dado buenos resultados”.

Si se caracterizan las tipologías estructurales usadas durante los últimos 40 años en los edificios de hormigón armado de menos de 40 pisos, se puede destacar que ellas han sido tradicionalmente las siguientes: muros de rigidez, muros con marcos de fachada y marcos con muros ubicados en la caja de escalera y/o ascensor. A partir de la década del 40 hasta la década del 60 la estructuración más usada en estas construcciones eran muros de rigidez, con muros de gran espesor (espesores mínimos mayores a 25 [cm]), dispuestos en la forma más regular posible. El hormigón utilizado era de menor calidad, con resistencia a la compresión a los 28 días del orden de 180 [kg/cm²], y las barras de acero eran lisas. La estructuración marco-muro apareció en la década del 60 pero tuvo un gran auge en la década del 80 en la construcción de edificios de mediana y gran altura.

El llamado “*edificio chileno*” utiliza fundamentalmente un sistema de muros de rigidez con una alta densidad de muros (área de muros en una dirección/área de la planta) con valores entre 0,015 a 0,035 (Sharon L. Wood, 1991), a diferencia de otros países como Estados Unidos, que siendo también un país sísmico, utiliza un sistema de marcos rígidos con densidad de muros menor que 0,005. Esta diferencia se explica principalmente porque en Chile, al destinarse estos edificios al uso habitacional, se exigió la existencia de muros divisorios entre departamentos (Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones), mientras que en Estados Unidos estos edificios se destinan principalmente a oficinas, por lo que se utilizan marcos de nudos rígidos para obtener plantas libres.

La consecuencia de tener una densidad de muros alta, es decir, una mayor presencia de muros, es tener una mayor rigidez con lo cual se reducen los desplazamientos totales y se evita el desplazamiento relativo entre niveles, disminuyendo así los niveles de daños causados por un sismo. Un ejemplo de ello fue el comportamiento observado en los edificios ubicados en la ciudad balneario de Viña del Mar durante el terremoto del 3 de marzo de 1985, con epicentro distante a unos 20 Km. de la costa y unos 15 Km. de profundidad km.

Se han realizado varios estudios para caracterizar los edificios de hormigón armado construidos en Chile, destacándose entre ellos el realizado por Guendelman et al. (1997) donde son analizados alrededor de 600 edificios construidos en Chile entre 1993 y 1997, proponiendo un perfil Bío-Sísmico cuyo objetivo es detectar mediante la comparación de ciertos parámetros obtenidos del análisis de los edificios con valores considerados como apropiados de acuerdo con la opinión de un grupo de expertos. Además, Guzmán (1998) analizó las características de las tipologías estructurales usadas en los edificios construidos entre 1953 y 1998; trabajo que completa Gómez (2001), analizando las tipologías estructurales de los edificios de hormigón armado construidos entre 1998 y 2001.

Además existen otros estudios para cuantificar la vulnerabilidad sísmica de estos edificios para lo cual se han usado diferentes índices de vulnerabilidad que consideran de alguna forma los diversos factores que influyen en el comportamiento sísmico de las estructuras de hormigón armado (Cáceres G. 2005, Giuliano et al. 2002).

La recopilación de nueva información permite continuar con esos trabajos y tener una idea clara de la evolución de las tipologías a lo largo de los años, especialmente de los últimos cinco años en los cuales se ha producido un aumento notable en la construcción de edificios de uso habitacional de más de 20 pisos. Situación que despierta algunas interrogantes sobre sus características que es necesario aclarar teniendo en cuenta, entre otros, la promulgación de la ley de revisión estructural (N° 19.748, año 2001), especialmente si se considera que esta ley surge de la observación de un cierto relajamiento de las prácticas de diseño estructural a partir del año 1985, como así también de la existencia de profesionales que, aunque por ley están autorizados para calcular, no necesariamente están capacitados para hacerlo por su poca experiencia y por la falta de especialización.

Por lo anterior, es interesante actualizar la base de datos de edificios de hormigón armado en forma periódica para estudiar el cambio de las tipologías estructurales chilenas, en particular, para estudiar el impacto que tienen las normas de diseño (Norma ACI 318) y las leyes que regulan el ejercicio de la profesión como es la ley de revisión estructural.

Para realizar este estudio se han definido los siguientes objetivos fundamentales:

- Revisar las tipologías estructurales usadas en edificios de hormigón armado en Chile.
- Actualizar los datos de tipologías estructurales chilenas para estudiar sus cambios y obtener conclusiones con respecto a la vulnerabilidad de las edificaciones.
- Estudiar el impacto de la ley de revisión estructural sobre la rigidez y la densidad de muros en edificios de hormigón armado.

El estudio se concentra en una muestra de edificios construidos en la comuna de Ñuñoa entre 2001 y 2006.

1.1. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA

El capítulo dos presenta los antecedentes y trabajos anteriores revisados referentes a caracterización de edificios de hormigón armado, así como también la metodología utilizada para llevar a cabo este estudio.

El capítulo tres presenta la selección de la muestra de edificios a estudiar.

El capítulo cuatro presenta el análisis de la evolución de las características estructurales de edificios en base a parámetros como H/T, densidad de muros, densidad de muros por unidad de piso y unidad de peso. Asimismo se analiza el peso sísmico y el acoplamiento modal y se presenta un análisis del impacto de la ley de revisión estructural más conclusiones finales del capítulo.

El capítulo cinco muestra el método de Inspección Visual Rápida para la determinación de potenciales peligros sísmicos, se presentan los resultados de la aplicación de este método sobre los edificios de la muestra y finalmente se compara con daños esperados en términos del parámetro H/T.

El capítulo seis presenta los comentarios y conclusiones finales del estudio.

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES Y METODOLOGÍA

Este trabajo se basa en el análisis de dos parámetros: la relación H/T y la densidad de muros para el estudio de las características estructurales de los edificios.

El *parámetro H/T* (altura/período) fue escogido para este trabajo a raíz de que es considerado el mejor parámetro para medir la *rigidez traslacional* de un edificio de hormigón armado (Ríos, Music, Vladilo, 2005). Esta relación ha sido utilizada en varios estudios realizados en el país (Guzmán 1998, Gómez 2001, Guendelman et al. 1997, Riddell, Wood, De la Llera 1987) por lo que su uso está validado y al ser el producto del análisis de los edificios construidos en el país, refleja casos de estudios que están calibrados para la realidad sísmica nacional en la medida que se trate de edificios de menos de 40 pisos. Este parámetro fue considerado por Guendelman et al (1997) entre otras variables cuantitativas para definir el “Perfil Bio-Sísmico” de los edificios.

Por otro lado, el *parámetro de densidad de muros* ha sido escogido en este trabajo, considerando que se ha destacado que la alta densidad de muros ha sido una característica relevante en el buen comportamiento observado de nuestros edificios (Wood 1991). El concepto estructural de edificios de hormigón armado, estructuras rígidas con un gran número de muros, es el resultado de usar una disposición de la antigua norma chilena de diseño de hormigón armado relacionada con el diseño de elementos sometidos a esfuerzos de corte. Sobre el particular, esta norma establecía que para valores menores que un valor predeterminado de la tensión tangencial (dependiente de la calidad del hormigón), no era necesario considerar que el corte fuese resistido con armaduras: doble malla de acero en el caso de muros. La disposición de los calculistas de lograr esta condición significó usar una tensión tangencial debido al esfuerzo de corte relativamente baja lo que condujo a aumentar la densidad de muros.

Además de lo anterior, se debe tener en cuenta que la norma chilena de diseño sísmico de edificios ha considerado un corte basal mínimo en el diseño de edificios, lo que ha significado en los hechos aumentar la rigidez de la estructura, y en la versión que aplicaba hasta antes de 1986 se controlaba la torsión en planta de una forma tal que contribuyó al uso de mejores distribuciones de los muros en planta.

Producto de lo anterior, nuestros edificios han sido consecuencia de estos criterios y se caracterizan por tener casi sin excepción muros estructurales y muchas veces en gran densidad. Esta característica ha permitido no dar una atención especial a la ductilidad en el diseño de los muros sin consecuencias desastrosas y que en el diseño de elementos de los marcos de nudos rígidos que coexisten con los muros, en general no se les ha aplicado verificaciones especiales relacionadas con lograr un comportamiento dúctil. Con justicia a este tipo de edificios se le puede denominar como "modelo chileno de edificios de hormigón armado" y se trata de un sistema más fácil de construir que los sistemas que usan únicamente pórticos donde deben extremarse los cuidados en el detallamiento y el hormigonado de los nudos para conseguir la ductilidad requerida. (Rodrigo Flores, 1999).

2.1. TRABAJOS REALIZADOS SOBRE LA CARACTERIZACIÓN DE EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO CHILENOS

Existen varios estudios relevantes para este trabajo, uno de ellos es el desarrollado por Sharon L. Wood, (1991) quien analiza el desempeño de los edificios de hormigón armado durante el terremoto de 1985 en Chile. Este desastre natural se convirtió en una valiosa oportunidad para estudiar por primera vez la respuesta sísmica de los edificios de muros de hormigón armado frente a cargas laterales y verticales correspondientes a una condición extrema. Para el terremoto de 1985 existían en Viña del Mar más de 230 edificios de hormigón armado de altura moderada, la mayoría de los cuales contaban con una estructuración de muros. El análisis de los daños ocasionados por el terremoto indicaron que la mayoría de estos edificios fueron capaces de soportar el sismo sin presentar daños estructurales a pesar de que no seguían especificaciones de diseño para la respuesta dúctil detalladas en la norma estadounidense. El resultado de estos análisis indicó que fueron los muros estructurales los responsables de otorgar la suficiente rigidez para limitar el desplazamiento y evitar el daño. Las implicaciones de este estudio para el diseño de muros estructurales sugieren una relajación en los requerimientos de confinamiento si es que existe suficiente área de muros.

En lo relacionado con la caracterización de los edificios de hormigón armado chileno, se pueden destacar aquellos relacionados con el llamado Perfil-Sísmico propuesto por Guendelman et al. (1997). En los últimos años, se destaca entre ellos el trabajo realizado para una muestra de edificios de altura de hormigón armado construidos en Antofagasta por Ríos et al. (2005). En este trabajo se estudian las características estructurales de nueve edificios de altura de la ciudad de Antofagasta, utilizando trece indicadores estructurales entre los que se destaca la relación H/T . A pesar de que la densidad de muros no forma parte de los indicadores estructurales analizados, sí fue calculada para cada uno de los edificios del estudio, lo que sirve como dato comparativo.

Existe además un estudio de las tipologías estructurales para el diseño de edificios altos en Chile (Guzmán, 1998), que consideró el estudio de los parámetros *densidad de muros*, *densidad e muros por unidad de piso por unidad de peso* y H/T en aproximadamente 400 edificios construidos entre 1953 y 1998. Así mismo, Gómez realizó una caracterización de sistemas estructurales usados en viviendas de hormigón armado y albañilería reforzada en Chile (Gómez, 2001), que constituyó una continuación del trabajo de Guzmán.

Otros trabajos que se han desarrollado y que incluyen de alguna manera una caracterización de los edificios de hormigón armado construidos en Chile, están relacionado con estudios de la vulnerabilidad de estos edificios, con este propósito se ha utilizado algún índice cualitativo de vulnerabilidad sísmica de edificios de hormigón armado (Cáceres 2005, Giuliano et al. 2002). Los resultados de estos estudios no se incluyen en este recuento de antecedentes para conservar la línea de los trabajos realizados hasta la fecha (Guzmán 1998, Gómez, 2001).

En cualquier caso, el análisis de los resultados de los parámetros considerados se hará teniendo en cuenta los valores de ellos y los daños que se han observado en aquellos edificios que han experimentado los efectos de un terremoto. Este tipo de resultados puede ser útil para una estimación preliminar de la vulnerabilidad, lo que permite de alguna forma ordenar cualquier estudio de una muestra de edificios teniendo en cuenta la relación entre el valor de la relación H/T o la densidad de muros y los daños esperados frente a un sismo.

2.2. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo este estudio, se realizaron las siguientes actividades:

1. Selección de una muestra de edificios a estudiar: Para esta selección se consideró escoger un número de edificios que permitiera realizar este estudio en los plazos de un trabajo de título y se escogió una comuna relativamente central para optimizar las visitas a los edificios y oficinas de cálculo. En consecuencia se seleccionó una muestra inicial de 124 edificios de la comuna de Ñuñoa.
2. Obtención de documentación: Se identificaron los contactos de las oficinas responsables del cálculo estructural de los edificios de la muestra, luego se realizaron las visitas a estas oficinas para obtener los planos, la documentación de cálculo y análisis sísmico. Los edificios de los cuales se pudo obtener esta información conforman la muestra final.
3. Estandarización de la información recopilada: Se analizó la documentación obtenida para normalizar esta información y resumirla en un formato común, de tal manera de llenar una ficha por cada edificio con los datos más relevantes de cada uno.
4. Inspección visual rápida: Se aplicó la metodología de inspección visual rápida de edificios para determinar potenciales peligros sísmicos (Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards, FEMA, Julio 2005) sobre los edificios de la muestra final.
5. Análisis de datos y generación de resultados: Con esta información, se procedió a calcular los parámetros H/T (rigidez), densidad de muros y densidad de muros por unidad de piso y por unidad de peso (dnp). Asimismo se calculó el puntaje estructural final (S) de la metodología de la inspección visual rápida. Se analizaron, graficaron y compararon los resultados obtenidos de estos cálculos y se actualizó la base de datos de tipologías.

CAPÍTULO 3: SELECCIÓN DE LA MUESTRA DE EDIFICIOS A ESTUDIAR

Este trabajo contempla una muestra original que está constituida por 124 edificios construidos en la comuna de Ñuñoa entre el año 2001 y 2006. Esta muestra original corresponde al total de los edificios construidos en la comuna durante ese período hasta el comienzo de este estudio.

AÑO	EDIFICIO N°	NOMBRE EDIFICIO	N° PISOS	UBICACIÓN	N°	OFICINA
2001	001		5	Simón Bolívar	5228	2
	002	Duble Almeyda 3221	12	Duble Almeyda	3221	9
	003	Vista Real	12	Manuel Montt	2339	6
	004		12	Suecia	3500	27
	005	Exequiel Fernández 700	15	Exequiel Fernández	700	19
	006		9	Ricardo Lyon	3177	5
	007	Comunidad Plaza Washington	12	Jorge Washington	300	23
	008		6	Ricardo Lyon	2726	
	009		5	Arturo Medina	4144-4158	
	010		5	Augusto Villanueva	110	
	011		12	Suecia	2873	
	012		16	José Manuel Infante	2499-2511	
	013		9	Regina Pacis	725-745	
2002	014	José Domingo Cañas 1055	11	José Domingo Cañas	1055	27
	015		5	Brown Sur	280	9
	016		12	Sucre	2821	23
	017		5	Diego De Almagro	4718-4746	10
	018	Chile España 705	6	Chile España	705	23
	019	Los Tres Antonios 191	14	Los Tres Antonios	191	19
	020		8	Irarrázaval	1729	3
	021		9	Salvador	2084-2066	29

AÑO	EDIFICIO N°	NOMBRE EDIFICIO	N° PISOS	UBICACIÓN	N°	OFICINA
2002	022	Actual Cañas	15	Matta Oriente	437	4
				José Domingo Cañas	460	
	023		5	General Gorostiaga	848-866	9
	024		10	Ortúzar	587	19
	025		5	Irarrázaval	395-413	17
	026		14	Antonio Varas	2627	
	027	Plaza Ñuñoa	15	Duble Almeyda	3443	9
	028	Parque San Eugenio	16-19-15-15-19-16	San Eugenio	1065	21
029	Duble Almeyda	12	Duble Almeyda	2425	6	
2003	030		12	Capitán Fuentes	224-270	15
	031	Chile España 520	9	Chile España	520	7
	032		16	Duble Almeyda	1510-1556	9
	033		6	José Domingo Cañas	1675	22
	034		5	Ortúzar	140	
	035		17	Irarrázaval	5092-5096	9
	036	Nobel 3	11	Capitán Ignacio Carrera Pinto	1860	27
	037		7	Brown Norte	670	20
	038		8	Duble Almeyda	1531-1495	9
	039		11	Suecia	3439-3465	4
	040		5	Contramaestre Micalvi	20-26	12
	041	Vista Plaza	12	Manuel De Salas	147	9
	042		5	Los Jardines	91-105	9
	043		12	Ricardo Lyon	3254-3268	29
	044	Casa Nueva II	12	Leopoldo Urrutia	1900	21
	045		13	José Domingo Cañas	1727	19
	046	Duble Almeyda 3055	18	Duble Almeyda	3055	19
	047	Los Linderos	9	José Pedro Alessandri	1993	18
	048		16	Hernán Cortes	2781-2829	9
	049		5	Fernández Concha	432-444	6
050	Entre Plazas	12	Jorge Washington	325	9	
051		5	Julio Zegers	3783-3791	9	
052		10	Bremen	1120	27	
053	Manuel De Salas	10	Manuel De Salas	203	9	
2004	054		5	Los Jardines	325-341	9
	055		7	Villaseca	420	29
	056		14	Carmen Covarrubias	228-274	4
	057	Exequiel Fernández	20	Exequiel Fernández	55	9
	058	Espronceda 400	12	Espronceda	400	27

AÑO	EDIFICIO N°	NOMBRE EDIFICIO	N° PISOS	UBICACIÓN	N°	OFICINA
2004	059	Umbral Oriente	10	Jorge Washington	249	
	060	Lyon Oriente	13	Ricardo Lyon	2830	28
	061		5	Bremen	237-239	26
	062	Plaza Holanda	13	Holanda	3235	9
	063	Plaza Mirador	20	José Domingo Cañas	1640	1
	064		14	José Domingo Cañas	1540-1570	8
	065	Condell	15	Condell	1857	4
	066	Pedro Torres 1335	5	Pedro Torres	1335	9
	067	Parque Verde Oriente	11	Palqui	2943-2933	1
	068	Quirihue	14	Quirihue	255	28
	069	José Domingo Cañas 2551	16	José Domingo Cañas	2551	19
	070		14	Duble Almeyda	1590-1636	28
	071		5	Amapolas	4151-4161	24
	072	Francisco Villagra 77	24	Francisco De Villagra	77	21
073	Chile España Oriente	8	Chile España	757	9	
2005	074	Condominio Tenerife	5	Brown Sur	333	29
	075		10	Sucre	2593	9
	076	Lyon - Sucre	14	Ricardo Lyon 2987	2987	7
	077		5	Hamburgo	1020	9
	078		5	Los Salvavidas	1139	14
	079	Fernández Concha	12	Fernández Concha	105	
	080		16	Tegualda	1950-2008	
	081	Jorge Washington	13	Jorge Washington	400	21
	082	Casa Coventry	10	Pucara	4826	21
	083		7	Jorge Washington	512-520	9
	084		20-17	Exequiel Fernández	1675	30
	085	Emilia Téllez	12	Emilia Téllez	4849	20
	086	Nueva Salvador	13	Salvador	1921	27
	087	Villaseca 75	15	Villaseca	75	23
	088	Gran Horizonte	13	José Domingo Cañas	2550	27
	089	José Domingo Cañas 1585	20	José Domingo Cañas	1585	19
	090	Metro Plus	14	Pucara	5310	23
	091	Alonso De Ercilla	12	Chile España	353	4
	092		26	Irarrázaval	4534-4568	28
093	Al Ras	13	Sucre	1900	28	
094	Doctor Johow	13	Doctor Johow	987	9	
095		5	Montenegro	2242	13	
096	Ñuñoa Plaza	5	Doctor Johow	956	9	

AÑO	EDIFICIO N°	NOMBRE EDIFICIO	N° PISOS	UBICACIÓN	N°	OFICINA
2005	097		12	Capitán José Luís Araneda	218-262	27
	098	Araucarias Plaza Ñuñoa	15	Enrique Richard	3393	23
	099	Teniente Montt	14	Teniente Montt	1901	28
	100		5	Brown Sur	84-92	9
	101	José Domingo Cañas 2001	16	José Domingo Cañas	2001	23
	102		10	Granada	2173	23
	103	Holanda 3444	11	Holanda	3444	1
	104	Eduardo Castillo Velasco 3100	13	Alcalde Eduardo Castillo Velasco	3100	28
	105	Jardín Real	15	Quirihue	250	25
	106	Mirador Plaza Uribe	12	Luís Uribe	2925	21
	107	Parque Infante	20-22	José Manuel Infante	2340	28
	108		11	Villaseca	105-169	11
	109	Bachelor Plaza Ñuñoa	9	Jorge Washington	330	4
	110	Vital Ñuñoa	16	Duble Almeyda	1380	16
	111		12	Duble Almeyda	2016-2050	28
	112		15	Monseñor Eyzaguirre	250	28
	113		8	Villaseca	720-740	20
114	El Solar	11	José Domingo Cañas	982	4	
115	Los Alerces	14	Los Alerces	3330	11	
116		10	José Domingo Cañas	2962-2978	9	
117	Eliecer Parada	16	Eliecer Parada	778	20	
2006	118	Mosaic	25	Irarrázaval	1745	9
	119		15	Unión Literaria	2072	9
	120	Madrigal	11	Monseñor Eyzaguirre	245	21
	121		15	Salvador	2355-2389	20
	122		13	Exequiel Fernández	78-102	20
	123	Los Guindos	22	Irarrázaval	5091-5133	23
	124	San Jorge	5	San Jorge	90	25

Tabla 1, Edificios de la muestra original

OFICINAS			
1	Alfonso Larraín Vial	16	Luis de la Fuente Martínez
2	Antonio del Piano Pulema	17	Marcelo Salgado
3	Arce y Recine Asociados	18	Oscar Mehech Haleby
4	Cavalla, Raby, López Ingeniería Estructural Ltda.	19	Paolo Simonetti Bagnara
5	Cristián del Porte	20	B y B Ingeniería Estructural Ltda.
6	Demetrio Concha Larraín	21	R. Gatica - J. Jiménez Ingenieros Cia. Ltda.
7	Félix Gutiérrez Venegas	22	Ramón Díaz Araya
8	Gonzalo Concha L.	23	René Lagos y Asociados
9	Gonzalo Santolaya y Cia Ltda.	24	Rodrigo Concha Parada
10	Héctor Gastón Klein Soto	25	Sergio Contreras Arancibia
11	Hernán Urrutia San Martín	26	Sergio Rojo Anabalón
12	Juan Albornoz Martínez	27	Sociedad Menéndez Yoma Ingeniería Ltda.
13	Juan Carlos Canales Palacios	28	Spoerer y Asociados Ingeniería Ltda.
14	Juan Pablo Molina	29	Valenzuela y Ortiz Ingeniería Ltda.
15	Juan Rivera Cifuentes	30	Vogel, Mujica y Breschi Ingeniería Estructural

Tabla 2, Oficinas de cálculo.

Algunos de los edificios de la muestra original, no cuentan con la información de la oficina de cálculo puesto que se extravió la copia impresa de su permiso de edificación y sólo se cuenta con esta información en formato digital, la que no incluye los datos de la oficina.

El siguiente gráfico presenta la distribución de los edificios de la muestra original de acuerdo a su altura de edificación:

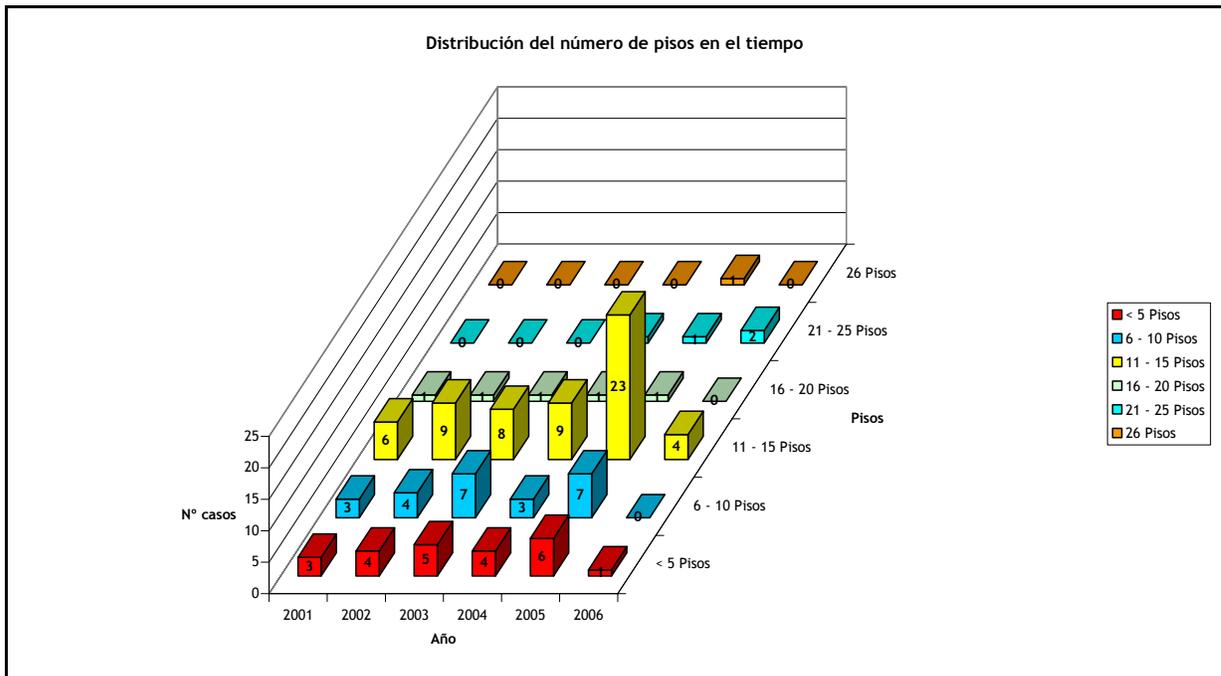


Gráfico 1, Distribución del número de pisos en el tiempo de los edificios de la muestra original.

Se puede observar en el gráfico 1 una escasa presencia de edificios sobre los 15 pisos, concentrándose la altura promedio alrededor de los 11 a 15 pisos, donde el período 2004-2005 presenta un explosivo crecimiento en la construcción elevando significativamente el índice de los edificios entre este rango de altura. Cabe recalcar que para el año 2006 fueron considerados sólo los edificios cuyo diseño fue realizado hasta marzo, lo que explica el bajo número de casos en el gráfico para este año.

La figura 1 muestra un esquema del plan regulador de la comuna de Ñuñoa sobre el cual se ha identificado la ubicación de cada edificio de la muestra original. El plano regulador completo de la comuna, disponible en el Anexo 1, permite ver si los edificios de la muestra original cumplen con las alturas máximas de edificación y visualizar más claramente las zonas en que se está construyendo en altura.

La altura de edificación (en pisos) se dividió en 5 tramos, asignando a cada tramo un color para luego asignar al edificio el color correspondiente dentro del plano regulador.

