

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL  
AGRIETAMIENTO EN LA RESPUESTA SÍSMICA DE  
ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO**

**TERCER INFORME**



**ING. JUAN ALEJANDRO MUÑOZ PELÁEZ  
GERENTE DE PROYECTOS  
PRISMA INGENIEROS SAC**

**Miraflores, 18 de setiembre del 2015**

# **ESTUDIO DE INFLUENCIA DEL AGRIETAMIENTO EN LA RESPUESTA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO**

## **TERCER INFORME**

### **1. Objetivos y organización del tercer informe**

El objetivo de este documento es informar a SENCICO de los resultados del “Estudio de la Influencia del Agrietamiento en la Respuesta Sísmica de Estructuras de Concreto Armado”.

En este informe se presentan los siguientes puntos:

- Estudio de casos para los factores de reducción de rigidez en secciones de concreto armado de edificios peruanos.
- Análisis de la influencia del agrietamiento en los principales parámetros de la respuesta sísmica.
- Propuesta para la actualización de la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente.

### **2. Organización del tercer informe**

Este documento se ha organizado en las siguientes secciones:

- Consideraciones para el análisis sísmico de los edificios.
- Casos Estudiados
- Parámetros de la respuesta Sísmica empleados.
- Resultados del análisis
- Influencia del Agrietamiento en los parámetros de estudio.
- Recomendaciones para la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente.

### **3. Consideraciones para el Análisis Sísmico de los Edificios.**

#### **3.1. Análisis Sísmico Efectuado**

El análisis sísmico se desarrolló siguiendo la Norma Peruana de Edificaciones E.030 en etapa de promulgación. Esta versión de la Norma que en adelante se denomina E-030-2015, ya pasó la etapa de discusión pública y se espera en breve su promulgación.

Se empleó el procedimiento de Análisis Dinámico Modal Espectral con las precisiones establecidas en el acápite 4.6 de la NTE.030-2015.

### 3.2. Inclusión del Agrietamiento en los Modelos de los Edificios

El estudio del nivel de agrietamiento en edificios peruanos (Segundo Informe), mostró que el índice de agrietamiento, “*la*” (cocientes entre las Inercias de la sección agrietada y de la sección bruta) tiene los siguientes valores:

**Tabla 1. Índice de agrietamiento, *la*, para edificios peruanos**

Elemento	Rango de valores para “ <i>la</i> ”		Valor Medio de “ <i>la</i> ”	
	Niveles 1ero a Penúltimo	Azotea	Niveles 1ero a Penúltimo	Azotea
Vigas	1 a 0.41	1 a 0.25	0.62	0.55
Columnas	1 a 1	1 a 0.52	1	0.97
Muros	1 a 1	1 a 1	1	1

Para el estudio de casos se han elegido valores discretos del Índice de Agrietamiento en función de los rangos de valores encontrados para los edificios peruanos. Los valores sugeridos por el American Concrete Institute en el documento ACI-318-2014 se han incluido también en la lista de valores discretos que se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2. Valores del Índice de agrietamiento empleados en el análisis de los edificios.**

Elemento	Valores para “ <i>la</i> ”			
Vigas	1	0.9	0.6	0.35
Columnas	1	0.9	0.8	0.7
Muros	1	0.9	0.8	0.7

## 4. Casos Estudiados

Con los valores puntuales para el índice de agrietamiento indicado en la Tabla 2, se generaron 4 modelos computacionales por cada uno de los 10 edificios empleados. En total se resolvieron 40 edificios. El análisis se hizo para cada dirección independientemente; en total se desarrollaron 80 casos de análisis dinámico.

## 5. Parámetros de la Respuesta Sísmica empleados

Para cuantificar la influencia del agrietamiento en la respuesta sísmica de los edificios se emplearon los parámetros que se indican en la tabla 3.

**Tabla 3. Parámetros estudiados en la Respuesta Sísmica de los edificios.**

Parámetro estudiado		Símbolo	
		Caso con Agrietamiento	Caso sin Agrietamiento
P1	Periodo Fundamental	$T_f$	$T_0$
P2	Desplazamiento de la azotea	$D_{az}$	$D_{az 0}$
P3	Distorsión (deriva) de entrepiso máxima: Desplazamiento de entrepiso entre la altura de entrepiso	$\gamma$	$\gamma_0$
P4	Índice de Giro: deriva en un extremo de la planta entre deriva en el centro de masas.	$lg$	$l_0$
P5	Fuerza Cortante en la base	$V$	$V_0$
P6	Separación al límite de propiedad	$S_{lp}$	$S_{lp 0}$

## 6. Resultados del análisis

Para cada uno de los 40 edificios analizados, se obtuvieron los valores de los parámetros indicados en la tabla 3 en cada dirección de análisis. En total se obtuvieron 80 valores para cada parámetro de estudio.

La figura 1 muestra el desplazamiento de la azotea en cada dirección en función del periodo fundamental sin agrietar ( $T_0$ ). Cada juego de puntos corresponde a una dirección de análisis de cada edificio.