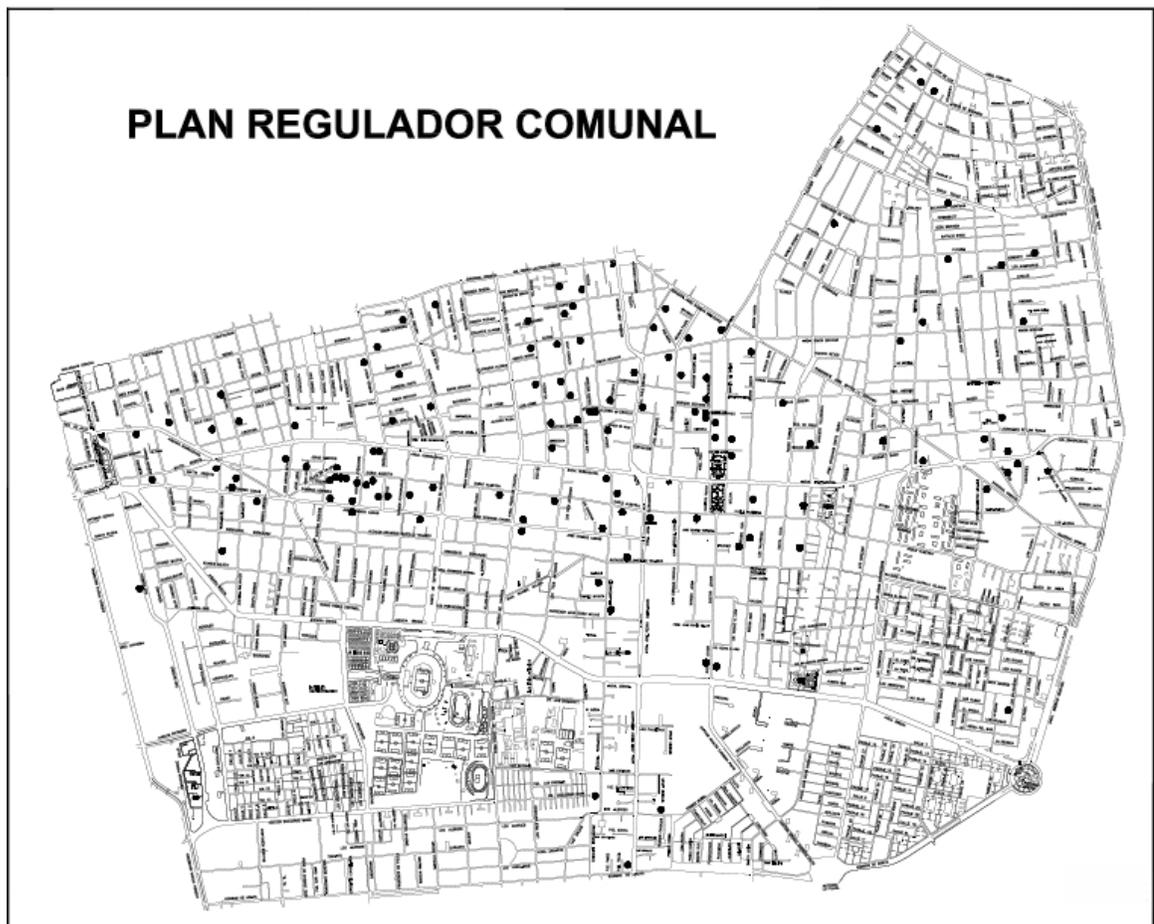


Figura 1, Plano regulador de la Comuna de Ñuñoa.

El plano regulador está separado por zonas, cada una de éstas tiene una restricción de altura máxima de edificación específica:

Zona	Altura máxima
Z-1	7 [mts]
Z-1 Tramo A	17,5 [mts]
Z-1 Tramo B	17,5 [mts]
Z-2	Libre según rasante (60°)
Z-2 Tramo A	Libre según rasante (60°)
Z-3	Libre según rasante (60°)
Z-3 Tramo A	Libre según rasante (60°)
Z-4	5 pisos
Z-4 Tramo A	17,5 [mts]
Z-5	Libre según rasante (60°)
Z-6	8 [mts]
ZI-1	Libre según rasante (60°)
Z-8	14 [mts]

Tabla 3, Zonificación de plano regulador de Ñuñoa.

Se determinó la utilización de una ficha tipo que reúna las principales características del edificio. Esta ficha tipo está confeccionada de manera tal que resuma y represente de manera clara las principales características de la estructura. Está basada en la publicación “Structural systems for tall buildings” del Council on Tall Building and Habitat (1995). De manera adicional se decidió incorporar a esta ficha, una fotografía para aquellos edificios donde fuera posible obtenerla.

Los datos que contiene la ficha son los siguientes:

FICHA					
1	Nombre:	25	Primer Piso <ul style="list-style-type: none"> • Altura: • Longitud planta (Dirección longitudinal): • Ancho planta (Dirección transversal): • Espesor de losa: • Área de planta: • Área de huecos de la planta: • Peso: • Espesor de muros: • Densidad de muros <ul style="list-style-type: none"> ○ Longitudinal: ○ Transversal: • Altura de viga típica: • Columnas: <ul style="list-style-type: none"> ○ Dimensiones: ○ Separación: 	29 <ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de líneas resistentes Primer Piso • N° de líneas resistentes dirección longitudinal: • N° de líneas resistentes dirección transversal: • Número de muros dirección longitudinal: • Longitud de muros dirección longitudinal: • Número de muros fachada dirección longitudinal: • Longitud de muros fachada dirección longitudinal: • Número de muros dirección transversal: • Longitud de muros dirección transversal: • Número de muros fachada dirección transversal: • Longitud de muros fachada dirección transversal: 	
2	Arquitecto:				
3	Cálculo estructural:				
4	Ubicación:				
5	Sector de Urbanización Comunal:				
6	Año de entrega:				
7	Uso:				
8	Número de pisos:				
9	Número de subterráneos:				
10	Tipología estructural:				
11	Normas utilizadas en su diseño:				
12	Sobrecarga considerada:	26	Subterráneo <ul style="list-style-type: none"> • Altura: • Longitud planta (Dirección longitudinal): • Ancho planta (Dirección transversal): • Espesor de losa: • Área de huecos de la planta: • Peso: • Espesor de muros: • Densidad de muros <ul style="list-style-type: none"> ○ Longitudinal: ○ Transversal: • Altura de viga típica: • Columnas <ul style="list-style-type: none"> ○ Dimensiones: ○ Separación: 	30 <ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de líneas resistentes Subterráneo • N° de líneas resistentes dirección longitudinal: • N° de líneas resistentes dirección transversal: • Número de muros dirección longitudinal: • Longitud de muros dirección longitudinal: • Número de muros fachada dirección longitudinal: • Longitud de muros fachada dirección longitudinal: • Número de muros dirección transversal: • Longitud de muros dirección transversal: • Número de muros fachada dirección transversal: • Longitud de muros fachada dirección transversal: 	
13	Sobrecarga diseño sísmico:				
14	Zona sísmica:				
15	Tipo de suelo:				
16	Materiales: <ul style="list-style-type: none"> • Tipo de hormigón utilizado: • Tipo de acero utilizado: 				
17	Módulo de elasticidad del hormigón:				
18	Número de cuerpos que forman la planta:				
19	Separación entre cuerpos:				
20	Altura sobre el nivel del suelo:				
21	Altura total:				
22	Peso total:				
23	Regularidad de la planta <ul style="list-style-type: none"> • Forma: • Partes Salientes: 	27	Distribución de rigideces <ul style="list-style-type: none"> • En altura: • En planta: • Rigidez a la torsión: 		
24	Piso Tipo <ul style="list-style-type: none"> • Altura: • Longitud planta (Dirección longitudinal): • Ancho planta (Dirección transversal): • Espesor de losa: • Área de planta: • Área de huecos de la planta: • Peso: • Espesor de muros: • Densidad de muros <ul style="list-style-type: none"> ○ Longitudinal: ○ Transversal: • Altura de viga típica: • Columnas <ul style="list-style-type: none"> ○ Dimensiones: ○ Separación: 	28	Cantidad de líneas resistentes Piso Tipo <ul style="list-style-type: none"> • N° de líneas resistentes dirección longitudinal: • N° de líneas resistentes dirección transversal: • Número de muros dirección longitudinal: • Longitud de muros dirección longitudinal: • Número de muros fachada dirección longitudinal: • Longitud de muros fachada dirección longitudinal: • Número de muros dirección transversal: • Longitud de muros dirección transversal: • Número de muros fachada dirección transversal: • Longitud de muros fachada dirección transversal: 	31	Período fundamental <ul style="list-style-type: none"> • Período longitudinal: • Período transversal: • Período torsional:
				32	Desplazamiento en el último piso debido a cargas de diseño <ul style="list-style-type: none"> • Longitudinal: • Transversal: • Giro producido <ul style="list-style-type: none"> ○ Longitudinal: ○ Transversal:
				33	Parámetro H/T <ul style="list-style-type: none"> • Longitudinal: • Transversal:
				34	Confinamiento especial en muros:
				35	Cuantía mínima de armaduras en muros:
				36	Tipo de fundaciones:
				37	Presiones admisibles en el suelo <ul style="list-style-type: none"> • Normal: • Eventual:

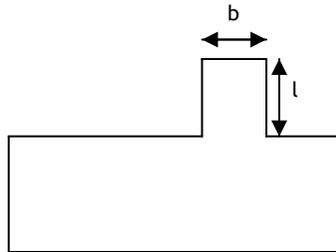
Tabla 4, Datos de la ficha tipo.

En el Anexo 2 se encuentra la información de las fichas para cada uno de los edificios de la muestra final.

A continuación se explican algunos de los diferentes ítems que contiene la ficha tipo:

- **Nombre:** Nombre particular del edificio.
- **Arquitecto:** Nombre de la oficina de arquitectura o arquitecto encargado del diseño del edificio.
- **Cálculo estructural:** Nombre de la oficina responsable del cálculo y diseño estructural del edificio.
- **Ubicación:** Dirección exacta del edificio de manera de identificarlo rápidamente.
- **Sector urbanización comunal:** Sector en el cual está circunscrito el edificio dentro del plano regulador de la comuna.
- **Año de entrega:** Año aproximado de realización del edificio.
- **Uso:** Se califica el uso como habitacional, comercial, oficinas u hotel.
- **Número de pisos:** Pisos del edificio sin considerar sala de máquinas ni subterráneos.
- **Número de subterráneos:** Total de pisos subterráneos.
- **Tipología estructural:** Se califica como muro de rigidez, muros con marcos de fachada o marcos con muros en caja de escalera y/o ascensor.
- **Normas utilizadas en su diseño:** Se mencionan las normas utilizadas para el diseño del edificio y las normas de diseño sísmico.
- **Sobrecarga considerada:** Se mencionan las sobrecargas consideradas para las diferentes áreas del edificio, sin considerar aquellas sobrecargas para pequeñas áreas especiales como por ejemplo el sector de mudanza.
- **Sobrecarga diseño sísmico:** Porcentaje de la sobrecarga considerada que como mínimo según norma NCh 433 es igual al 25%.
- **Zona sísmica:** Se utiliza la zonificación sísmica dada por la norma “Diseño sísmico de edificios”, NCh 433 Of. 96.
- **Tipo de suelo:** Se utiliza el tipo de suelo dado por la norma “Diseño sísmico de edificios”, NCh 433 Of. 96. y/o el tipo de suelo obtenido del estudio de mecánica de suelo.
- **Materiales:** Se menciona los materiales usados para la construcción de la obra gruesa. No se consideran los materiales usados para elementos no estructurales como por ejemplo los tabiques.
- **Módulo de elasticidad del hormigón:** Valor del módulo de elasticidad dinámico del hormigón dado según norma NCh 430, ACI 318 o una combinación de ambas, que utiliza cada oficina de cálculo.
- **Número de cuerpos que forman la planta:** Número de cuerpos que están separados por una junta de dilatación. Dicha junta debe estar presente a lo alto de todo el edificio.
- **Separación entre cuerpos:** Ancho de la junta de dilatación.
- **Altura sobre el nivel del suelo:** Altura medida a partir del suelo del primer piso hasta el techo del edificio, sin considerar la altura de la sala de máquinas.
- **Altura total:** Altura medida desde el suelo del último subterráneo hasta el techo del edificio, sin considerar la altura de la sala de máquinas.
- **Peso total:** Es el peso de diseño del edificio que como mínimo según norma Nch 433 es igual a peso propio más el 25% de sobrecarga.

- **Regularidad de la planta:** Se analiza la regularidad de la planta según el método de Hirosawa (1992).
 - **Forma:** Rectangular, H, T, U, L, V u otra.
 - **Partes Salientes:** Regular (Planta aproximadamente simétrica en cada dirección y el área de salientes menor o igual al 10% del área de planta), Mediano (Planta no es regular, dentro de esta categoría se encuentran las plantas tipo L, T, U y otras, y el área de salientes es menor o igual al 30%), Irregular (Planta es más irregular que el caso anterior y el área de salientes es mayor al 30% del área de planta). Estas salientes se consideran en el caso que $l/b \geq 0,5$.



- **Peso del piso:** Es el peso propio del piso más el 25% de la sobrecarga.
- **Distribución de rigideces:** La regularidad en altura se entiende por la ausencia de acortamientos importantes de la planta a lo alto del edificio. La regularidad en planta se refiere a si ésta posee algún grado de simetría y la regularidad de la rigidez a la torsión, tiene que ver con una distribución uniforme de los muros de fachada.
- **Confinamiento especial en muros:** Es la presencia (o no) de estribos adicionales en las cabezas de muro amarrando las barras principales de la armadura a flexión.
- **Presiones admisibles en el suelo:** Tensiones de contacto usadas para el diseño de fundaciones.

La utilización de la ficha tipo para la caracterización de los edificios de la muestra, permitió representar en un formato común y de manera ordenada, el diverso conjunto de información obtenida de cada edificio en relación a sus planos de estructura, memorias de cálculo y análisis sísmicos.

Para el llenado de estas fichas y de acuerdo a la limitación de tiempo para la realización de este estudio, se intentó abarcar la mayor cantidad de edificios, logrando revisar material correspondiente a las siguientes oficinas de cálculo:

- Gonzalo Santolaya y Cia. Ltda.
- B y B Ingeniería Estructural Ltda.
- R. Gatica - J. Jiménez Ingenieros Cia. Ltda.
- Alfonso Larraín Vial
- Demetrio Concha Larraín
- Spoerer & Asociados Ingeniería Ltda.
- René Lagos y Asociados
- Sociedad Menéndez Yoma Ingeniería Ltda.
- Cavalla, Raby, López Ingeniería Estructural Ltda.

Como resultado de esto se completaron las fichas de 76 edificaciones, algunas de las cuales forman en conjunto un edificio (por ejemplo edificios de dos o más cuerpos). Por lo tanto la muestra final utilizada en este trabajo se compone de 76 edificaciones.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DE EDIFICIOS

Los análisis de la evolución de las características estructurales de los edificios de hormigón armado construidos en los últimos años, se realizan considerando dos parámetros principalmente: el parámetro H/T y la densidad de muros.

4.1. PARÁMETRO H/T

De acuerdo con el valor del parámetro H/T, los edificios de hormigón armado se califican desde *demasiado rígidos* hasta *demasiado flexibles*. Según Guendelman et al. (1997), esta calificación es la siguiente:

$H/T < 20$	Demasiado flexible
$20 < H/T < 40$	Flexible
$40 < H/T < 70$	Normal
$70 < H/T < 150$	Rígidos
$150 < H/T$	Demasiado rígidos

Donde H: Altura total del edificio¹ [m]
T: Período del primer modo traslacional [seg]

¹ Altura total medida incluyendo los subterráneos.

Valores inferiores a 20 [m/s] indican que la estructura es muy flexible, por lo que, probablemente presentará problemas para cumplir con las disposiciones de desplazamiento que fijan las normas de análisis y diseño sísmico. Además, en este tipo de edificio se producirán daños en los elementos no estructurales cuando su comportamiento esté controlado por los desplazamientos relativos de entrepiso de no mediar un detalle que evite la interacción con la estructura. Por otro lado, valores mayores que 150 [m/s] representan una rigidez lateral excesiva, lo que podría implicar mayores aceleraciones de piso en caso de un sismo, produciendo mayores solicitaciones en elementos no estructurales rígidos como son algunos equipos y contenidos.

Dado que sólo en los últimos años se han construido edificios con más de un subterráneo y para que la comparación con los datos históricos (que son edificios de a lo más un subterráneo) sea más representativa, se decide calcular el parámetro H/T con la altura del edificio medida desde el nivel del suelo y no con la altura total que es la forma propuesta por Guendelman.

En el gráfico 2, se muestran los valores del parámetro H/T para cada uno de los edificios de la muestra final. En el gráfico 3, se muestra la forma en que se distribuyen los edificios de la muestra según los valores de H/T propuestos por Guendelman et al. (1997) para clasificar y calificar los edificios de hormigón armado desde este punto de vista.

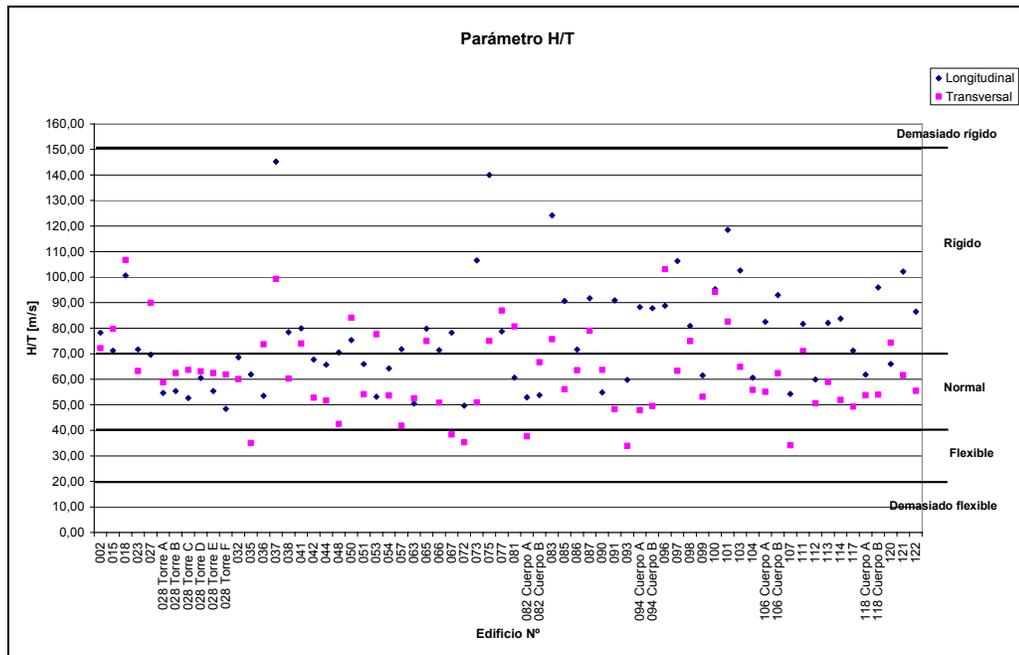


Gráfico 2, Valores de H/T para los edificios de la muestra final.

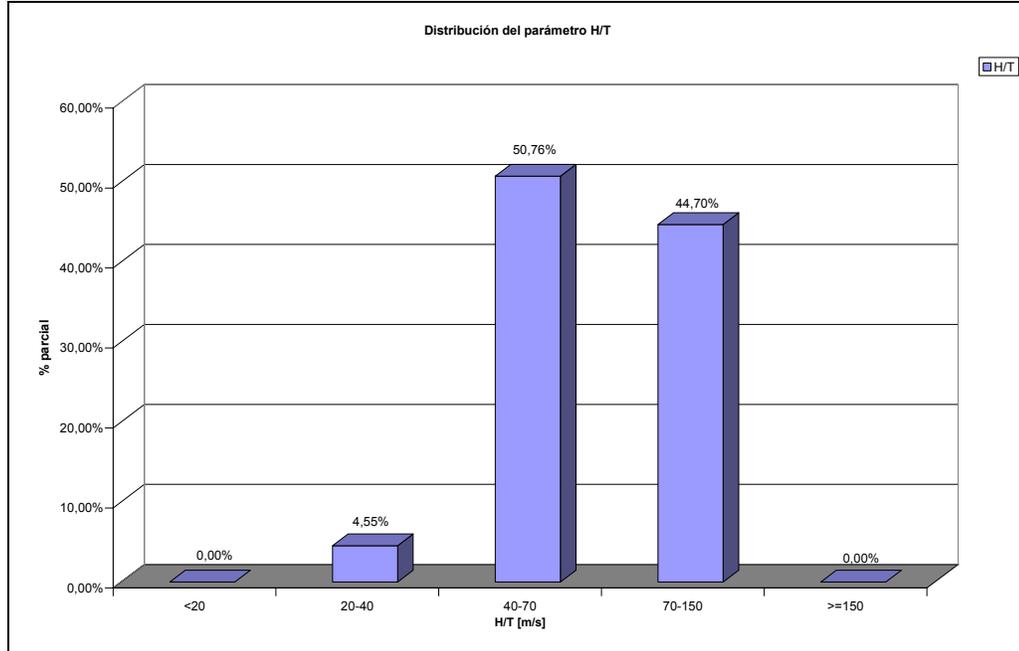


Gráfico 3, Distribución porcentual de los edificios de la muestra final de acuerdo con los valores recomendados por Guendelman et al. (1997) para clasificar los edificios según el parámetro H/T.

Del gráfico 3 se puede observar que la mayoría de los edificios (50,76%) tiene un valor de H/T entre 40 y 70 [m/s] y el 44,70% tiene un valor entre 70 y 150 [m/s], con lo cual, el 95,46% de los edificios de la muestra clasifican en los rangos correspondientes a estructuras normales y rígidas de acuerdo a la escala establecida por Guendelman. Cabe destacar que para los rangos extremos de la escala propuesta por Guendelman, ninguno clasifica como demasiado rígido ni demasiado flexible. Además, para la dirección longitudinal, los valores de H/T son mayores en promedio que para la dirección transversal, observándose valores de 76,63 [m/s] y 62,69 [m/s] respectivamente.

Para realizar una comparación con los datos históricos, obtenidos desde la base de datos existente de edificios construidos entre los años 1939 al 2000 en distintas comunas de Santiago, se entregan los gráficos 4 y 5.

De los gráficos 3, 4 y 5 se puede destacar que durante los años 2001-2006 se observa una tendencia a construir edificios en que la relación H/T se ubica entre 40 y 70 [m/s]. Además, se observa una leve disminución en la construcción de edificios con valores de la relación H/T mayor que 70 [m/s], mientras que hubo un leve aumento en los edificios con una relación H/T entre 20 y 40 [m/s].

La falta de edificios con rigidez a menor que 20 [m/s], es una tendencia que se mantiene en el tiempo. Según Guendelman et al. (1997), la clasificación deseable corresponde a estructuras que califiquen como normales y rígidas, lo cual se cumple para los edificios de la muestra y para los edificios de la base de datos histórica.

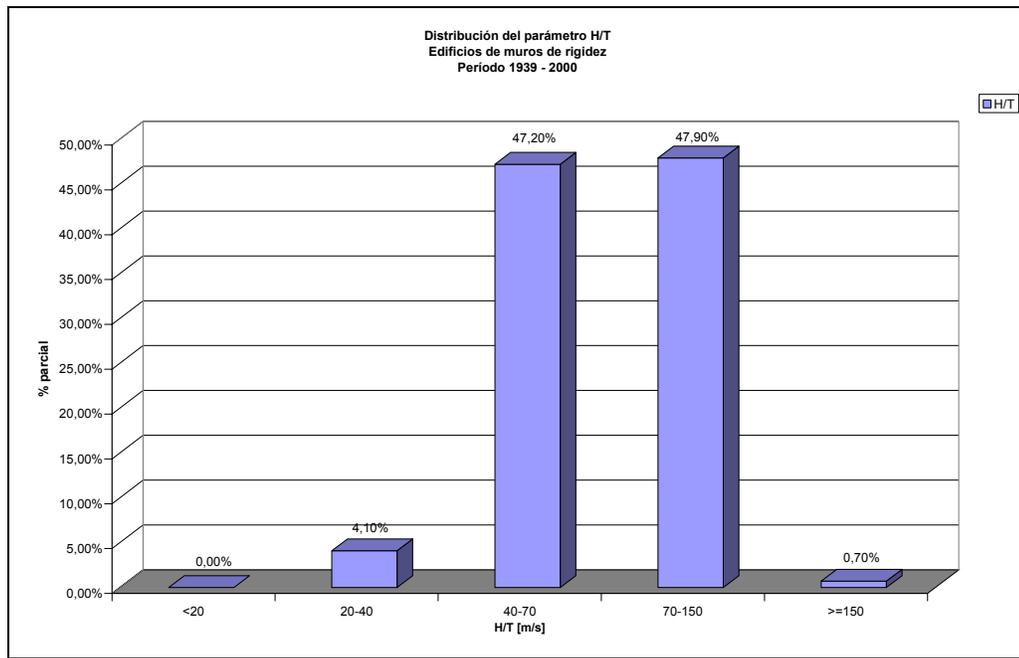


Gráfico 4, Distribución porcentual de los edificios construidos entre los años 1939-2000 según los rangos de valores de H/T propuestos por Guendelman et al. (1997).

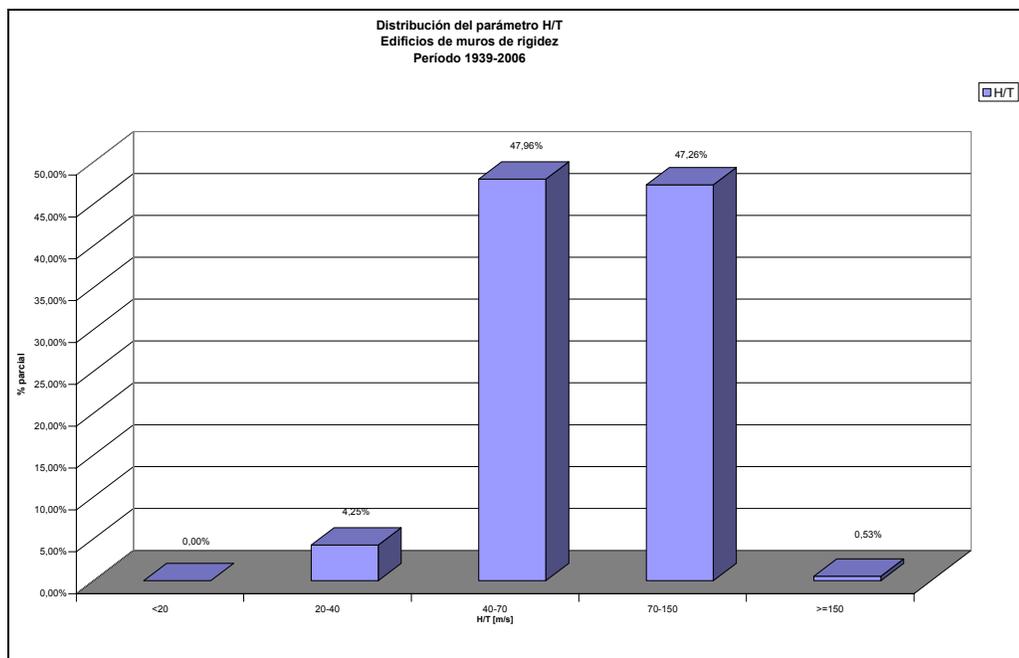


Gráfico 5, Distribución porcentual de los edificios construidos entre los años 1939-2006 según los rangos de valores de H/T propuestos por Guendelman et al. (1997).

Cabe destacar que los datos obtenidos de la base de datos existente, no sólo presentan información de edificios de la comuna de Ñuñoa sino que también de otras comunas.

El gráfico 6, presenta el número de casos por año para los distintos rangos de valores de la relación H/T considerando los edificios de hormigón armado construidos entre 1939 y el 2006.

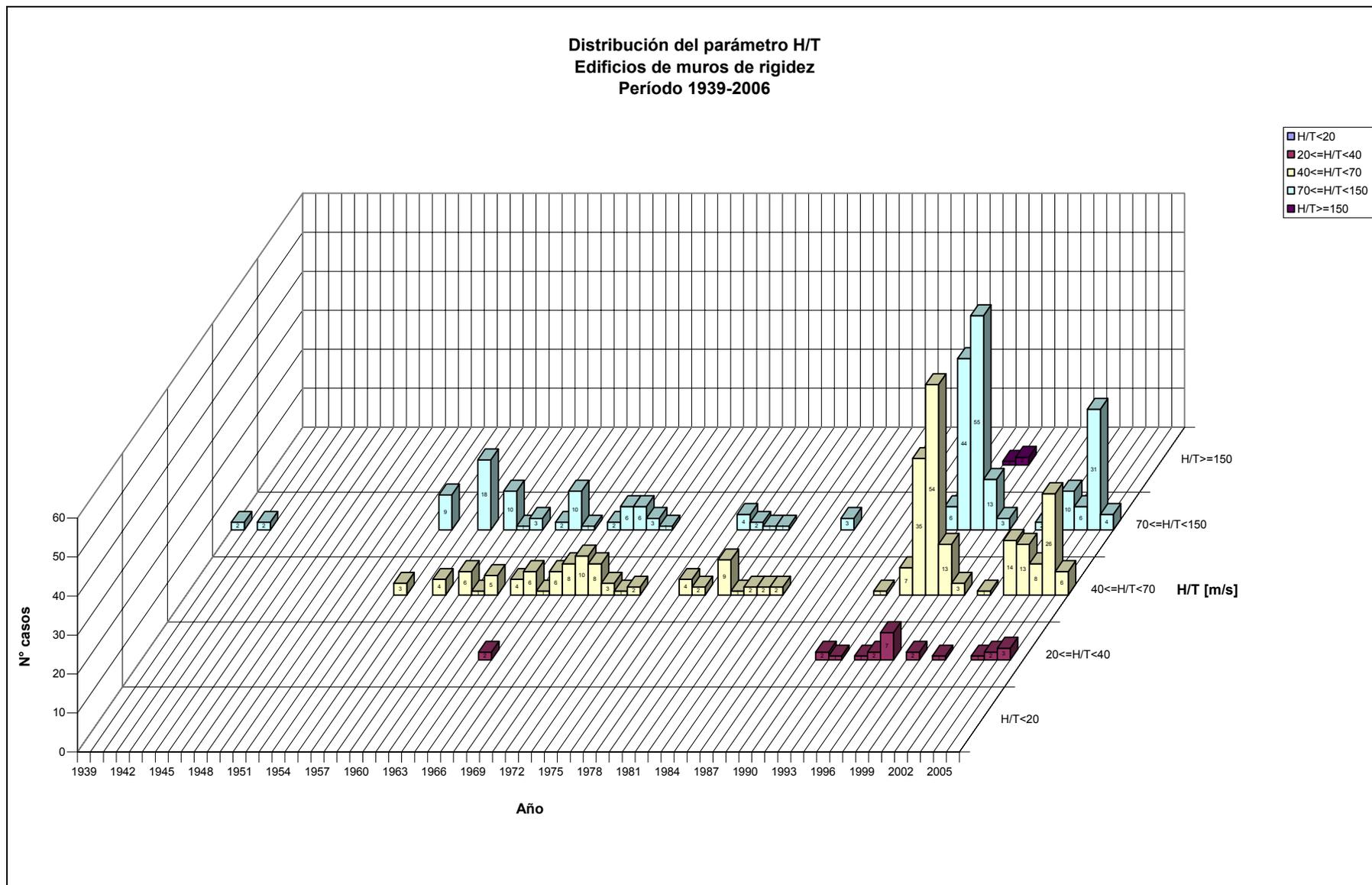


Gráfico 6, Distribución detallada por año del número de casos según los valores del parámetro H/T para edificios construidos entre los años 1939-2006.

Con el propósito de visualizar una tendencia de la forma en que ha evolucionado el parámetro H/T con el tiempo, en el gráfico 7 se muestra la línea de tendencia que resulta al establecer una regresión lineal con los datos y en el gráfico 8 se muestra la tendencia al establecer la regresión lineal con las medianas de H/T para cada año. Se aprecia que existe una tendencia moderada a disminuir el valor de la relación H/T en la construcción de edificios de hormigón armado pero con una dispersión cada vez mayor desde 1990, lo que debe considerarse. Sin embargo, a pesar de esta dispersión no se alcanzan valores que correspondan a los rangos extremos.

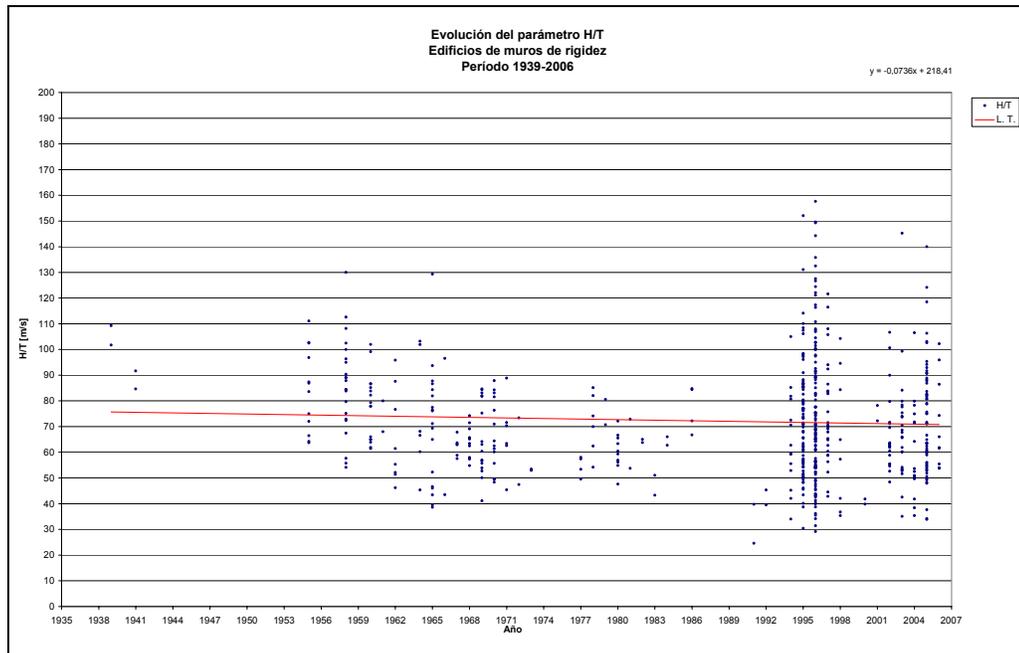


Gráfico 7, Tendencia de evolución del parámetro H/T entre los años 1939-2006.

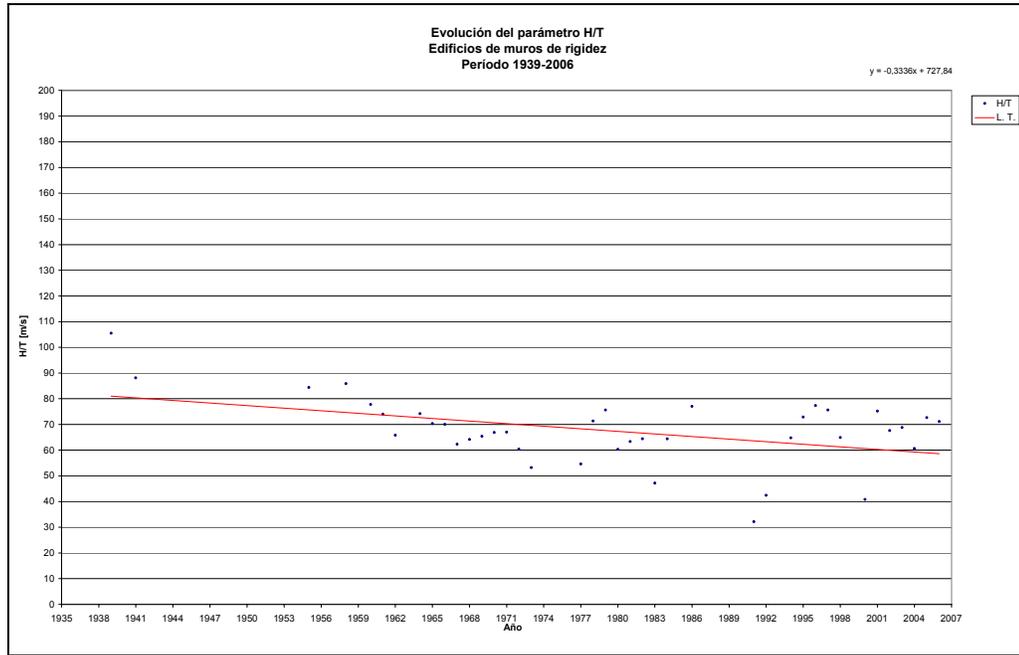


Gráfico 8, Tendencia de evolución de la mediana del parámetro H/T entre los años 1939-2006.

A modo de comparación con otros casos del país, a continuación se presentan los resultados de los valores de H/T para edificios de Concepción y Antofagasta según los estudios de Cáceres (2005) y Ríos, Music, Vladilo (2005).

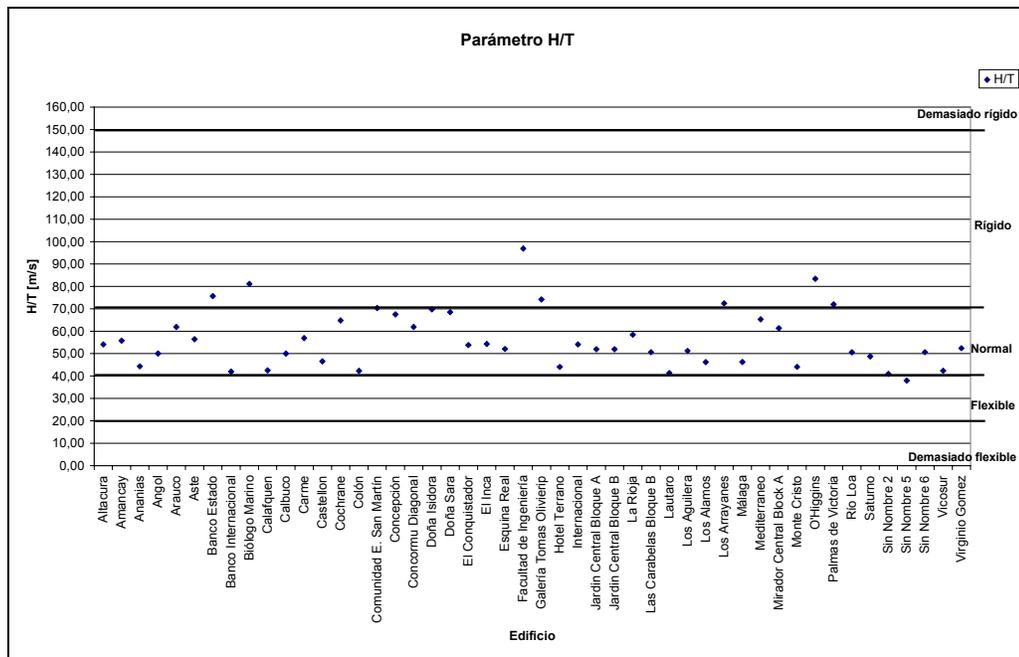


Gráfico 9, Valores de H/T para los edificios de Concepción.

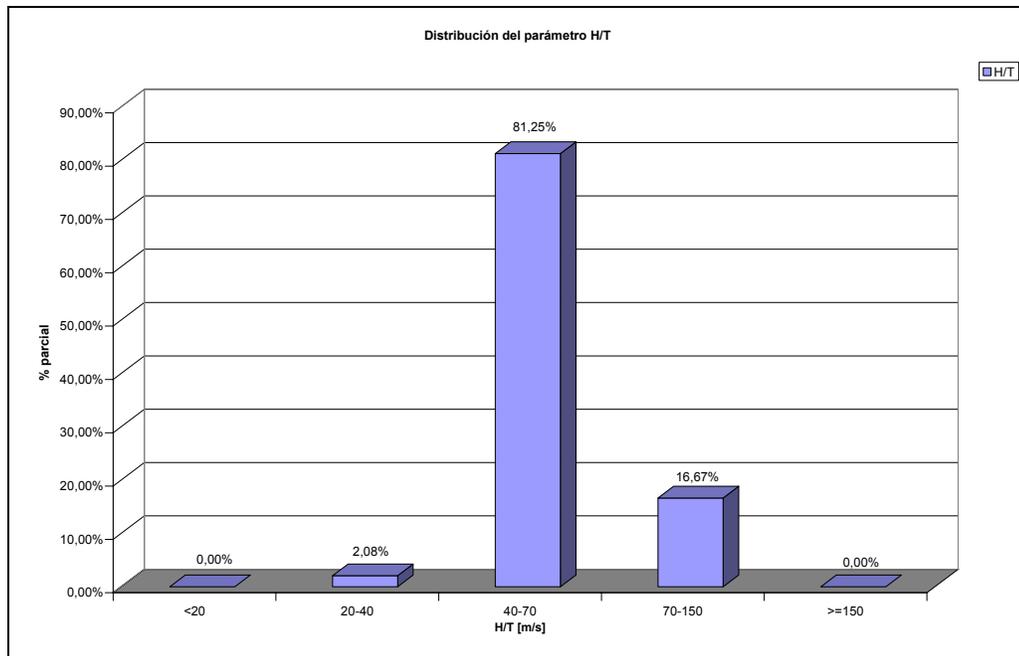


Gráfico 10, Distribución porcentual de los edificios de Concepción de acuerdo con los valores recomendados por Guendelman et al. (1997) para clasificar los edificios según el parámetro H/T.

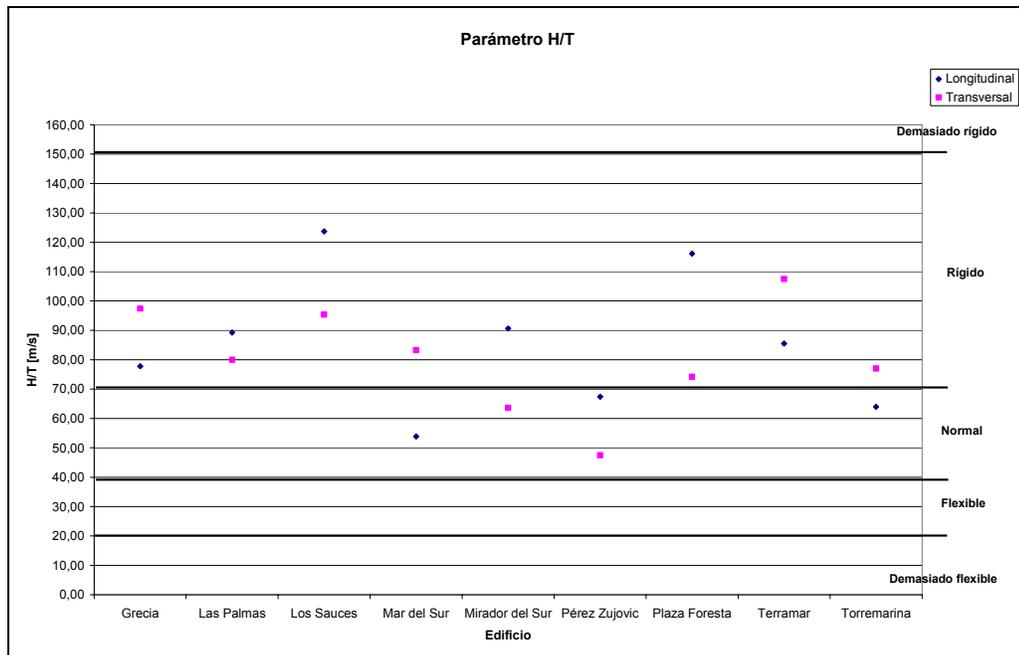


Gráfico 11, Valores de H/T para los edificios de Antofagasta.

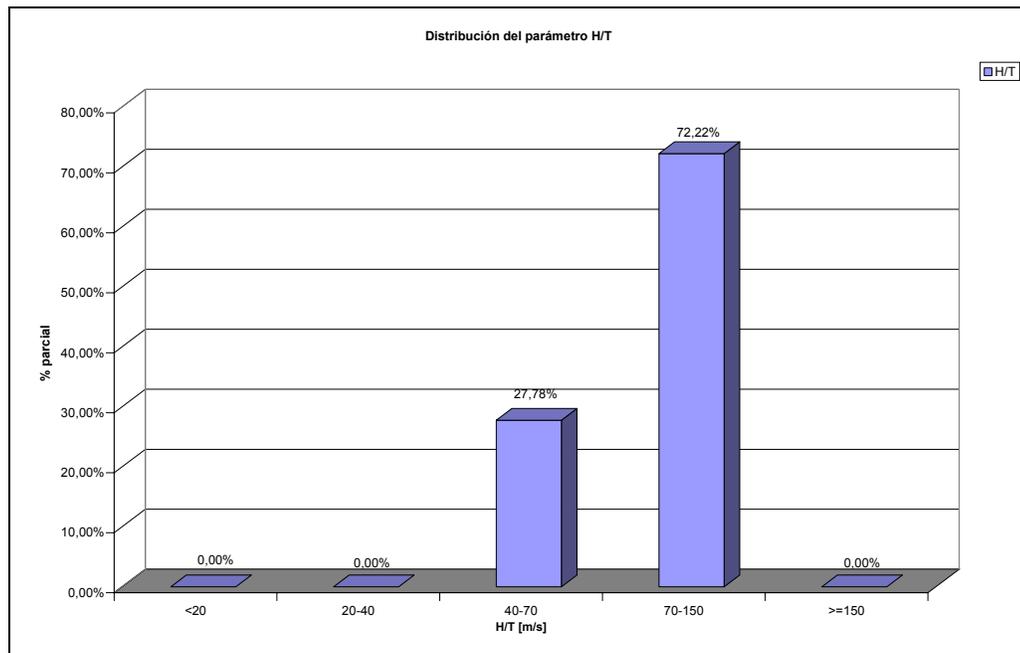


Gráfico 12, Distribución porcentual de los edificios de Antofagasta de acuerdo con los valores recomendados por Guendelman et al. (1997) para clasificar los edificios según el parámetro H/T.

Se puede observar que los resultados obtenidos de los estudios en Antofagasta y Concepción muestran diferencias significativas, tanto entre ellos como con los datos de Santiago. Para el caso de Concepción, se observa que la mayoría de los edificios (81,25%) presenta valores del parámetro H/T entre 40 y 70 [m/s], es decir, en el rango normal, mientras que en el mismo rango Antofagasta presenta un 27,78% y Santiago 47,96%. Para el rango rígido, es decir, entre 70 y 150 [m/s], Concepción presenta un 16,67%, Antofagasta un 72,22% y Santiago un 47,26%.

Dentro de estos rangos, considerados aceptables, se ven tres casos totalmente diferentes, Antofagasta y Concepción ubicándose en los extremos opuestos y Santiago se mantiene en la posición media.

4.2. DENSIDAD DE MUROS

La densidad de muros se define de la siguiente manera:

$$d = \frac{\text{Área de muros en una dirección [m}^2\text{]}}{\text{Área de planta del piso considerado del edificio [m}^2\text{]}}$$

En relación con este parámetro, se debe destacar que la *alta densidad de muros* ha sido una propiedad característica de los edificios chilenos y fue determinante en el comportamiento sísmico observado durante el terremoto del 3 de marzo de 1985, debido a que controló la rigidez para la altura de los edificios construidos hasta esa fecha. Según estudios de Wood (1991), los edificios chilenos tenían una densidad de muros con valores dentro del rango comprendido entre 0,015 y 0,035. Rango en el cual se observó que los edificios prácticamente no sufrieron daños estructurales durante este terremoto.

Como parte del análisis de las características de los edificios de la muestra seleccionada en el presente trabajo, se calculó su densidad de muros. Los siguientes gráficos muestran los valores y la distribución porcentual de esta densidad de muros para el piso tipo, el primer piso y el subterráneo, respectivamente.

En los gráficos 13 y 14 se entrega la información relacionada con el piso tipo. De esta figura se observa que la gran mayoría de los edificios de la muestra (84,21%), tienen una densidad de muros en el piso tipo dentro del rango 0,02 y 0,035, con un promedio de 0,028. Además, ningún edificio de la muestra presentó una densidad de muros para el piso tipo menor que el límite inferior del rango destacado, a diferencia del límite superior donde sí se observa que un 11,84% de la muestra final lo supera.

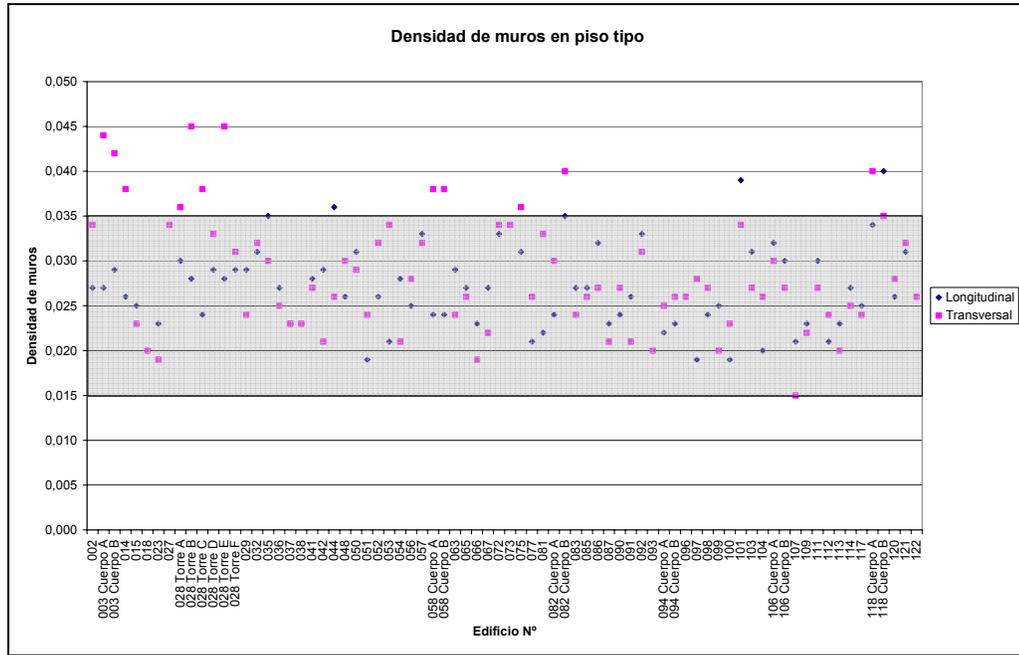


Gráfico 13, Densidad de muros del piso tipo de los edificios de la muestra final.

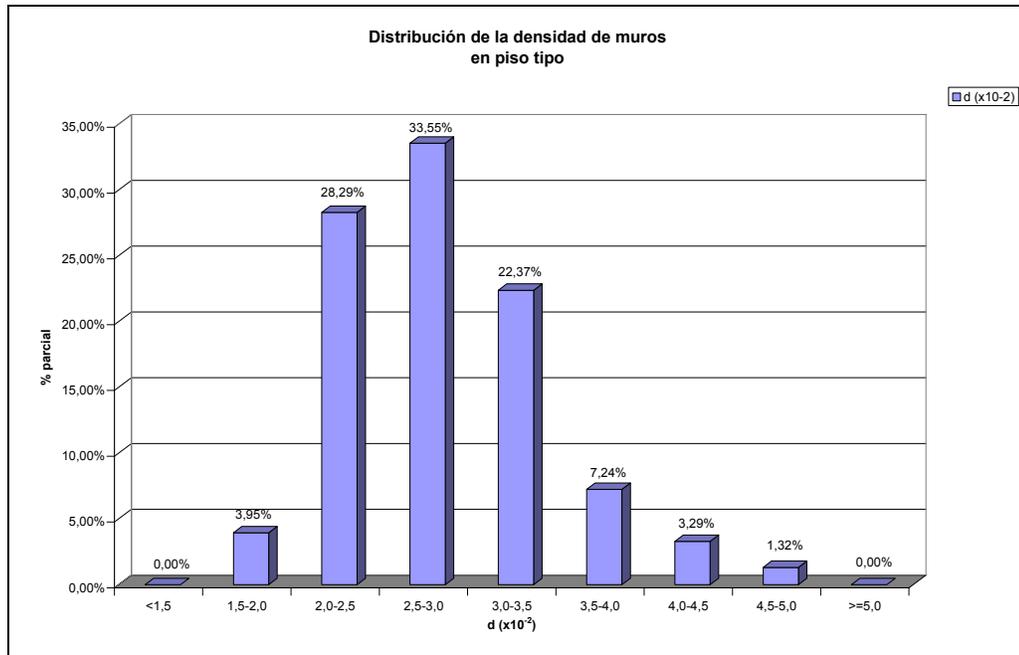


Gráfico 14, Distribución porcentual de la densidad de muros en el piso tipo de los edificios de la muestra final.

Para el caso del primer piso, los resultados se presentan en los gráficos 15 y 16. Nuevamente se puede observar que la gran mayoría (83,56%) de los edificios de la muestra final tienen una densidad de muros en el primer piso dentro del rango 0,015 y 0,035, con un promedio de 0,027. Sólo un 1,32% de los edificios de la muestra final tiene una densidad de muros en el primer piso menores que el límite inferior del rango destacado, mientras que el límite superior lo supera un 15,13% de los edificios de la muestra final.

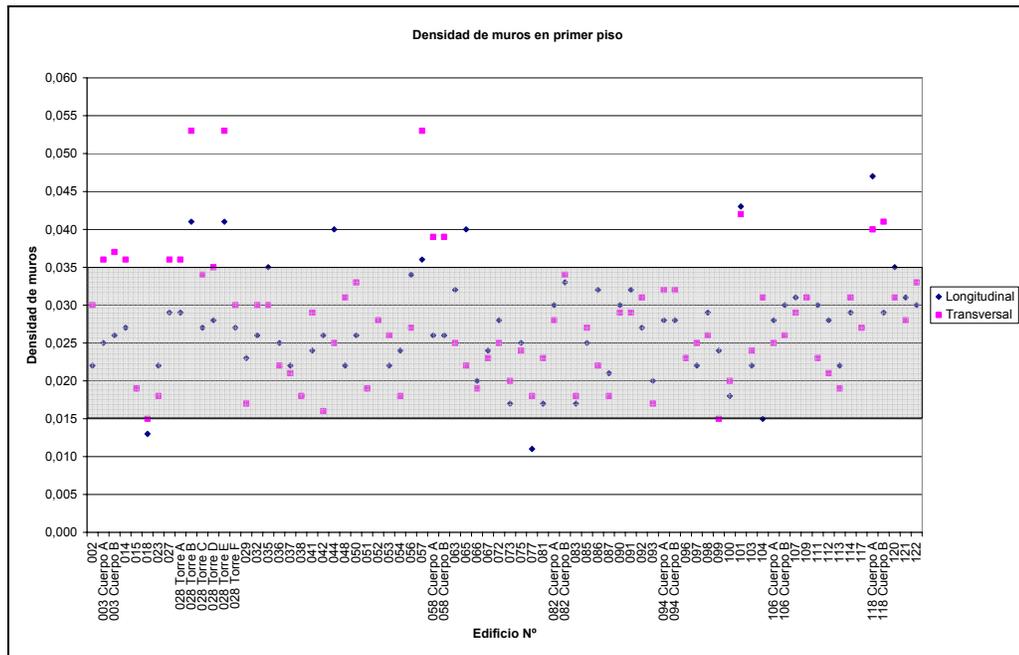


Gráfico 15, Densidad de muros del primer piso de los edificios de la muestra final.

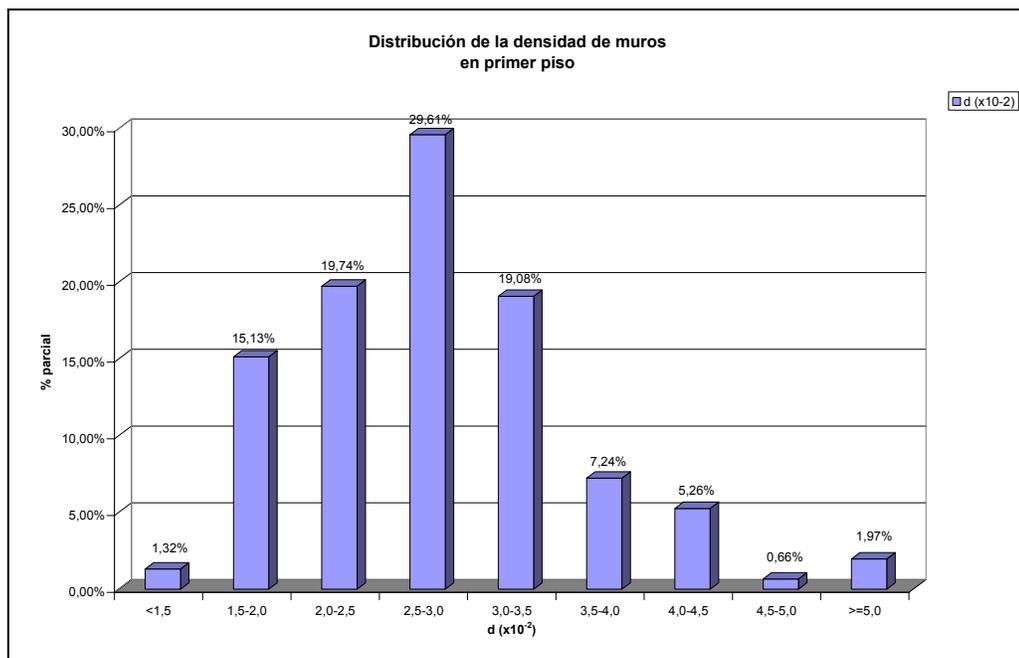


Gráfico 16, Distribución porcentual de la densidad de muros en el primer piso de los edificios de la muestra final.

El resultado anterior se explicaría considerando que los requerimientos actuales en los usos del primer piso, obligan a usar plantas cada vez más libres, lo que significa que muchos muros del piso tipo se acortan o simplemente desaparecen al llegar al primer piso. Dado esto, era lógico esperar que la densidad de muros en el primer piso fuera menor que la densidad del piso tipo. Sin embargo, es conveniente destacar que la disminución es más bien leve en los términos que se define, lo que se puede explicar por el uso de espesores de muro mayores en el primer piso. Esto se observa en la siguiente tabla que representa la relación entre los espesores mínimos de muros del primer piso, piso tipo y piso subterráneo.

EDIFICIO N°	AÑO	N° PISOS	N° SUBTERRÁNEOS	PISO TIPO		PRIMER PISO	PISO SUBTERRÁNEO	
				En Piso	e min [cm]	e min [cm]	En Piso	e min [cm]
002	2001	11	2	3 al 5	15	20	2	20
003 Cuerpo A	2001	12	1	3 al 7	18	18	1	20
003 Cuerpo B	2001	12	1	3 al 7	18	18	1	20
014	2002	11	1	3 al 10	15	15	1	15
015	2002	5	1	3	15	15	1	15
018	2002	6	0	3 al 5	15	15		
023	2002	5	1	3 y 4	15	15	1	15
027	2002	15	1	3 al 14	15	15	1	15
028 Torre A	2002	16	2	2 al 14	20	20	2	20
028 Torre B	2002	19	2	7 al 16	20	20	2	20
028 Torre C	2002	15	2	2 al 13	20	20	2	20
028 Torre D	2002	15	2	2 al 13	20	20	2	20
028 Torre E	2002	19	2	7 al 16	20	20	2	20
028 Torre F	2002	16	2	3 al 14	20	20	2	20
029	2002	12	2	3 al 11	15	15	1	20
032	2003	16	2	3 al 15	15	15	2	20
035	2003	17	3	3 al 12	15	15	3	20
036	2003	11	1	2 al 9	18	18	1	18
037	2003	7	1	2 y 3	15	15	1	15
038	2003	8	1	2 al 7	15	15	1	15
041	2003	12	2	2 al 9	15	20	1	20
042	2003	5	1	2 al 4	15	15	1	15
044	2003	12	2	3 al 10	20	20	2	20
048	2003	16	2	3 al 7	15	15	2	15
050	2003	12	3	2 al 10	15	15	2	15
051	2003	5	1	3 y 4	15	15	1	15
052	2003	10	1	3 al 9	15	15	1	15
053	2003	10	1	3 al 8	15	15	1	15
054	2004	5	1	2 al 4	10	10	1	15
056	2004	14	2	3 al 11	18	30	1	20
057	2004	20	2	7 al 19	15	15	2	15
058 Cuerpo A	2004	12	2	3 al 10	15	15	1	20
058 Cuerpo B	2004	12	2	3 al 10	15	15	1	20
063	2004	16	1	7 al 12	15	20	1	20

EDIFICIO N°	AÑO	N° PISOS	N° SUBTERRÁNEOS	PISO TIPO		PRIMER PISO	PISO SUBTERRÁNEO	
				En Piso	e min [cm]	e min [cm]	En Piso	e min [cm]
065	2004	15	2	3 al 14	15	15	2	30
066	2004	5	1	2 al 4	15	15	1	15
067	2004	12	1	3 al 9	15	15	1	15
072	2004	24	2	4 al 22	20	20	2	20
073	2004	9	2	3 al 6	20	20	2	20
075	2005	9	2	2 al 8	20	20	2	20
077	2005	5	1	2 al 4	15	15	1	15
081	2005	13	2	3 y 4	16	15	2	16
082 Cuerpo A	2005	8	2	3 al 7	20	20	2	20
082 Cuerpo B	2005	10	2	3 al 7	20	20	2	20
083	2005	7	1	2 al 5	15	15	1	15
085	2005	13	1	4 al 11	12	15	1	15
086	2005	13	2	2 al 4	20	20	1	20
087	2005	15	2	3 al 8	18	18	2	18
090	2005	14	2	3 al 13	15	15	2	17
091	2005	12	2	3 al 7	15	15	2	18
092	2005	26	3	8 al 15	20	15	3	15
093	2005	13	2	3 al 12	16	16	2	16
094 Cuerpo A	2005	13	2	3 al 11	15	15	2	15
094 Cuerpo B	2005	13	2	3 al 11	15	15	2	20
096	2005	5	1	3	15	15	1	15
097	2005	12	1	3 al 11	15	15	1	15
098	2005	15	1	6 al 14	18	20	1	20
099	2005	14	1	2 al 12	20	20	1	20
100	2005	5	1	2 al 4	15	15	1	15
101	2005	16	2	3 al 10	15	15	2	15
103	2005	11	1	3 al 6	16	16	1	16
104	2005	13	1	4 al 11	16	16	1	16
106 Cuerpo A	2005	11	2	6 al 10	15	20	2	20
106 Cuerpo B	2005	11	2	6 al 10	15	20	2	20
107	2005	21	3	3 al 19	15	15	3	15
109	2005	9	4	3 al 5	18	18	4	18
111	2005	12	2	2 al 11	20	20	2	20
112	2005	15	2	5 al 13	16	16	2	16
113	2005	8	1	2 al 7	15	15	1	15
114	2005	11	2	4 al 10	18	18	2	20
117	2005	16	1	3 al 6	15	15	1	15
118 Cuerpo A	2006	25	4	4 y 5	15	20	4	20
118 Cuerpo B	2006	15	4	4 y 5	20	20	4	20
120	2006	11	2	3 al 8	20	20	2	20
121	2006	16	3	3 al 7	20	20	3	20
122	2006	13	3	4 al 6	15	15	3	20

Tabla 5, Espesores mínimos para piso tipo, primer piso y piso subterráneo de los edificios de la muestra final.

Para el caso del piso subterráneo, los resultados se presentan en los gráficos 17 y 18. De estos gráficos se comprueba que la gran mayoría de los edificios de la muestra final (83,55%) presentan una densidad de muros en el piso subterráneo dentro del rango 0,015 y 0,035, con un promedio de 0,026. Sólo un 1,97% de los edificios de la muestra final tiene una densidad de muros para el piso subterráneo menor que el límite inferior del rango destacado, mientras que sólo un 13,16% de los edificios de la muestra final, supera para el límite superior del rango destacado. Para los edificios que cuentan con más de un piso bajo el nivel del suelo, se considera como piso subterráneo el último, es decir, el más bajo.

Nuevamente se esperaba que la densidad de muros fuera menor que la del piso tipo, puesto que en los subterráneos los muros interiores son escasos para permitir el paso de los automóviles, en el caso de que su destino sea para estacionamientos². Sin embargo, los resultados del análisis de esta densidad de muros, muestran que ella es sólo levemente menor a la del piso tipo. Este resultado se explica porque el gran aporte en la densidad de muros del piso subterráneo está dado por los muros perimetrales que son de gran longitud, muros que no continúan a lo alto del edificio.

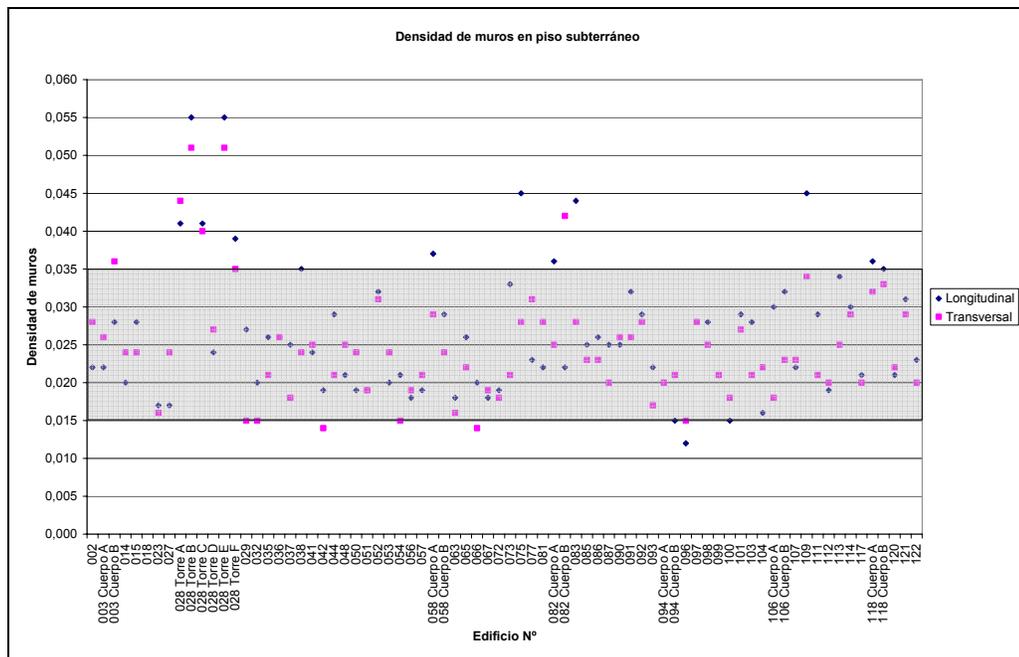


Gráfico 17, Densidad de muros del piso subterráneo de los edificios de la muestra final.

² La mayoría de los subterráneos son destinados a estacionamientos.

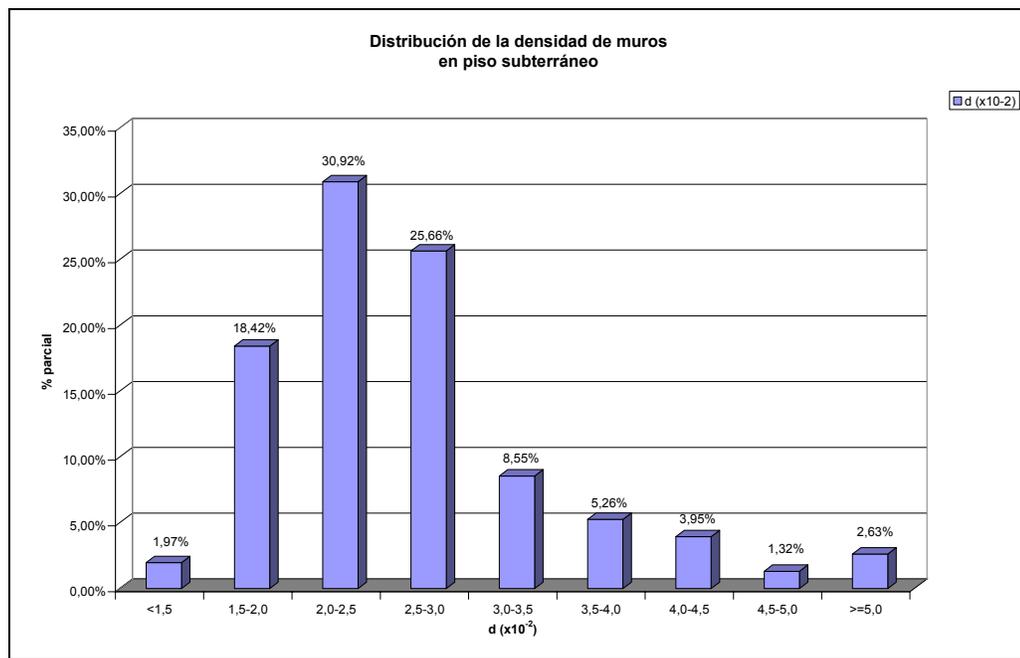


Gráfico 18, Distribución porcentual de la densidad de muros en el piso subterráneo de los edificios de la muestra final.

A continuación se presentan los resultados de la comparación de los valores de la densidad de muros de los edificios de la muestra con los datos históricos obtenidos desde la base de datos existente, la que cuenta con información de edificios de hormigón armado construidos entre los años 1939 al 2000.

Es necesario destacar que la evaluación de la densidad de muro para el primer piso y piso subterráneo no ha sido registrada en estudios anteriores, encontrándose en la base de datos histórica sólo valores para el piso tipo, por lo que la comparación se concentra en dicho piso. En los gráficos 19 y 20 se muestran los datos relacionados con esta densidad de muros para la base de datos históricos y para el conjunto de datos, base histórica más la muestra seleccionada en este estudio.

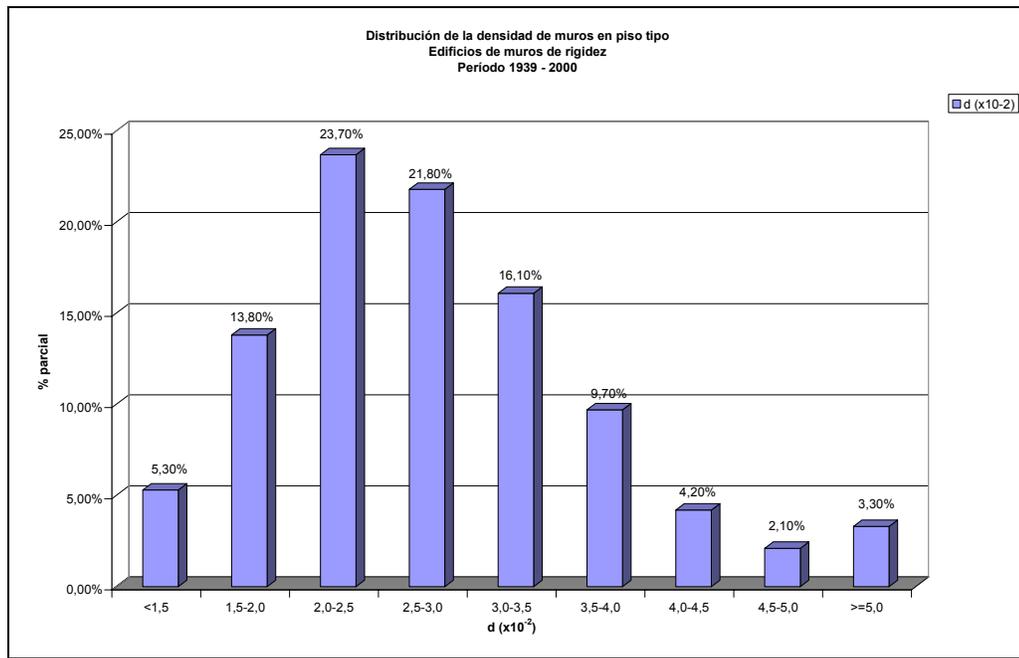


Gráfico 19, Distribución porcentual de la densidad de muros en el piso tipo de los edificios construidos entre los años 1939-2000.

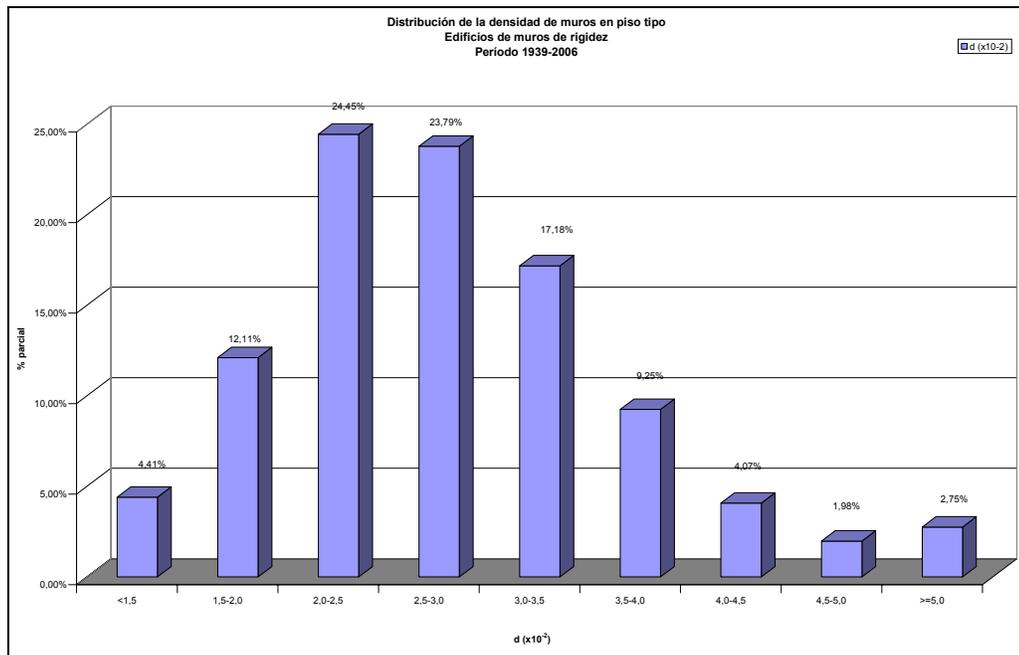


Gráfico 20, Distribución porcentual de la densidad de muros en el piso tipo de los edificios de hormigón armado construidos entre los años 1939-2006.

De los gráficos 19 y 20 se puede observar que, si bien se mantiene una distribución porcentual de la densidad de muros en el piso tipo muy similar, durante los años 2001-2006 existe una tendencia hacia los edificios con densidad de muros para el piso tipo entre 0,020 y 0,035, lo que hizo aumentar su porcentaje dentro de este rango en casi 4 puntos. Además se observa una disminución en la construcción de edificios con densidad de muros en piso tipo menores a 0,015 y mayores que 0,035. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede decir que la densidad de muros en los últimos años se ha concentrado en el rango comprendido entre 0,020 y 0,035.

El gráfico 21 muestra el número de edificios para distintos valores de la densidad de muro en el piso tipo considerando los edificios de la muestra completa de datos, edificios construidos entre los años 1939-2006.

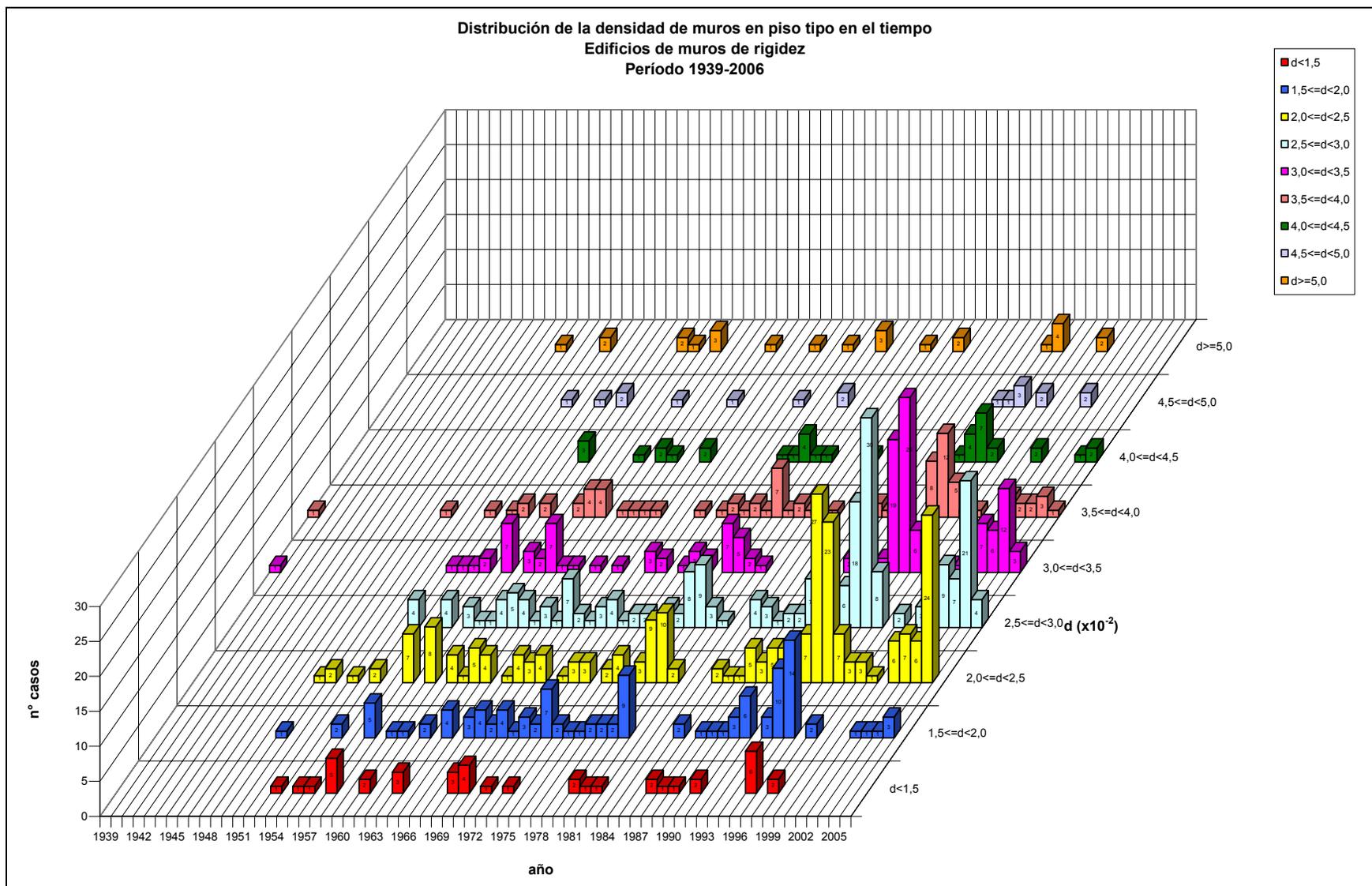


Gráfico 21, Distribución del número de casos según el valor de la densidad de muros en piso tipo para la muestra de edificios construidos entre los años 1939-2006.

Con el propósito de visualizar como ha evolucionado la densidad de muros en el piso tipo con el tiempo, se presentan los siguientes dos gráficos.

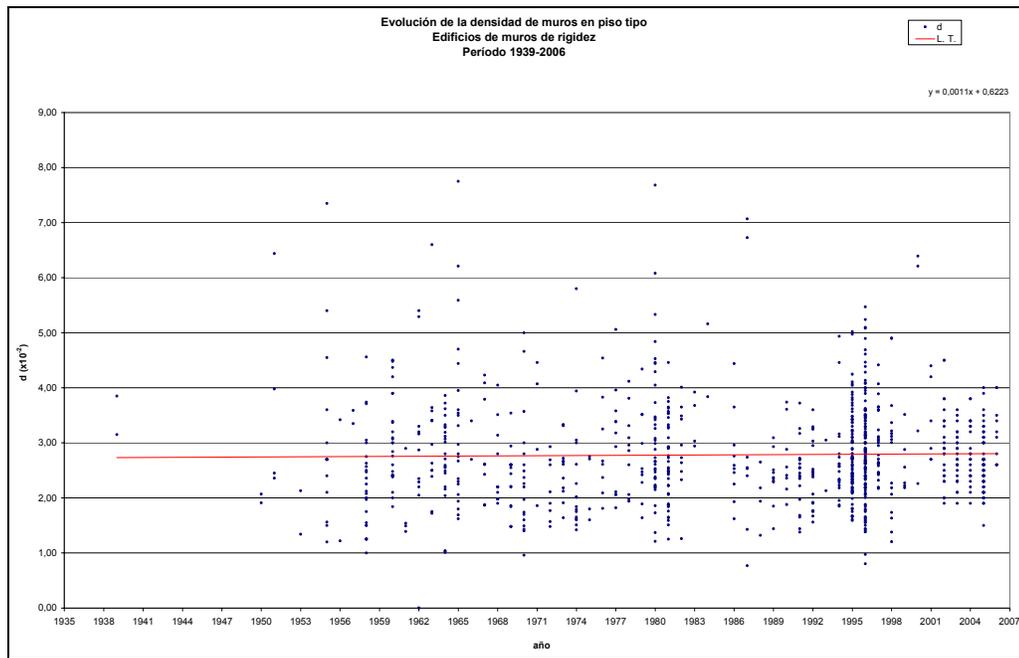


Gráfico 22, Valores de la densidad de muros en el piso tipo para los edificios de hormigón armado construidos entre los años 1939-2006.

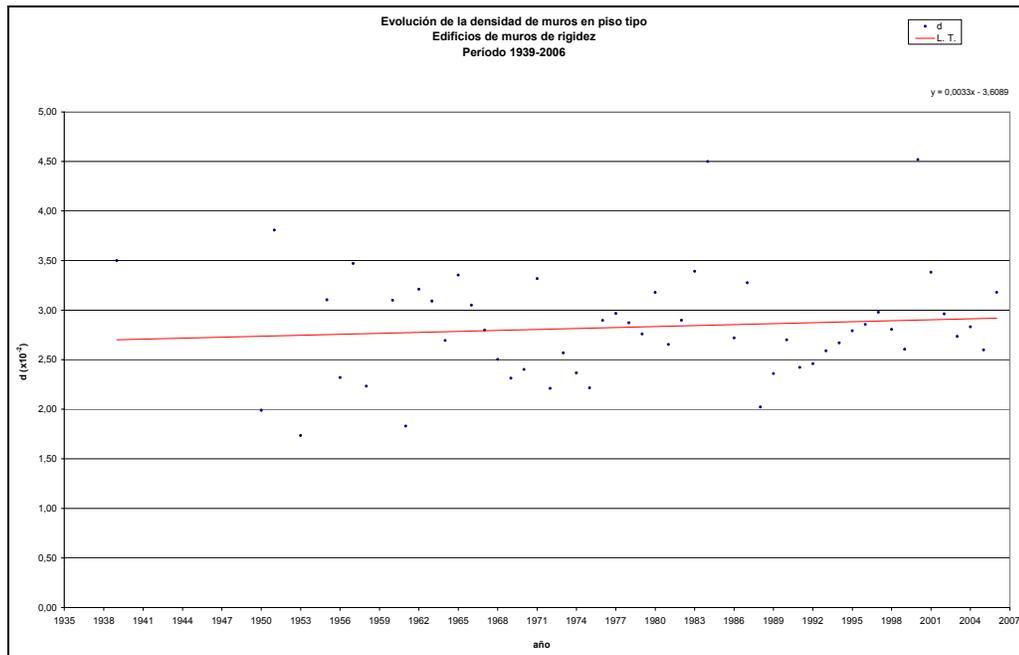


Gráfico 23, Valores de la mediana de la densidad de muros en el piso tipo para los edificios de hormigón armado construidos entre los años 1939-2006.

Se aprecia que existe una muy leve tendencia al aumento de la densidad de muros en piso tipo en la construcción de edificios de hormigón armado entre 1939 y 2006. De este modo se puede indicar que las condiciones actuales, en términos de las normativas y prácticas de diseño estructural usadas en nuestro medio, han permitido que la densidad de muros se mantenga o aumente levemente, presentando las mismas dispersiones que antes de 1985 a pesar que el número de pisos de los edificios de hormigón armado ha aumentado.

Es interesante notar que los resultados del análisis de la densidad de muros, indica que los edificios de la muestra final presentan densidades de muros dentro del rango estudiado por Wood, que caracteriza al edificio chileno. La comparación con la información histórica demuestra que, a pesar de que se observan pequeñas diferencias, la tendencia ha sido en mantener esta densidad pero ello no significa que el comportamiento observado sea el mismo ya que ha aumentado el número de pisos.

Los datos arrojaron valores promedios muy similares de las densidades de muro en sus direcciones longitudinal y transversal. Estos valores se aprecian en la siguiente tabla:

	Piso tipo		Primer piso		Piso subterráneo	
	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
Densidad de muros promedio	0,027	0,029	0,027	0,028	0,027	0,025

Tabla 6, Densidad de muro promedio por dirección.

A modo de comparación con otros casos del país, a continuación se presentan los resultados de los valores de densidad de muro para el piso tipo para edificios de Concepción y Antofagasta según los estudios de Cáceres (2005) y Ríos, Music, Vladilo (2005).

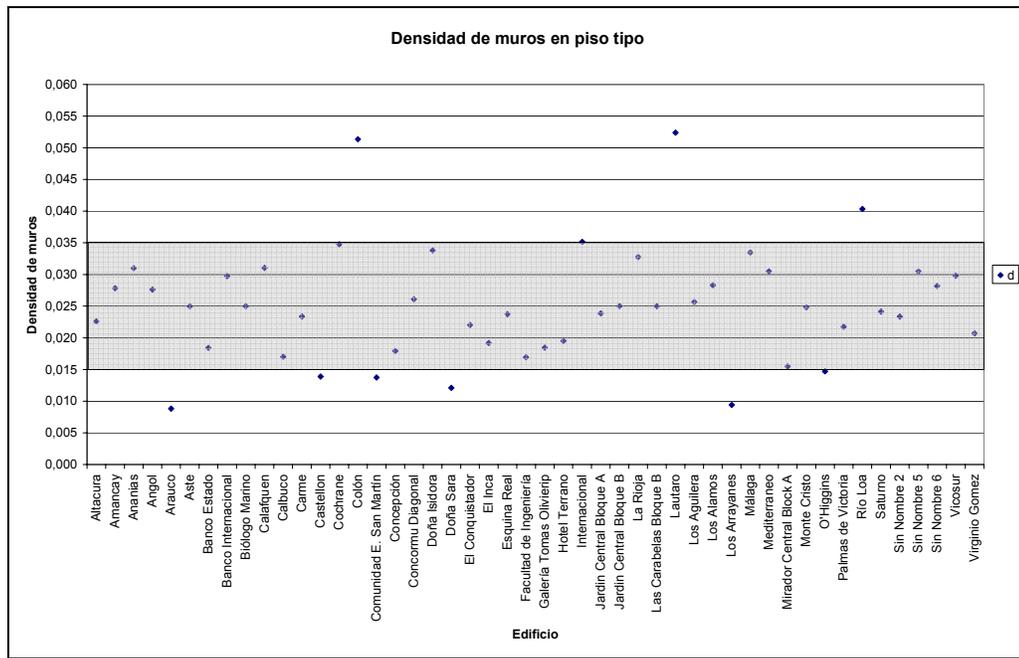


Gráfico 24, Densidad de muros del piso tipo de los edificios de Concepción.

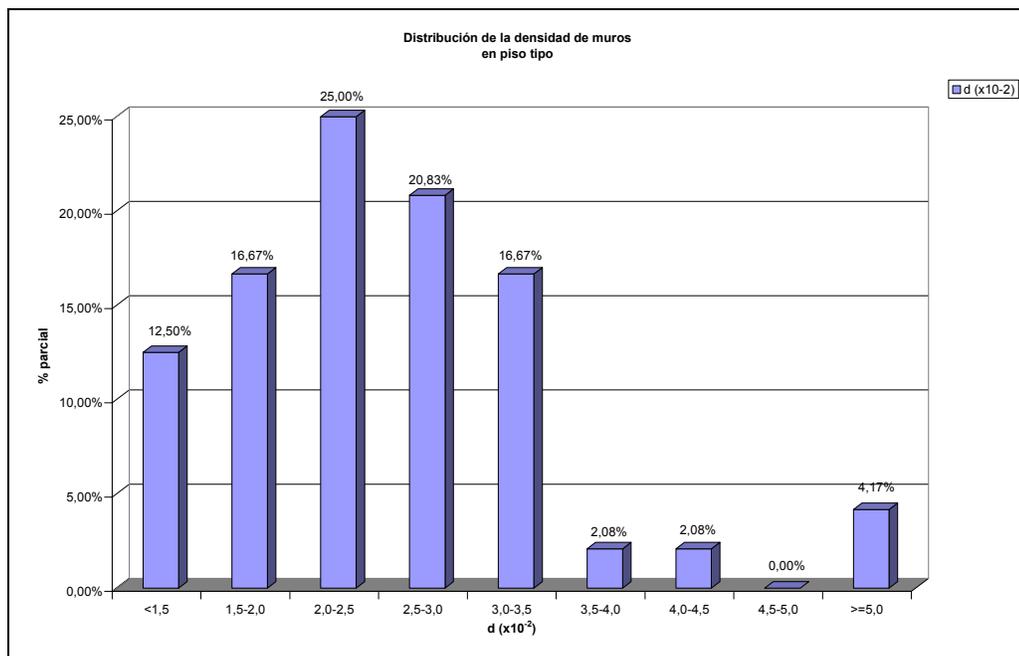


Gráfico 25, Distribución porcentual de la densidad de muros en el piso tipo de los edificios de Concepción.

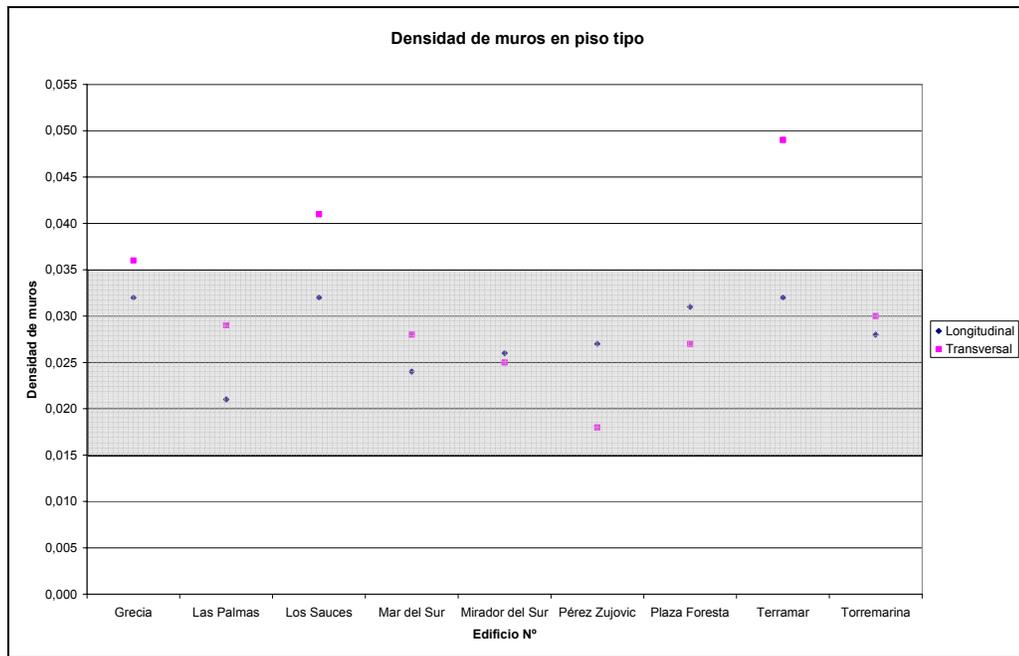


Gráfico 26, Densidad de muros del piso tipo de los edificios de Antofagasta.

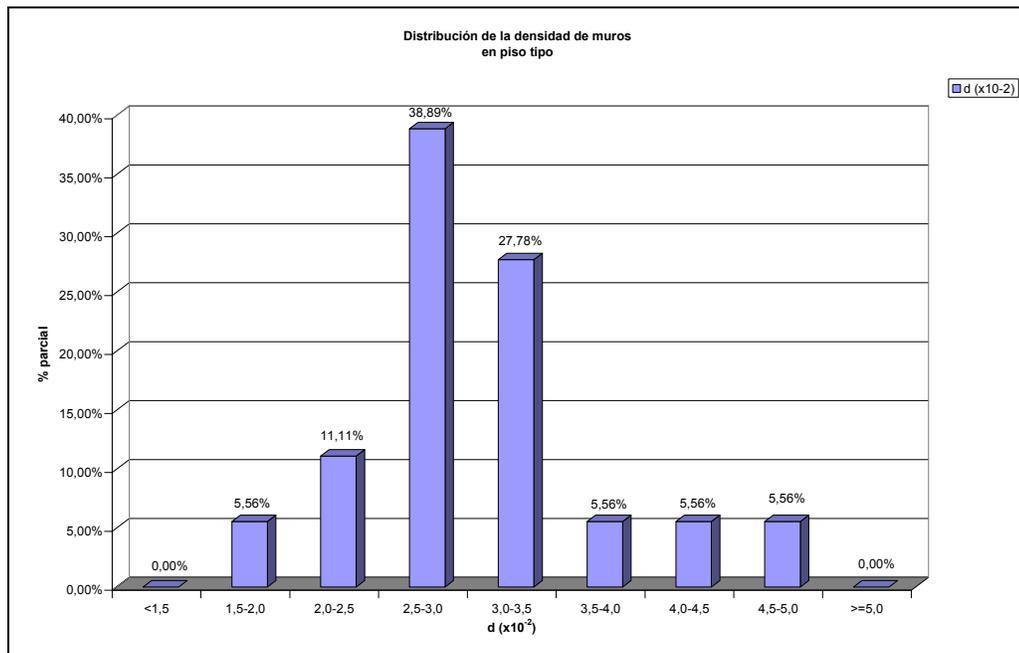


Gráfico 27, Distribución porcentual de la densidad de muros en el piso tipo de los edificios de Antofagasta.

Se puede observar que los resultados obtenidos de los estudios en Antofagasta y Concepción muestran diferencias, tanto entre ellos como con los datos de Santiago. Para el caso de Concepción, se observa que la distribución se concentra en los 5 primeros rangos, es decir, hasta 0,035. En el caso de Antofagasta, el 77,78% de los edificios presenta valores de densidad de muros en piso tipo en los rangos de 0,02 y 0,035. En el caso de Santiago, el 84,21% se concentra en el rango de 0,02 y 0,035.

4.3. DENSIDAD DE MUROS POR UNIDAD DE PISO Y UNIDAD DE PESO

La densidad de muro por unidad de piso y unidad de peso, en adelante d_{np} , se estudia para ver la influencia del *tamaño del edificio* en la cantidad de muros que el edificio presenta. Para este efecto, la densidad de muros por unidad de piso y unidad de peso se calcula como:

$$d_{np} = \frac{\text{Área de muros en una dirección [m}^2\text{]}}{\text{N}^\circ \text{ de pisos sobre el nivel considerado} \times \text{Peso del piso [ton]}}$$

Con los datos obtenidos de las fichas tipo, se calculó el d_{np} para cada edificio de la muestra final. Los resultados obtenidos se muestran en los gráficos 28 y 29 para el caso del piso tipo.

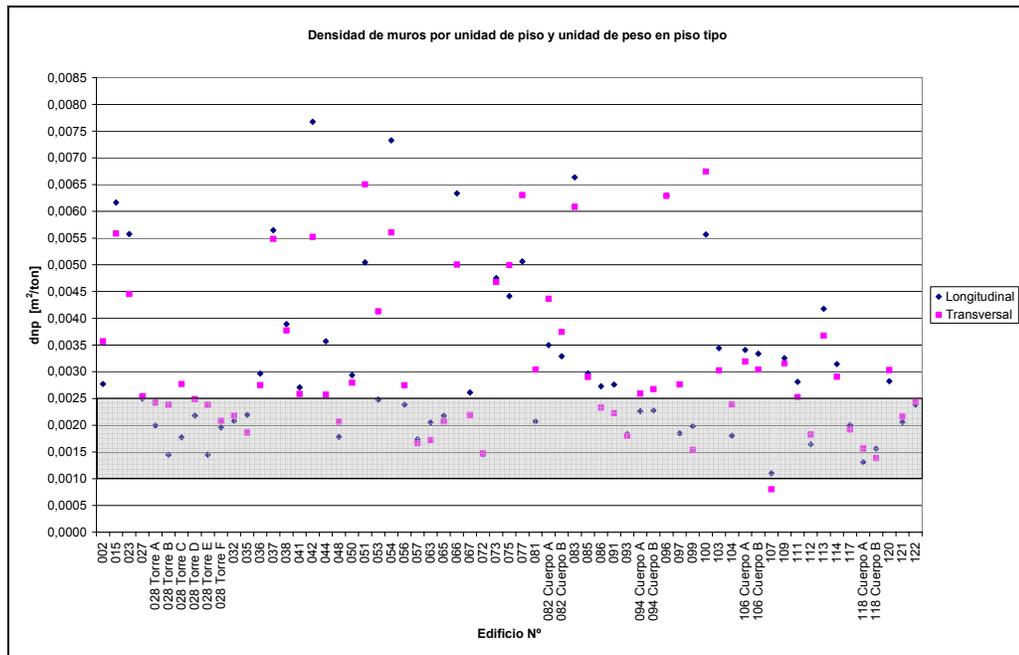


Gráfico 28, Valores de d_{np} del piso tipo de los edificios de la muestra final.

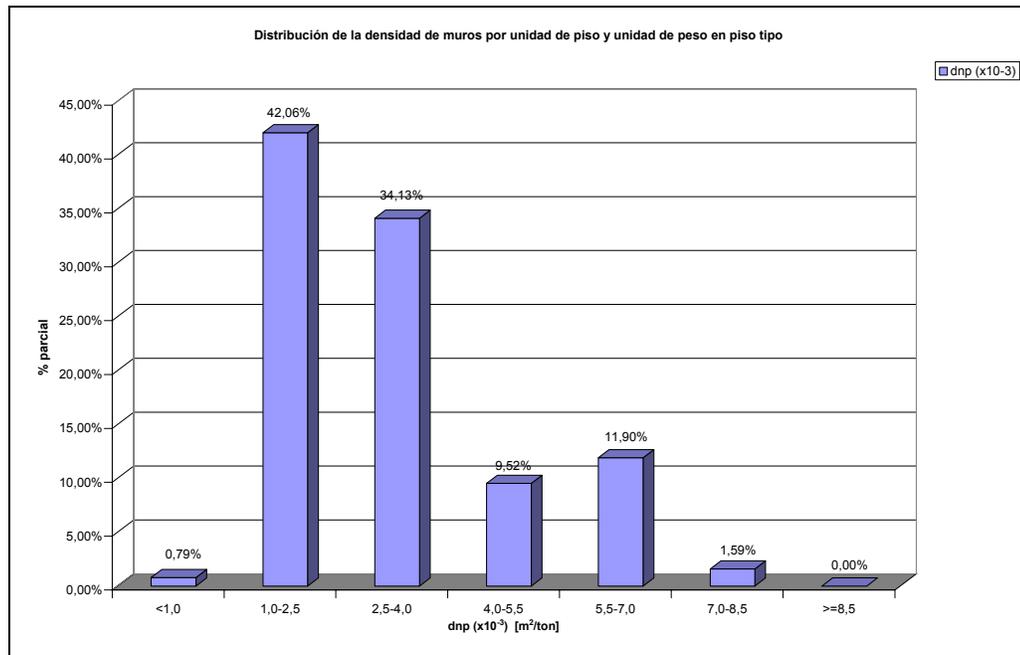


Gráfico 29, Distribución porcentual de d_{np} en el piso tipo de los edificios de hormigón armado de la muestra final.

Del gráfico 29 se observa que el 76,19% de los edificios presenta valores de d_{np} entre 0,001 y 0,004 [m^2/ton]. El aumento de la distribución de valores en el torno al rango de valores comprendidos entre 0,0055 y 0,007 [m^2/ton] puede deberse a que edificios con la misma cantidad de pisos, algunos presentan una mayor densidad de muros por lo que su d_{np} es mayor.

En los gráficos del 30 al 33 se grafican los resultados del parámetro d_{np} en primer piso y en el piso subterráneo:

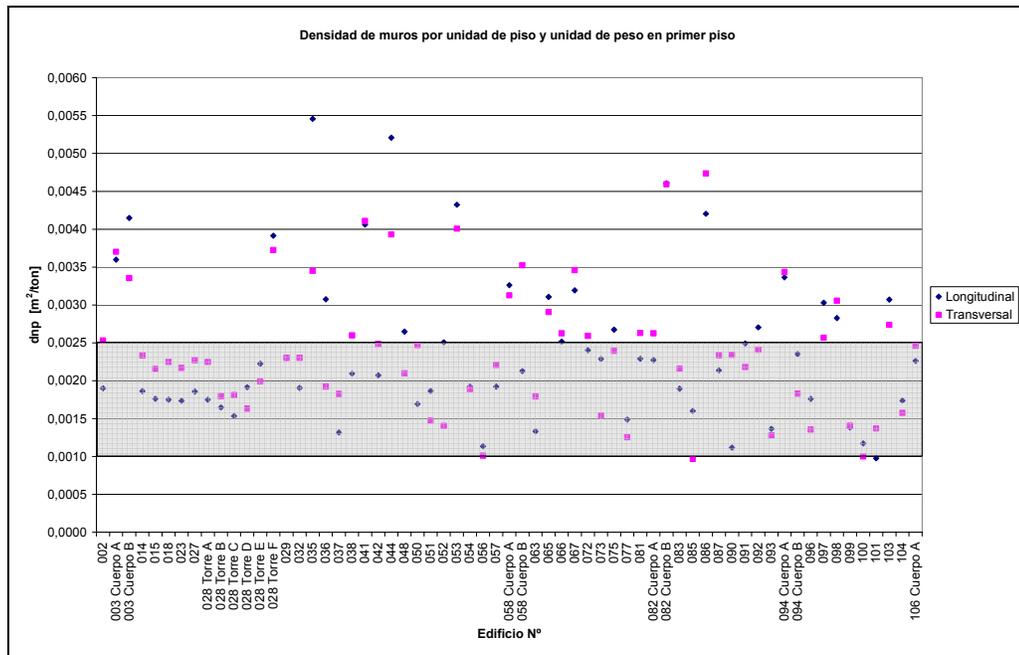


Gráfico 30, Valores de d_{np} en el primer piso de los edificios de la muestra final.

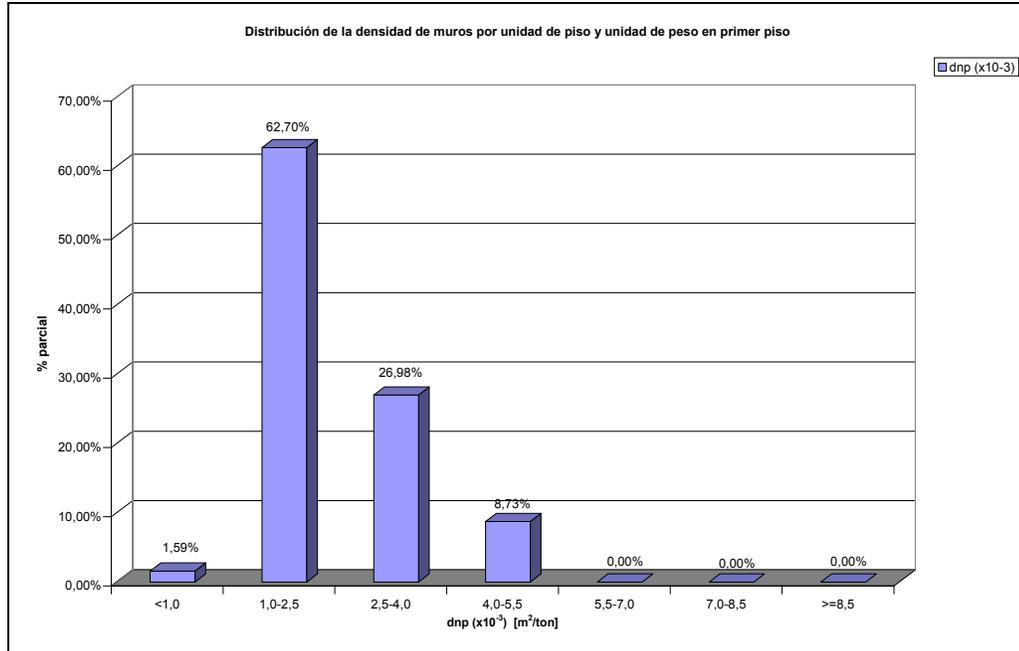


Gráfico 31, Distribución porcentual de d_{np} en el primer piso de los edificios de hormigón armado de la muestra final.

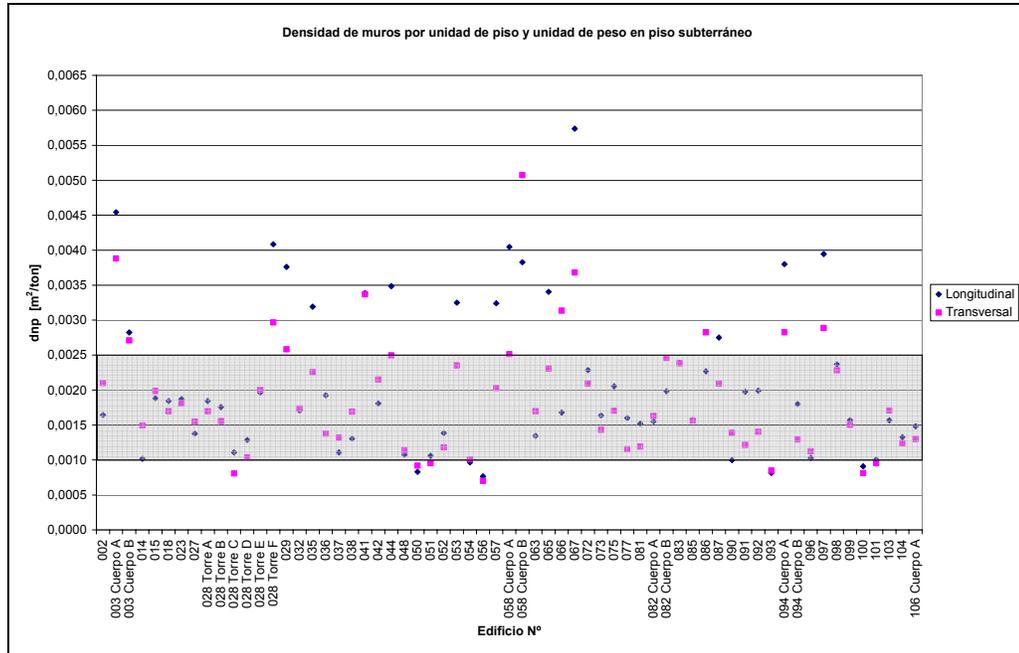


Gráfico 32, Valores de d_{np} del piso subterráneo de los edificios de la muestra.

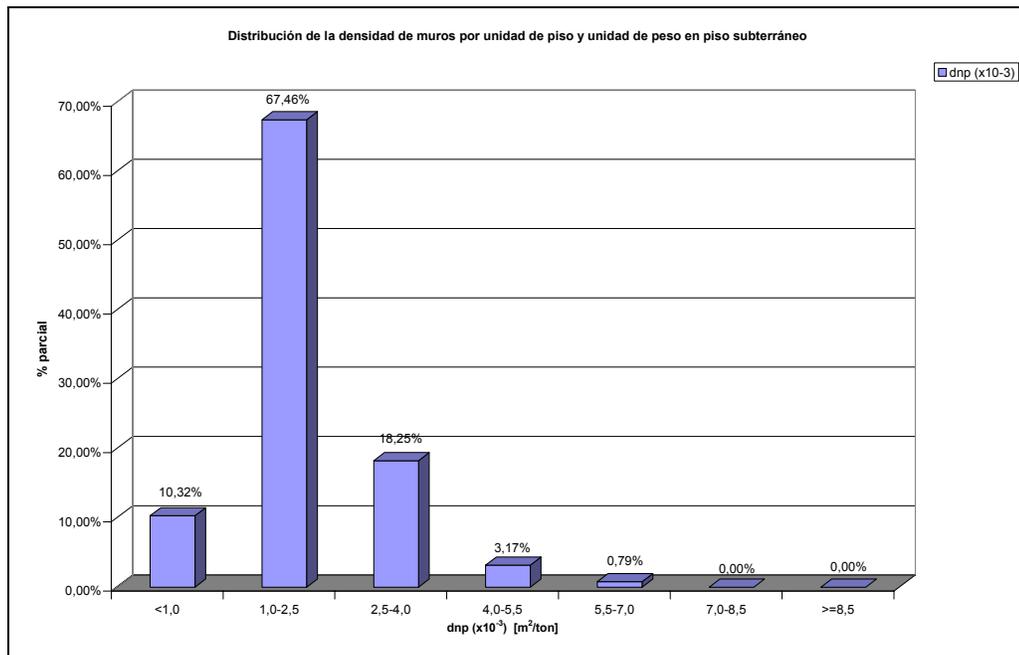


Gráfico 33, Distribución porcentual de d_{np} en el piso subterráneo de los edificios de hormigón armado de la muestra final.

De los gráficos anteriores se observa que tanto para el primer piso como para el piso subterráneo, el valor de d_{np} se concentra mayoritariamente en el rango comprendido entre 0,001 y 0,0025 $[m^2/ton]$, observándose muy pocos casos con d_{np} superiores a 0,005 $[m^2/ton]$.

Los valores más bajos de d_{np} se observan en los edificios de altura mayor a 15 pisos y con más de un subterráneo y los valores más altos de d_{np} se observan en aquellos edificios con altura menor a 15 pisos y con un subterráneo.

La diferencia de rangos de valores obtenidos entre el piso tipo y el primer piso y el piso subterráneo, se explica por la cantidad de pisos por sobre el nivel considerado³. Dado que la tensión de corte promedio tiende a aumentar con la cantidad de pisos cuando se conserve la densidad de muros, el valor de d_{np} , que es inversamente proporcional a la tensión de corte, tiende a disminuir. Es por esto que para el piso tipo se obtienen valores de d_{np} mayores, ya que no corresponde al primer piso en los edificios que se construyen actualmente y así tiene un número de pisos por sobre el nivel considerado menor que para el primer piso y piso subterráneo.

Para efectos del estudio de la forma cómo ha evolucionado este parámetro, se analizan los valores de d_{np} obtenidos con los valores de la base de datos histórica. Teniendo en cuenta que la evaluación de los valores de d_{np} para el piso tipo y el piso subterráneo no ha sido calculada en los estudios anteriores, encontrándose en la base de datos histórica sólo valores para el primer piso, la comparación se realiza para este piso. En los gráficos 34 y 35 se presentan la distribución porcentual de los valores de d_{np} en el primer piso para edificios construidos en los periodos 1939-2000 y 1939-2006.

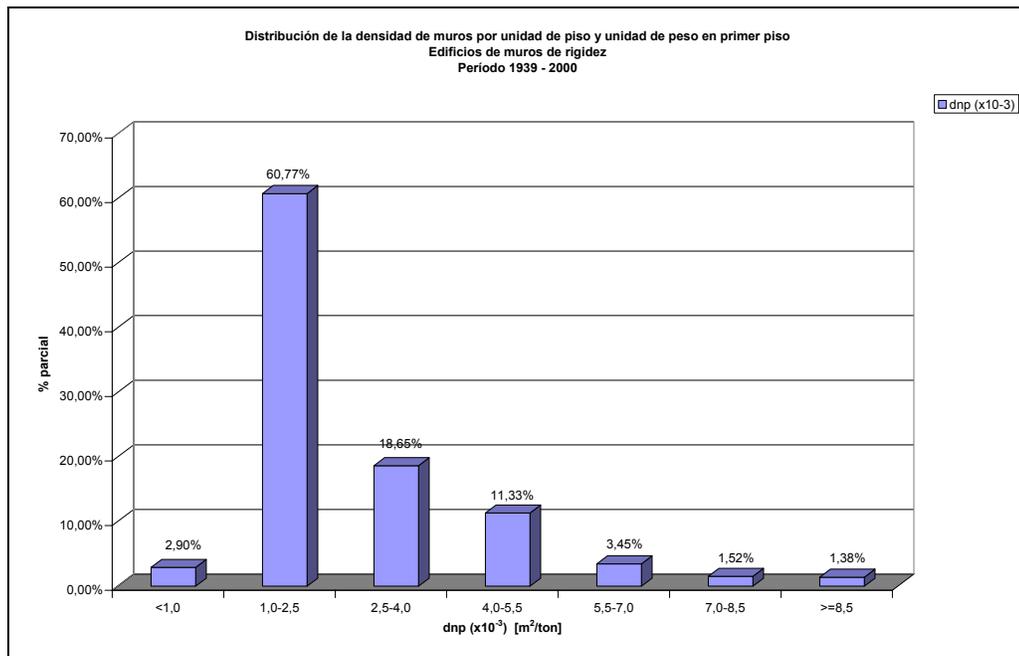


Gráfico 34, Distribución porcentual de d_{np} en el primer piso de los edificios de hormigón armado construidos entre los años 1939-2000.

³ Para el piso tipo se considera el piso más bajo dentro del intervalo de piso tipo para el edificio analizado, del mismo modo el piso subterráneo se considera el último subterráneo.

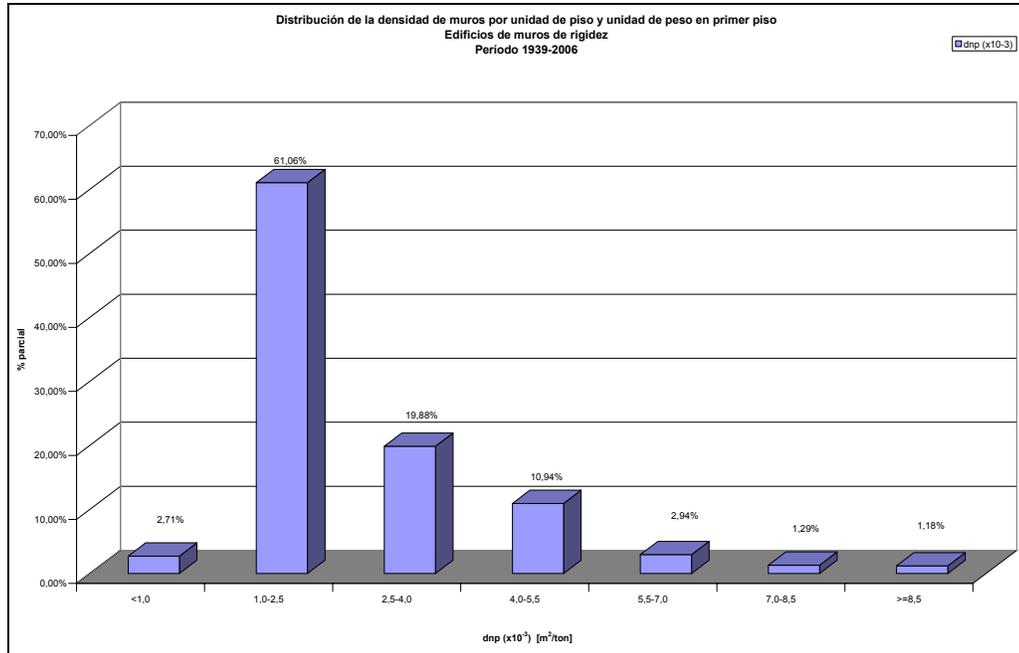


Gráfico 35, Distribución porcentual de d_{np} en el primer piso de los edificios construidos entre los años 1939-2006

De los gráficos anteriores se observa que en el período 1939-2006 se produce un leve aumento del porcentaje de casos en que el valor de d_{np} se ubica en el rango de valores comprendido en el rango 0,001-0,0025 [m^2/ton] junto a un leve aumento, en una proporción similar, de los casos con valores comprendidos en el rango de 0,0025-0,004 [m^2/ton], en comparación con el período 1939-2000.

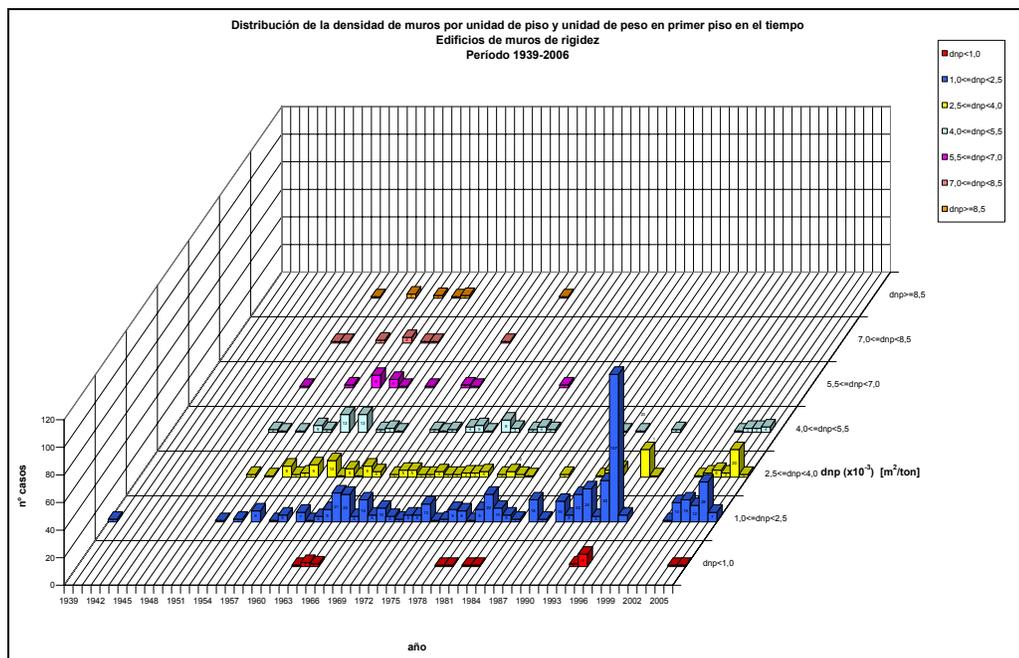


Gráfico 36, Distribución del número de casos según el valor de d_{np} en el primer piso para los edificios construidos entre los años 1939-2006.

Para visualizar la tendencia que ha tenido este parámetro en el tiempo, se dibuja en el gráfico 37 la línea que indica la tendencia y que mejor se ajusta a los datos reunidos.

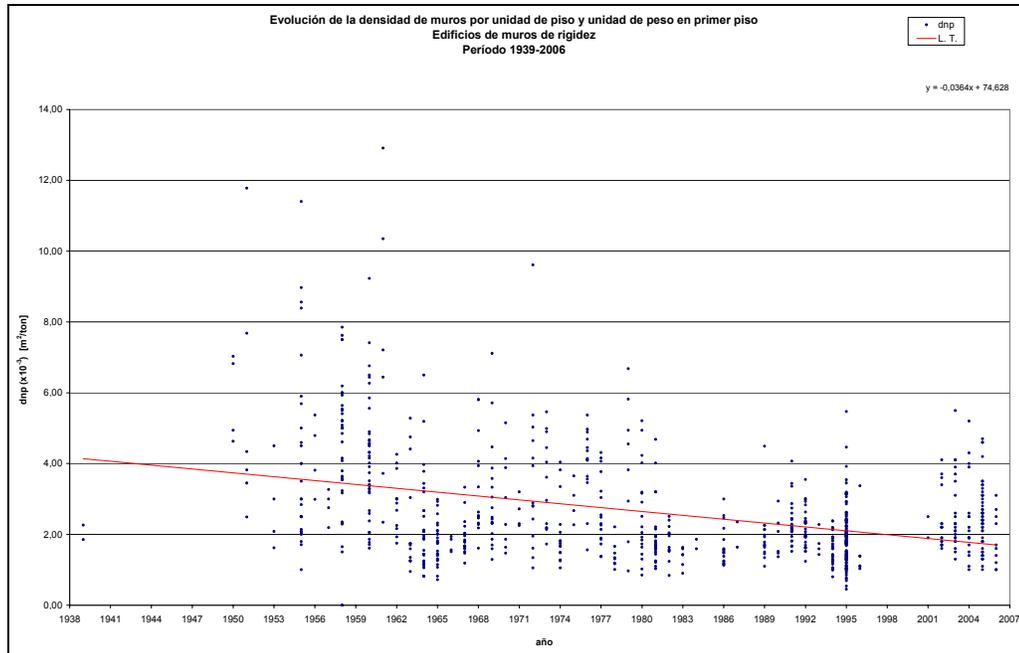


Gráfico 37, Tendencia de variación de los valores de d_{np} del primer piso entre los años 1939-2006.

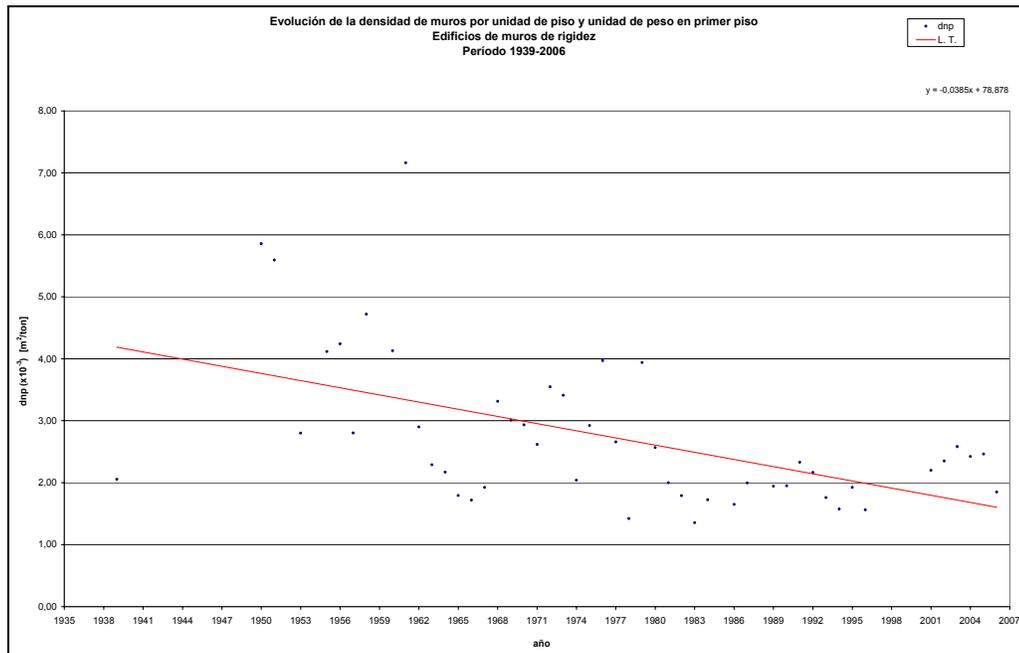


Gráfico 38, Tendencia de variación de los valores de la mediana de d_{np} del primer piso entre los años 1939-2006.

De los gráficos 37 y 38 se observa una clara tendencia a disminuir el valor de d_{np} para el primer piso, pasando de un valor promedio del orden de 0,004 a 0,002 [m²/ton].

La disminución del parámetro d_{np} en el tiempo implica un aumento en la tensión de corte media, la que depende de la *calidad del hormigón* y de la *contribución que se acepte de la armadura a resistir el corte*. Por lo anterior se puede considerar que se ha ido aumentando estos valores en los últimos años en el diseño de los edificios de hormigón armado.

4.4. PESO SÍSMICO

El peso sísmico se define de la siguiente manera:

$$\text{Peso sísmico} = \frac{\text{Peso total [ton]}}{\text{Nº de pisos sobre el suelo x Área de planta piso tipo [m}^2\text{]}}$$

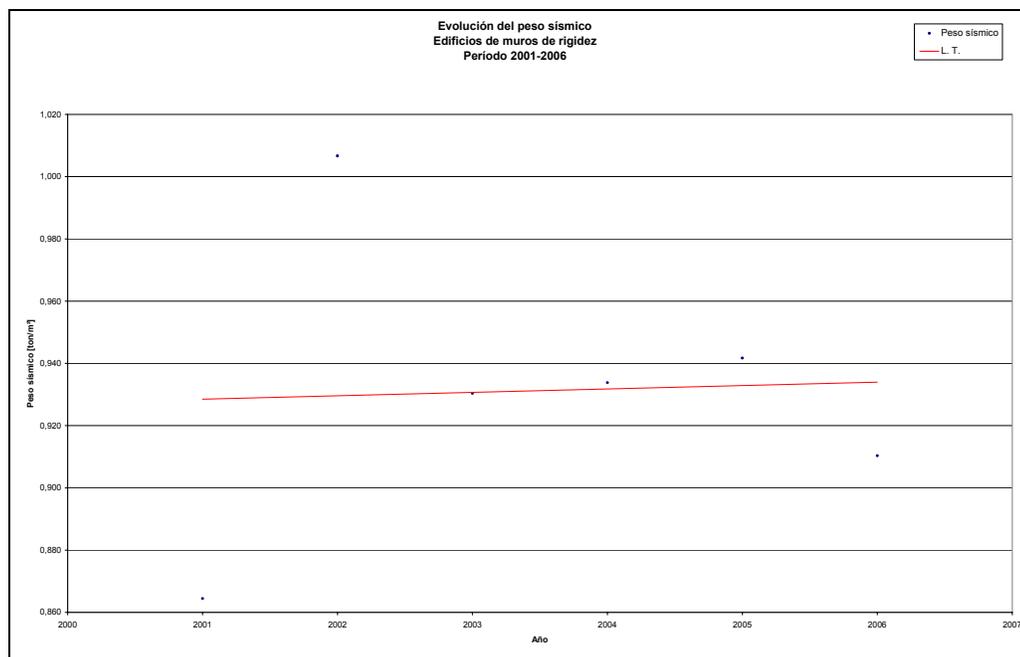


Gráfico 39, Evolución del peso sísmico.

El gráfico 39 muestra cómo ha ido evolucionando el peso sísmico en edificios de muros de rigidez de acuerdo a los datos obtenidos de la muestra final, mostrando una tendencia a aumentar en el tiempo.

Cuanto más pesada es una estructura, absorberá mayor cantidad de aceleración y, por ende, se verá más afectada por un sismo. Hay una relación directa entre el peso del inmueble y la incidencia del movimiento. Sin embargo, una estructura muy liviana también se verá seriamente afectada; por ello, los ingenieros buscan una media. El criterio fundamental corresponde a edificar una estructura que pueda soportar todos los esfuerzos en un tiempo que permita la evacuación total de las personas.

4.5. ACOPLAMIENTO MODAL

El acoplamiento modal es la relación entre el período rotacional y el período traslacional y muestra la interacción en la respuesta final que generan dos modos que poseen similar frecuencia de vibración.

A continuación se grafican los acoplamientos modales de los edificios de la muestra.

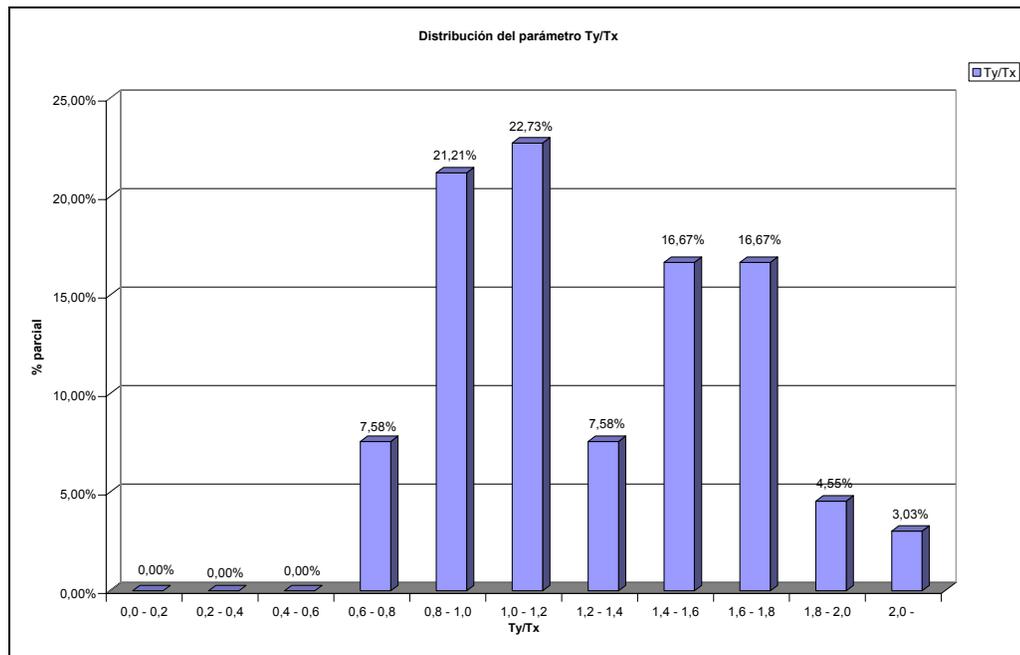


Gráfico 40, Distribución porcentual de los edificios de la muestra final de acuerdo con los valores recomendados por Guendelman et al. (1997) para clasificar los edificios según el parámetro Ty/Tx.

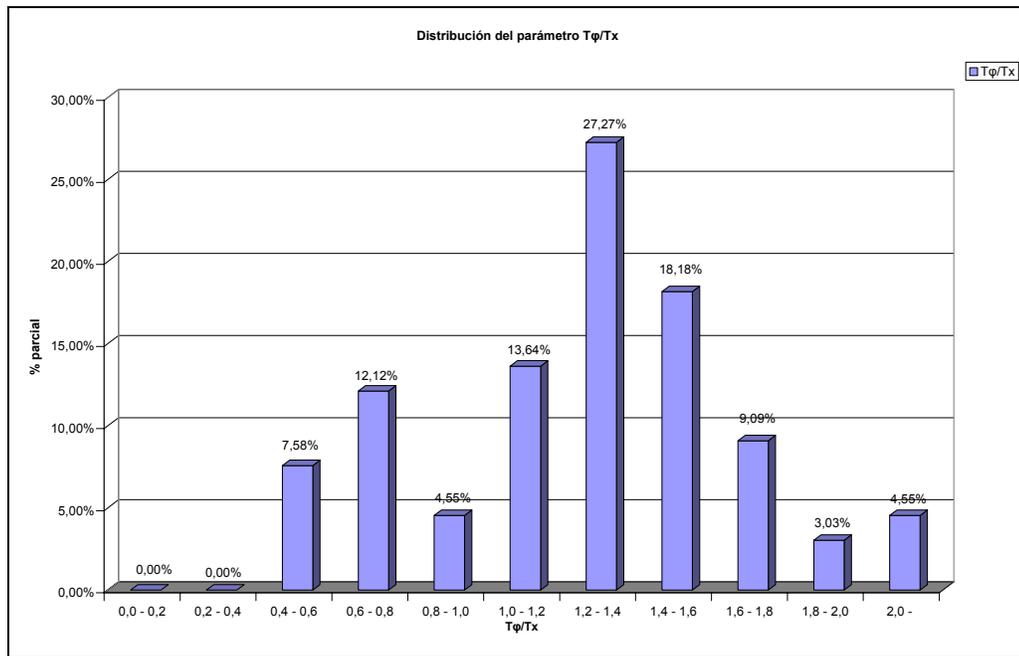


Gráfico 41, Distribución porcentual de los edificios de la muestra final de acuerdo con los valores recomendados por Guendelman et al. (1997) para clasificar los edificios según el parámetro $T\phi/T_x$.

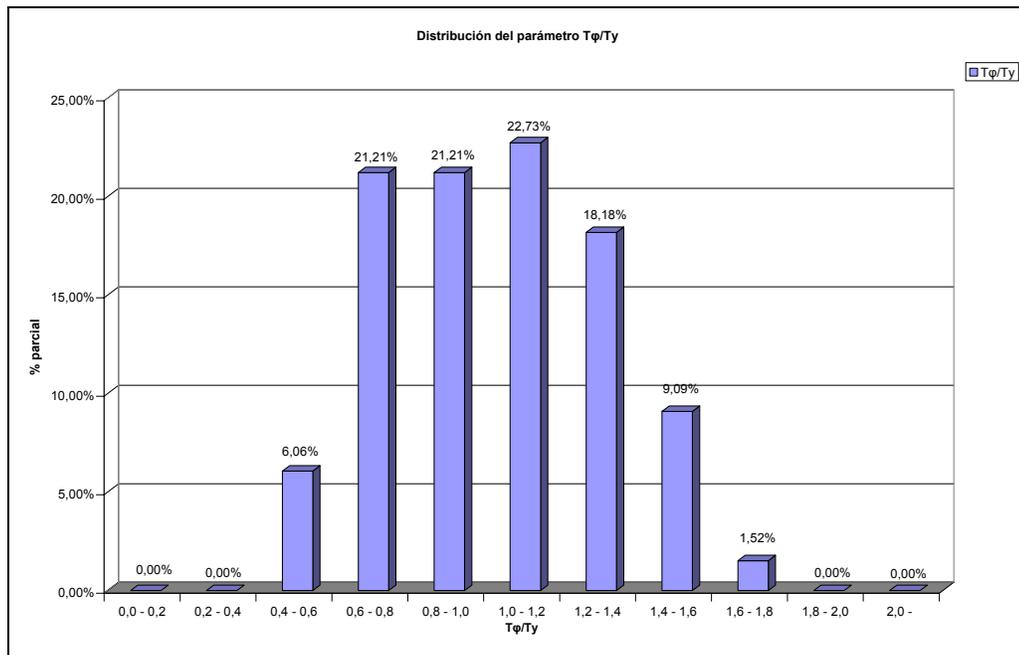


Gráfico 42, Distribución porcentual de los edificios de la muestra final de acuerdo con los valores recomendados por Guendelman et al. (1997) para clasificar los edificios según el parámetro $T\phi/T_y$.

Se puede observar en el gráfico 40 que el 43,94% de los edificios de la muestra final tienen un acoplamiento modal para sus períodos vibratorios traslacionales. Lo mismo se puede observar en el gráfico 42 respecto de su período rotacional y traslacional ($T\phi/Ty$). Este es un hallazgo negativo puesto que se recomienda que el cociente entre períodos fundamentales se aleje de la unidad en un 20%. Esto para controlar la sintonía modal que puede provocar amplificaciones en la respuesta dinámica de la estructura.

Para el caso del gráfico 41 se puede observar que sólo un 18,19% tiene un acoplamiento modal para el cociente ($T\phi/Tx$).

4.6. ANÁLISIS DE IMPACTO DE LA LEY DE REVISIÓN ESTRUCTURAL SOBRE LA RIGIDEZ Y LA DENSIDAD DE MUROS EN EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO

La ley N° 19.748 de revisión estructural fue promulgada en 2001 por la Comisión de Vivienda y Desarrollo Urbano. Esta ley modifica el decreto con fuerza de ley N° 458, de 1975, Ley General de Urbanismo y Construcciones, con objeto de establecer la obligación de revisar el proyecto de cálculo estructural.

Hasta 1980 la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones contemplaba la revisión de los proyectos estructurales, a cargo del ingeniero municipal, para las comunas que concentraban un mayor número de edificaciones en altura; procedimiento que, en los hechos, se amplió a todo tipo de construcciones, aún cuando dicha exigencia no estuviera establecida en esos términos. Posteriormente se definió la figura del revisor independiente quien debía comprobar que el anteproyecto, proyecto u obra debía cumplir con la ley General de Urbanismo y Construcciones y su Ordenanza. Finalmente, se estableció que no competía al Director de Obras Municipales ni al revisor independiente revisar los cálculos de estabilidad. Producto de esto último, finalmente no existía la revisión del proyecto de cálculo antes de construir las obras. Además, no se establecían requisitos especiales para los profesionales responsables de los proyectos de cálculo, pudiendo ser ellos arquitectos, ingenieros civiles, ingenieros constructores y constructores civiles.

Resultó entonces de primordial importancia asegurar la calidad de los proyectos de estabilidad estructural, para establecer controles que aseguren, por medio de la revisión de los proyectos estructurales, la mejor calidad de los mismos y, como consecuencia, mejores condiciones de asismicidad de las construcciones que cumplen las instrucciones del proyecto.

Fueron variados los antecedentes que se tuvieron en vista para considerar la idea de legislar en este sentido, entre ellos se pueden destacar, entre otros:

- A partir de 1980, se eliminó la revisión de los proyectos de estructuras, la materia podía ser entregada al arbitrio de los calculistas.
- La presencia de una arquitectura cada vez más audaz requiere de proyectos más delicados y con mayores consideraciones, como una forma de evitar el aumento de los riesgos sísmicos.
- La falta de especialización de la enseñanza universitaria en la disciplina de la ingeniería estructural, forma ingenieros que no cuentan con la debida acreditación del tipo o calidad de la ingeniería impartida.
- La amplia utilización de soluciones estructurales de marco rígido que, por razones de tipo técnico, exigen una alta rigurosidad en la definición del cálculo.
- El creciente acceso a programas computacionales creados para resolver, de forma meramente automática, hace más necesaria aún la revisión profesional de los proyectos. Según los especialistas, dichos programas provocan una sobre confianza en los proyectistas de poca experiencia.

Como consecuencia, la ley N° 19.748, dispone:

Los propietarios que soliciten un permiso de construcción para edificios de uso público y edificaciones que determine la Ordenanza General deberán contratar la revisión del proyecto de cálculo estructural respectivo por parte de un tercero independiente del profesional u oficina que lo haya realizado y que cuente con inscripción en un registro que para estos efectos mantendrá el Ministerio de la Vivienda y Urbanismo. El Ministerio podrá encomendar dicho registro a la entidad denominada "Instituto de la Construcción", cuya personalidad jurídica fuera concedida por decreto supremo N° 1.115, de 1996, del Ministerio de Justicia.

La Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones establecerá el alcance, las condiciones, las diversidades geográficas y los demás aspectos que deberán contemplarse en la revisión del cálculo estructural.

El reglamento que se dicte para regular el registro a que se refiere el inciso primero, establecerá los requisitos de inscripción, las causales de inhabilidad, de incompatibilidad, así como las de amonestación, suspensión y eliminación del mismo.

El impacto más relevante de la aplicación de esta ley es la incorporación de terceros independientes en la revisión de los proyectos de cálculo estructural lo que permite eliminar el riesgo que implicaba dejar el diseño en manos de los calculistas sin ningún control, evitando así depositar toda la confianza en eventuales profesionales sin experiencia, sin los conocimientos, recursos o herramientas necesarios para desarrollar su trabajo de cálculo estructural cumpliendo con las normas y bajos los estándares y mejores prácticas establecidas para esta disciplina.

Como consecuencia, mejora la práctica de diseño, se realiza un cálculo estructural más riguroso y apegado a las normas, de manera de obtener el informe favorable de Revisión del Proyecto de Cálculo Estructural, sin el cual no se obtiene la aprobación del proyecto. Por otro lado, el revisor independiente tiene el deber de realizar la revisión estructural de acuerdo a las normas que la ley indica, de lo contrario arriesga amonestaciones, sanciones e incluso la expulsión del Registro Nacional de Revisores de Proyectos de Cálculo Estructural.

La entrada en vigencia de la Ley N° 19.748 corresponde al 9 de julio de 2003, desde esta fecha y hasta el 9 de julio de 2005, las edificaciones que debían presentar el informe favorable de Revisión del Proyecto de Cálculo Estructural, son:

- Edificios de uso público, con destino de equipamiento y una carga de ocupación total superior a 100 personas.
- Conjuntos de vivienda cuya construcción hubiere sido contratada por los Servicios de Vivienda y Urbanización.
- Edificios que deban mantenerse en operación ante situaciones de emergencia, tales como hospitales, cuarteles de bomberos, cuarteles policiales, edificaciones destinadas a centros de control de empresas de servicios energéticos y sanitarios, emisoras de telecomunicaciones.
- Edificios cuyo cálculo estructural esté basado en normas extranjeras, las cuales deberán ser declaradas al momento de solicitar el permiso.

A partir del 9 de julio de 2005, entra en vigencia la segunda fase que incorpora:

- Conjuntos de viviendas sociales de tres o más pisos.
- Conjuntos de viviendas de tres o más pisos que no sean sociales.
- Edificios de tres o más pisos cuyo destino sea uso exclusivo de oficinas.

Considerando estas fechas, se analizaron los parámetros H/T, la densidad de muros y la densidad d_{np} para los edificios de la muestra final⁴ que cumplen con la ley N° 19.748 de revisión estructural, es decir, aquellos que identificaban el revisor independiente en sus permisos de edificación. El resultado de este análisis⁵ se presenta en los gráficos siguientes:

⁴ Estos edificios corresponden a los numerados desde el N° 087 hacia adelante, de la lista presentada en el Capítulo 4.

⁵ La densidad de muros y d_{np} fueron analizados para el piso tipo para poder comparar con los datos históricos.

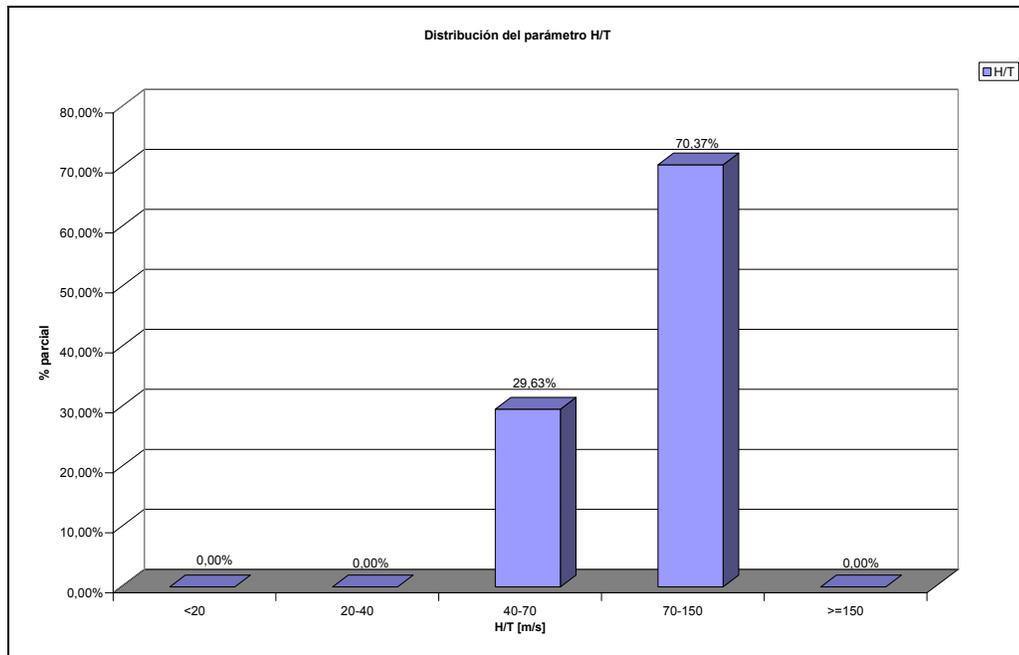


Gráfico 43, Distribución porcentual del valor de la relación H/T para edificios sometidos a revisión estructural.

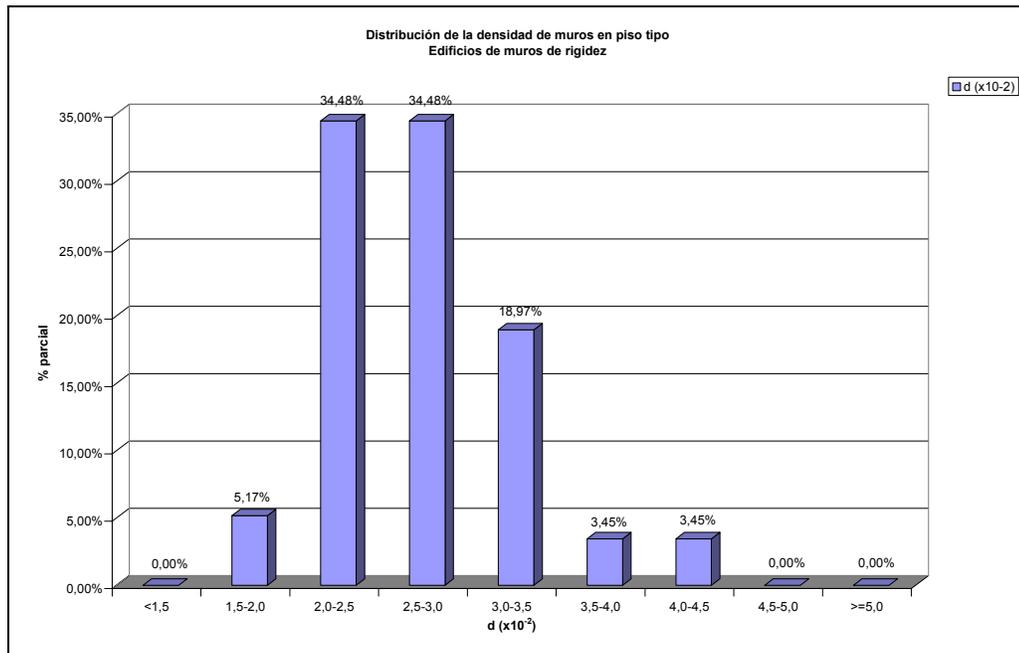


Gráfico 44, Distribución porcentual de la densidad de muros en el piso tipo para los edificios sometidos a revisión estructural.

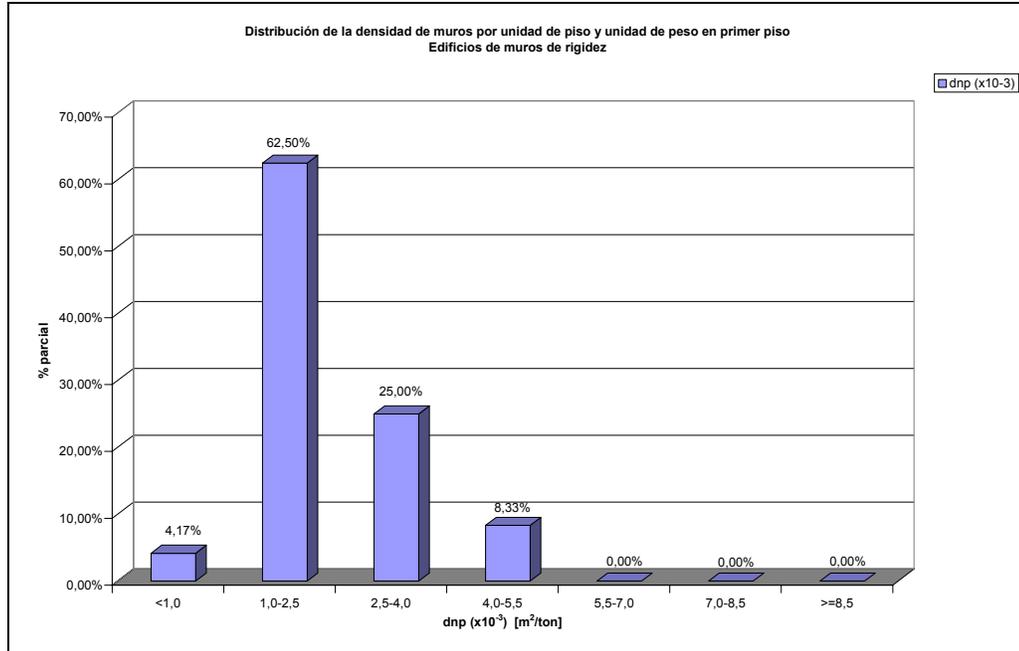


Gráfico 45, Distribución porcentual de d_{np} en el primer piso para edificios sometidos a revisión estructural.

De los gráficos anteriores se puede observar que los edificios que cumplen con la ley de revisión estructural, presentan un mayor valor de la relación H/T, en comparación con los edificios de la base de datos histórica (ver gráfico 4). En ellos todos los valores se ubican dentro del rango comprendido entre 40 a 150 [m/s], con una distribución que corresponde a un 70,37% de los edificios en el rango rígido y un 29,63% en el rango de rigidez normal.

Por otro lado, se ve que la densidad de muros en el piso tipo para los edificios sometidos a revisión estructural, se concentra mayoritariamente en el rango comprendido entre 0,020 y 0,035, con un valor promedio igual a 0,026, levemente más bajo que el promedio de los edificios de la base histórica (0,028).

Por último, se observa que el d_{np} se concentra principalmente en el rango de 0,001-0,004 [m²/ton], con un aumento de los casos en el rango menor a 0,001 [m²/ton] y la desaparición de casos sobre los 0,0055 [m²/ton]. El promedio disminuye con respecto a los valores de la base de datos histórica desde 0,0027 a 0,0023 [m²/ton].

4.7. COMENTARIOS RELACIONADOS CON EL CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Comentario General

La hipótesis al inicio de este trabajo planteaba que los controles de obras se habrían relajado después del terremoto de 1985 y que se admitía una suerte de autocomplacencia, tanto a nivel profesional como científico, respecto del comportamiento previsto de las estructuras, en particular, en la reducción aparente de la rigidez.

Relación H/T

Sin embargo, del estudio del parámetro H/T, se ha comprobado una tendencia decreciente con mayor dispersión entre los valores extremos. Esta situación significa que los valores de H/T se reducen y así se encuentran algunos casos por debajo de 40 m/seg.

Si se consideran los antecedentes que se obtuvieron para el terremoto del 3 de marzo de 1985 en la población de edificios de la ciudad Jardín de Viña del Mar, en un diagnóstico preliminar, se puede destacar que para las condiciones locales de esta ciudad en la zona de la Población Vergara y para edificios cuya altura no superaban los 22 pisos, se puede aceptar que el nivel de daños esperados en términos de H/T corresponden a los indicados en la tabla 7 ("Characteristic housing types in Chile. 7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering (7NCEE). Estados Unidos". M.O. Moroni, M. Astroza I., 2002).

H/T [m/s]	Nivel de daño
> 70	Despreciable
50 ÷ 70	Daño no-estructural
40 ÷ 50	Daño estructural leve
30 ÷ 40	Daños estructural moderado

Tabla 7, Nivel de daño esperado en función de H/T.

Donde: H = Altura del edificio sobre el nivel del suelo en [m].

T= Período del primer modo de traslación [seg].

Teniendo en cuenta los valores de la tabla 7, se puede apreciar del gráfico 6, que ha habido una tendencia a construir edificios con valores de H/T menores que 40 [m/s], la que fue mayor en la década de los 90 del siglo pasado y que aunque existe en los últimos 6 años se mantiene en porcentajes muy bajos si se compara con los valores de H/T del resto edificios de la muestra.

Cálculo de H/T

De manera de visualizar el impacto que tiene el método de cálculo del parámetro H/T, dependiendo del piso considerado para calcular la altura (incluyendo o no el o los subterráneos), se presenta a continuación los resultados del análisis de este parámetro para los edificios de la muestra final, considerando la altura medida desde el último subterráneo, tal como lo propone Guendelman.

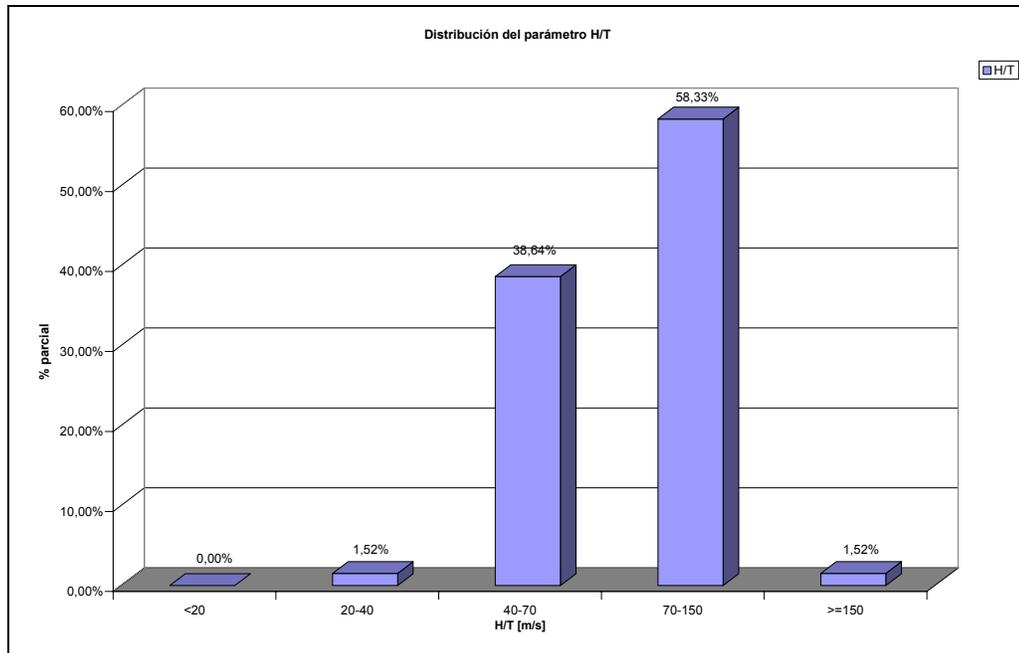


Gráfico 46, Distribución porcentual de los edificios de la muestra final de acuerdo con los valores recomendados por Guendelman et al. (1997) para clasificar los edificios según el parámetro H/T, con H medido desde el último subterráneo.

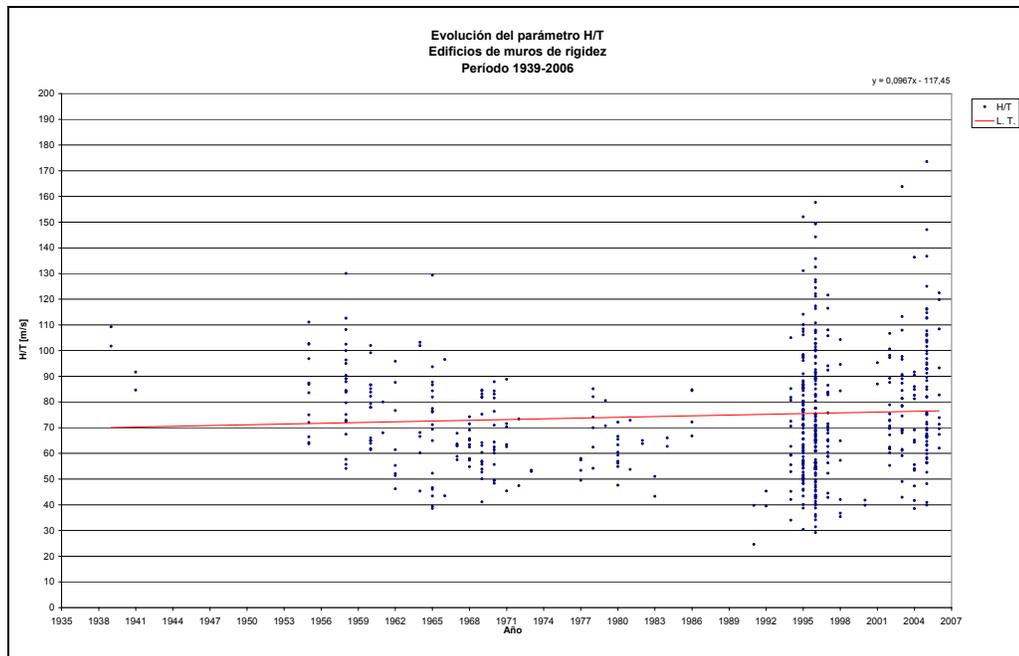


Gráfico 47, Tendencia de evolución del parámetro H/T entre los años 1939-2006, con H medido desde el último subterráneo.

Se observa un cambio drástico en los resultados obtenidos llegando incluso a revertir la tendencia observada. Para el parámetro H/T medido desde el nivel del suelo la tendencia en la evolución es decreciente, mientras que medido desde el último subterráneo la tendencia es creciente. Lo importante de esta discusión, es que debe establecerse un método claro para el cálculo del parámetro H/T de manera de que los resultados obtenidos sean comparables a futuro.

Densidad de muros, d

- El parámetro densidad de muro, d , presenta una tendencia central que se mantiene prácticamente constante con el tiempo; resultando igual a 0,028 para el piso tipo.
- Mantener la densidad de muros o disminuirla cuando se aumenta el número de pisos puede significar un aumento de los esfuerzos axiales de los muros lo cual hace menos dúctil su comportamiento ante acciones sísmicas.

Densidad de muros por unidad de piso y de peso, d_{np}

El parámetro d_{np} muestra una clara tendencia a la baja producto de que la densidad de muros se ha mantenido aún cuando ha aumentado el número de pisos. Además del gráfico 37 se observa que el valor extremo inferior del parámetro d_{np} ha disminuido si se compara con los valores mínimos de la muestra construida antes de 1985.

Teniendo en cuenta este resultado e interpretándolo como el valor inverso de la tensión media de corte que estarían soportando los muros del edificio (Lagos, 2005), se comprueba que esta disminución significa que la contribución de las armaduras a resistir el esfuerzo de corte tiene un rol importante.

Comparación con datos de edificios construidos en Concepción y Antofagasta.

De los resultados obtenidos de los estudios en Antofagasta y Concepción, se observa que para el parámetro H/T , la gran mayoría de los edificios en Antofagasta está en el rango de estructura rígida, en cambio en Concepción la gran mayoría se ubica en el rango de estructura normal. Y Santiago presenta edificios en el rango de estructura normal y rígida en igual proporción.

Para la densidad de muros en Antofagasta, al igual que en Santiago, los valores se distribuyen mayoritariamente en el rango de 0,02 y 0,035. Sin embargo en Concepción la distribución de los valores de la densidad de muros se concentra en los 5 primeros rangos hasta 0,035.

Vulnerabilidad de los edificios de hormigón armado.

Como resultado de este estudio, no se observa un aumento apreciable de la vulnerabilidad de la muestra de edificios estudiada puesto que no se confirma la hipótesis de un relajamiento de las prácticas de diseño estructural a partir del año 1985.

Si bien no existe una relación directa entre los parámetros analizados en este estudio y el posible daño frente a un sismo⁶, se observa una tendencia a disminuir el valor de H/T , lo que apunta en la dirección desfavorable si se tiene en cuenta el comportamiento que tendrá la estructura frente a un evento sísmico.

Es importante destacar que se deben seleccionar los casos más desfavorables de la muestra y determinar en ellos los índices que se han recomendado para calificar la vulnerabilidad sísmica considerando todos los parámetros necesarios. El uso de indicadores estructurales como el perfil Bío-Sísmico⁷, permite complementar el uso de estos índices.

⁶ Afirmación avalada por R. Riddell, S. Wood, J.C. de la Llera, 1987 y G. Cáceres, 2005.

⁷ Cuociente altura total/periodo, primer modo traslacional, efecto P- Δ , desplazamiento del nivel superior, máximos desplazamientos de entresijos, indicadores de acoplamiento, indicadores de redundancia estructural y demanda de ductilidad, factor de reducción espectral efectivo (R^{**}).

CAPÍTULO 5: INSPECCIÓN VISUAL RÁPIDA DE EDIFICIOS PARA DETERMINAR POTENCIALES PELIGROS SÍSMICOS

La inspección visual rápida de edificios para determinar potenciales peligros sísmicos (Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards, FEMA, Julio 2005), consiste en asignar a ciertas características de los edificios valores cuantitativos a partir de la observación visual para obtener el nivel de potencial riesgo sísmico.

Este método fue originalmente desarrollado en 1988 por la FEMA (Federal Emergency Management Agency) de Estados Unidos. En 1999, a través del financiamiento otorgado por el ATC (Applied Technology Council) el estudio fue actualizado, generando el FEMA 154 (Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook) y el FEMA 155 (Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: Supporting Documentation).

El método fue desarrollado para una amplia audiencia, incluyendo inspectores de obra, instituciones de gobierno y dueños de edificaciones del sector privado, para identificar, inventariar y establecer un ranking de las edificaciones que presentan un potencial riesgo sísmico. Aunque este método es aplicable para toda edificación, su propósito principal está dirigido a:

- Edificios antiguos diseñados y construidos con anterioridad a la adopción de diseño sísmico adecuado y detalles específicos.
- Edificios en suelo blando o pobre.
- Edificios con características de desempeño que influyen de manera negativa su respuesta sísmica, por ejemplo, irregularidades en planta y en altura.

El método se basa en una observación visual del edificio desde el exterior, y si es posible, del interior. Parte por la asignación de un puntaje de peligro estructural básico de acuerdo al tipo de edificación el cual es posteriormente modificado, utilizando factores modificadores que dicen relación con atributos de desempeño observados. Estos modificadores se suman (o se restan) al puntaje de peligro estructural básico para obtener al puntaje final estructural “S”. El puntaje de peligro estructural básico, los modificadores de puntaje y el puntaje final estructural “S”, se relacionan con la probabilidad de colapso del edificio observado frente a un movimiento sísmico severo.

El puntaje final estructural “S” típicamente se encuentra dentro del rango de 0 a 7 donde el mayor puntaje representa un mejor desempeño sísmico esperado. Para aplicar este método, se utiliza la tabla de recolección de datos (Data Collection Form) siguiente:

La tabla de recolección de datos cuenta con los siguientes campos:

Información básica del edificio, ésta corresponde a dirección, número de pisos, año de construcción, total de metros cuadrados, nombre del edificio y uso; nombre de la persona y fecha de inspección.

Sección cuadriculada, esta sección se utiliza para incluir dibujos de la forma del edificio o de sus plantas.

Sección de fotografía, esta sección se usa para agregar una fotografía del edificio.

Sección de ocupación (*Occupancy*), en esta sección se indica el tipo de ocupación de la estructura, eligiendo entre las opciones siguientes:

- Ensamblajes
- Comercial
- Servicios de emergencia
- Gobierno
- Histórico
- Industrial
- Oficina
- Residencial
- Escuela

Además se debe indicar la cantidad de personas que habita o trabaja en el edificio, de acuerdo con los rangos siguientes:

- 0-10
- 11-100
- 101-1000
- 1000+

Sección de puntajes y modificadores (*Basic score, modifiers, and final score S*): esta sección se utiliza de la manera siguiente:

- Primero se selecciona el tipo de edificación (*Building type*), esto determinará la columna que se utilizará para los cálculos. Cada tipo de edificación tiene su puntaje estructural básico (*Basic score*), por ejemplo, para el tipo de edificación de muros de corte (C2), el puntaje estructural básico⁸, para altura mediana, corresponde a 2,5 y para mayor altura corresponde a 1,8.

El puntaje estructural básico (*BSH, Basic Structural Hazard, Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards, FEMA 155/September 1988*) se define para un edificio como el logaritmo negativo en base 10 de la probabilidad de que el daño exceda el 60% del valor de la edificación.

$$BSH = -\log_{10}[\Pr(D \geq 60\%)]$$

El puntaje estructural básico se modifica a través de factores de modificación de desempeño (*Performance Modification Factor, PMF*), específicos de la edificación, con lo que se obtiene el puntaje estructural S como:

$$BSH \pm PMF = S,$$

Para aplicar los factores de modificación de desempeño, al puntaje estructural básico se le debe sumar el valor que indica la tabla en base a:

- Cantidad de pisos del edificio, clasificándose en altura media (*Mid Rise, 4 a 7 pisos*) o de mayor altura (*High Rise, sobre 7 pisos*).
- Irregularidad en altura (*Vertical Irregularity*). La irregularidad en altura se refiere a construcciones escalonadas en vistas de elevación, muros inclinados, construcciones sobre laderas, piso blando, construcciones con columnas cortas o paredes dañadas sin reforzamiento.
- Irregularidad en planta (*Plan Irregularity*). La irregularidad en planta se refiere a edificaciones con esquinas entrantes (L, T, U, E, etc.) con buena resistencia lateral en sólo una dirección, entre otros.
- Si la edificación es previa al primer año de vigencia de la norma sísmica (*Pre-Code*), o si la edificación es posterior a mejoras adoptadas en la norma sísmica (*Post-Benchmark*).
- Tipo de suelo⁹ (*Soil Type*): C, suelo rocoso o muy denso; D, suelo rígido; E, suelo blando.

⁸ Valor obtenido desde la tabla B2, del apéndice B de Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards, FEMA 155/September 1988, correspondiente a un EPA=0,4g y un estructura de hormigón armado con muros de corte sin marcos (RCSW NO MRF - MR y RCSW NO MRF - HR).

⁹ El tipo de suelo A y B no se incluye en la tabla porque aporta puntaje igual a cero.

- Luego, el puntaje final S (*Final Score S*):

$$\text{Puntaje final estructural } S = \log_{10}[\text{Pr}(D \geq 60\%)]$$

Este puntaje es la medida de probabilidad de sufrir un daño que implique un valor mayor al 60% del valor del edificio específico, para un valor de la acción sísmica definida por un EPA (aceleración máxima efectiva) específico.

El valor del 60% es considerado como el umbral de daño, sobre el cual muchas estructuras son demolidas en lugar de ser reparadas, pues generalmente son consideradas como pérdida total y a partir de este punto existe un riesgo significativo de colapso.

Este método separa a las edificaciones en dos categorías: aquellas que se espera que tengan un desempeño sísmico aceptable y aquellas que pudieran ser sísmicamente peligrosas y deben ser estudiadas con más detalle.

Se considera el puntaje $S = 2$ como el punto de corte donde los edificios con un puntaje menor o igual a 2 presentarán un potencial peligro sísmico y deben ser investigados por un profesional de diseño con experiencia en diseño sísmico.

Es importante destacar que, dado que este método es visual y depende del juicio de la persona que lo aplica, no constituye una evaluación rigurosa y requiere de experiencia en la materia por parte de la persona que lo aplica. Además está diseñado para realizarse desde el exterior siendo la inspección interior no siempre posible por lo que algunos detalles de peligro pueden no ser visibles. Puesto que éste es un método preliminar que forma parte de un procedimiento en varias fases para la identificación de edificaciones potencialmente peligrosas, una edificación evaluada con potencial peligro sísmico requerirá mayores estudios y una inspección más minuciosa desarrollada por un profesional de diseño sísmico.

5.1. APLICACIÓN DEL MÉTODO

El método de inspección visual rápida fue aplicado en los 76 edificios de la muestra final, los gráficos 48 y 49 muestran la distribución de los edificios según su puntaje final estructural S:

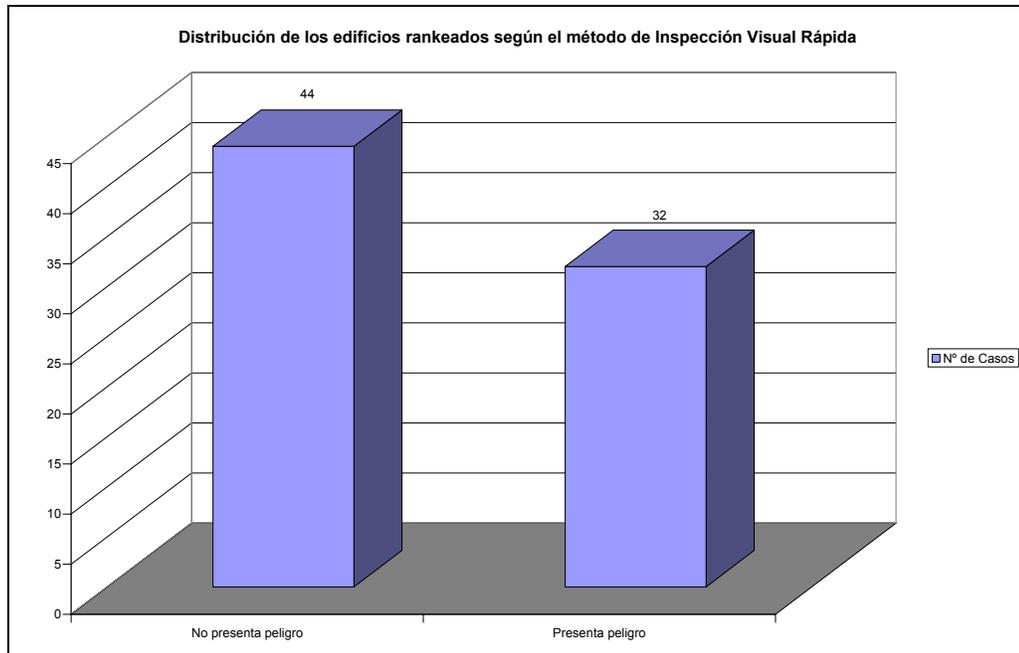


Gráfico 48, Resultado de la aplicación del método de inspección visual rápida sobre la muestra final de edificios.

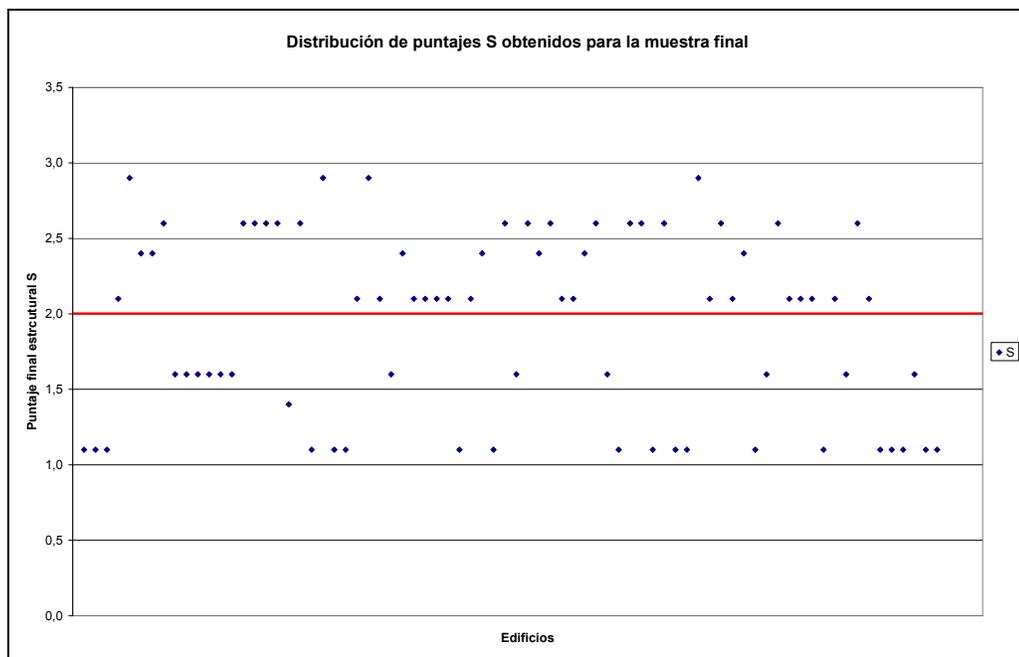


Gráfico 49, Resultado de la aplicación del método de inspección visual rápida sobre la muestra final de edificios.

Se puede observar que según los parámetros utilizados por este método, un 58% (44 casos) de los edificios de la muestra final presentan un desempeño sísmico aceptable, observándose 32 casos con un potencial peligro sísmico. El promedio de los puntajes finales estructurales es de 1,9, con un máximo de 2,9 y un mínimo de 1,1.

Tal como se mencionó anteriormente, la aplicación del método está directamente relacionada con el juicio de la persona que lo aplica. Una prueba de esto lo constituye por ejemplo, un caso de la muestra que fue evaluado con un puntaje $S=1,4$, es decir, que presenta potencial peligro sísmico. Este caso obtuvo esta evaluación dado que se consideró que presenta irregularidad en altura debido a que el último piso (séptimo piso) tiene una superficie menor que el resto, por lo tanto su modificador de irregularidad en altura le resta un punto a su puntaje básico.

Otra persona aplicando el mismo método, podría considerar que la presencia de un último piso con una superficie menor no constituye una irregularidad en altura, lo que implicaría que no se le restaría el modificador, obteniéndose un puntaje final estructural de 2,4, es decir, por sobre el punto de corte lo que implica que este caso no presentaría un potencial peligro sísmico.

Como ejemplo se presenta en la siguiente tabla, 3 casos de la aplicación de este método:

EDIFICIO N°	PUNTAJE BASE, MODIFICADORES Y PUNTAJE FINAL					
	Puntaje Base	Mediana Altura	Mayor Altura	Irregularidad en Altura	Irregularidad en Planta	PUNTAJE FINAL
052	1,8		0,8		-0,5	2,1
053	1,8		0,8	-1,0		1,6
096	2,5	0,4				2,9

Tabla 8, Ejemplos de aplicación del método de inspección visual rápida.

5.2. DISCUSIÓN DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO

La aplicación de este método contempla la determinación de la probabilidad de daño que exceda el 60% del valor de la edificación, para un valor específico del nivel de intensidad sísmica en términos de la intensidad modificada de Mercalli (Modified Mercalli Intensity, MMI), la cual se relaciona con la aceleración peak del suelo (Peak Ground Acceleration, PGA) y la aceleración peak efectiva del suelo (Effective Peak Ground Acceleration, EPA).

La determinación de esta probabilidad es una tarea bastante compleja para lo cual no existen métodos ni datos suficientes, de manera que para llevarla a cabo se conformó un grupo de ingenieros expertos en ingeniería sísmica quienes clasificaron los tipos de construcción de California y calcularon la probabilidad de obtener variados niveles de daño dado un nivel de acción sísmica específico, en el proyecto ATC-13 (ATC, 1985). Por lo tanto el puntaje estructural básico fue desarrollado con información relacionada a daños sísmicos, utilizando factores de daño, tipos de construcción y normativas de construcción propias del estado de California, Estados Unidos.

Además, como el factor de daño es una variable estocástica que fue estimada por el grupo de ingenieros expertos del ATC-13, es un valor “subjetivo”.

Por lo anterior, este método no es directamente aplicable a la realidad chilena, por lo que su aplicación sobre nuestra muestra final no garantiza resultados concluyentes de cuál será el comportamiento y desempeño de los edificios de la muestra frente a un movimiento sísmico. No obstante lo anterior, el método permite al observador hacerse una idea o una concepción intuitiva del estado del edificio y su potencial peligro, al mismo tiempo que entrega una guía de las características del edificio relevantes a evaluar.

Las características relevantes a evaluar se ven reflejadas en el tipo de edificación y en los factores de modificación de desempeño (Performance Modification Factor, PMF). Es justamente en estos puntos donde existen grandes diferencias entre Chile y Estados Unidos.

Los tipos de edificación utilizados en Estados Unidos contemplan estructuras de acero y estructuras prefabricadas de hormigón, las que en Chile no son una práctica habitual. Por otro lado, la asignación de valores de puntaje estructural básico para cada tipo de edificación tampoco aplican a la realidad chilena, pues como se mencionó anteriormente, estos valores fueron determinados con probabilidades de daño relativas a características sísmicas propias de California, las cuales son de diferente naturaleza a las características sísmicas chilenas. Estas características sísmicas (sismos subductivos en el caso chileno y transcurritos en el caso de California), más las características geológicas del terreno determinan la intensidad de los sismos y la aceleración peak del suelo.

Por otro lado, los factores de modificación de desempeño evalúan características universales de las edificaciones (altura, irregularidad vertical y de planta), sin embargo, la asignación de valores para estos factores es dependiente del lugar geográfico. Asimismo, los valores relativos a la adopción y actualización de las normas de diseño dependen de las normas específicas aplicables al lugar geográfico donde se encuentra el edificio.

5.3. COMPARACIÓN ENTRE DAÑOS ESPERADOS EN TÉRMINOS DE H/T Y APLICANDO EL MÉTODO DE INSPECCIÓN VISUAL RÁPIDA

El nivel de daños esperados en términos de H/T para 66 edificios de la muestra final, lo que representa 132 casos de estudio, se presenta en el gráfico 50.

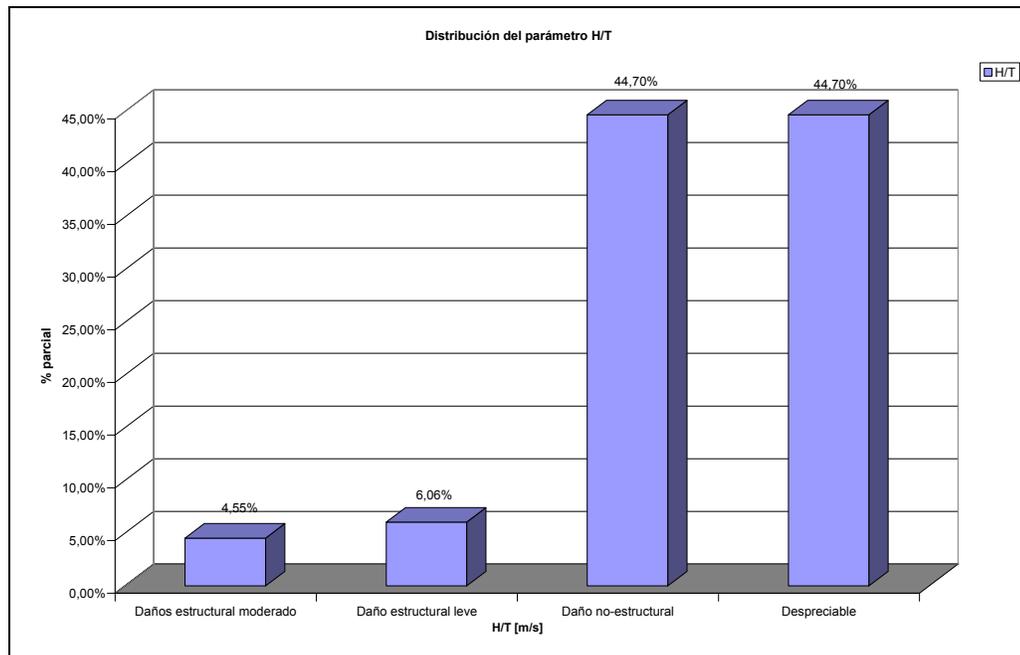


Gráfico 50, Distribución porcentual de los edificios de la muestra final de acuerdo al nivel de daños esperados en términos de H/T.

El método de inspección visual rápida fue aplicado en los mismos 66 edificios de la muestra final, el gráfico 51 muestran la distribución de los edificios según su puntaje final estructural S.

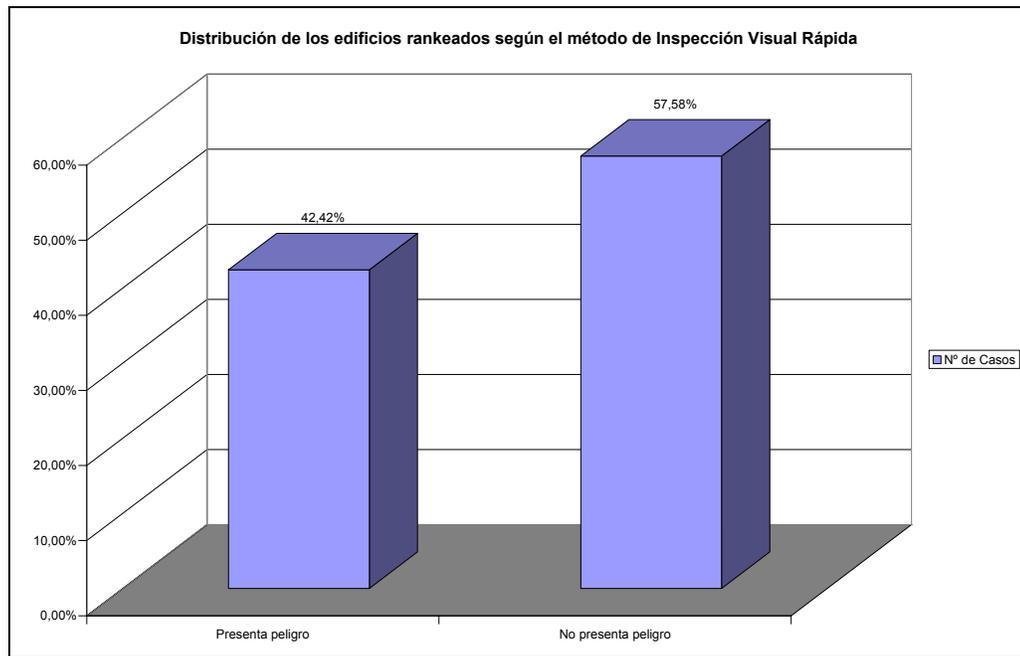


Gráfico 51, Distribución porcentual de los edificios de la muestra final de acuerdo a su puntaje estructural final S.

De los gráficos 50 y 51 se observa que existe una diferencia entre ambas formas de relacionar daño, en términos de H/T, para un 44,70% de los edificios, el daño sería despreciable, en cambio, para el método de inspección visual rápida un 57,58% no presentaría peligro.

Pero ahora si relacionamos H/T con el puntaje final estructural S, es decir, para aquellos edificios en que H/T sea menor o igual a 70 [m/s] y que S sea menor a dos, sólo un 25% de los casos cumplen esta condición.

Estas diferencias podrían ser menores si el método de inspección visual rápida se adaptara a la realidad chilena.

CAPÍTULO 6: COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Hasta 1980 la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones contemplaba la revisión de los proyectos estructurales, a cargo del ingeniero municipal. En 1981 se eliminó el requisito de las revisiones por parte de la Dirección de Obras Municipales. Recién en Julio de 2005, entra en vigencia la ley de revisión estructural que incorpora a terceros independientes en la revisión de los proyectos de cálculo estructural, después de 25 años de construcciones sin revisión que llevan a suponer que existió una relajación en las prácticas de diseño estructural que lleva a construcciones menos resistentes y más vulnerables frente a sismos.

Los resultados de este trabajo indican que el parámetro H/T presenta una tendencia levemente decreciente, el parámetro densidad de muros presenta una tendencia constante y el parámetro dnp, una tendencia decreciente. Esto implica una leve disminución en la rigidez, pero dado que los valores del parámetro H/T siguen manteniéndose mayoritariamente dentro del rango aceptable (Normal y Rígido según la definición de Guendelman), este hallazgo no necesariamente confirma la suposición previa.

Respecto de la ley de revisión estructural, podemos mencionar que el impacto más relevante de su aplicación es la incorporación de terceros independientes en la revisión de los proyectos de cálculo estructural. A la luz de los datos analizados se observa un importante aumento de la rigidez de los edificios que cumplen con esta ley y pequeñas variaciones en la densidad de muros y dnp.

Por otro lado, la metodología de Inspección Visual Rápida aplicada en este estudio indica que, un 58% de los edificios de la muestra final presentan un desempeño sísmico aceptable.

Es importante destacar que este estudio no es necesariamente representativo dado lo limitado del alcance en términos de la cantidad de parámetros analizados, el tamaño y conformación de la muestra y disponibilidad de la información en las oficinas consultadas. Esta limitación responde principalmente al cumplimiento de los tiempos estipulados para el desarrollo del trabajo de título. En el caso de la Inspección Visual Rápida, la discusión de la validez del método indica que no entrega resultados concluyentes respecto del desempeño de las estructuras frente a eventos sísmicos, puesto que no es directamente aplicable a la realidad chilena e introduce cierta subjetividad al depender del juicio de la persona que aplica el método.

Como trabajo futuro se propone:

- La extensión de la muestra de edificios a analizar, tanto en número como en cobertura geográfica, de manera de obtener resultados que representen de manera más significativa la realidad chilena.
- La evaluación de otras características estructurales que tengan una relación más directa con daños observados, perfil Bío-Sísmico e índices de vulnerabilidad sísmica tales como líneas resistentes, configuración en altura, configuración en planta, entre otros.
- Evaluación de características no estructurales y que puedan responder a cambios en las tendencias arquitectónicas.
- Adaptación de la metodología de inspección visual rápida de acuerdo a las características estructurales de los edificios chilenos, a las características sísmicas y del suelo de Chile y a estimaciones de factor de daño realizadas por expertos chilenos. Para estas estimaciones se propone la conformación de un conjunto de expertos que reúna representantes tales como:
 - Cámara Chilena de la Construcción
 - Ministerio de Obras Públicas
 - Ministerio de Vivienda y Urbanismo
 - Colegio de Ingenieros
 - Universidades
 - Profesionales geofísicos y geólogos
 - Empresas constructoras
 - Expertos internacionales

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

1. Guzmán M., “Caracterización de Tipologías Estructurales usadas en el diseño de edificios altos en Chile”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, 1998.
2. Gómez C., “Caracterización de Sistemas estructurales usados en las viviendas de hormigón armado y albañilería reforzada en Chile”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, 2001.
3. Instituto Nacional de Normalización, “Diseño sísmico de edificios”, Norma Nch 433 Of.96, 1996.
4. Instituto Nacional de Normalización, “Diseño estructural de edificios - Cargas permanentes y sobrecargas de uso”, Norma Nch 1537 Of.86, 1986.
5. Guendelman, T., Lindenberg, J., Guendelman, M., “Perfil Bio-Sísmico de edificios”, Proc. Séptimas jornadas chilenas de sismología e ingeniería antisísmica, 1997.
6. Wood, S. L., “Performance of reinforced concrete buildings during the 1985 Chile Earthquake: Implications for the design of structural walls”, Earthquake Spectra, EERI, Vol. 7, N° 4, Noviembre 1991.
7. Lagos R., “Proyecto de Hormigón Armado”, apuntes para el curso CI52G de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2005.
8. FEMA 154, “Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards”, Edition 2, Julio 2005.
9. FEMA 155, “Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards”, Septiembre 1988.
10. Council on tall buildings and habitat, “Structural systems for tall buildings”, 1995.

11. Flores R., “Ingeniería Sísmica en Chile”, Conferencia del profesor acerca de la ingeniería sísmica presentada en la Academia de Ciencias, Agosto 1999.
12. Riddell R., Wood S., De la Llera J.C., “The 1985 Chile Earthquake, Structural Characteristics and Damage Statistics for the Building Inventory in Viña del Mar”, 1987.
13. Cáceres G., “Determinación de un índice cualitativo de vulnerabilidad sísmica de edificios de hormigón armado en Concepción”, 2005.
14. Giuliano, M., Aranda, P. (2002). “Índice Cualitativo de Vulnerabilidad Sísmica Aplicado a Edificios en Concepción”, Octavas jornadas chilenas de sismología e ingeniería antisísmica, 2002.
15. Ríos H., Music J., Vladilo I., “Perfil Bio-Sísmico de Edificios Representativos de la Construcción en Altura de la Ciudad de Antofagasta”, 2005.

ANEXOS

ANEXO 1, PLANO REGULADOR DE ÑUÑO A

ANEXO 2, FICHAS TIPO
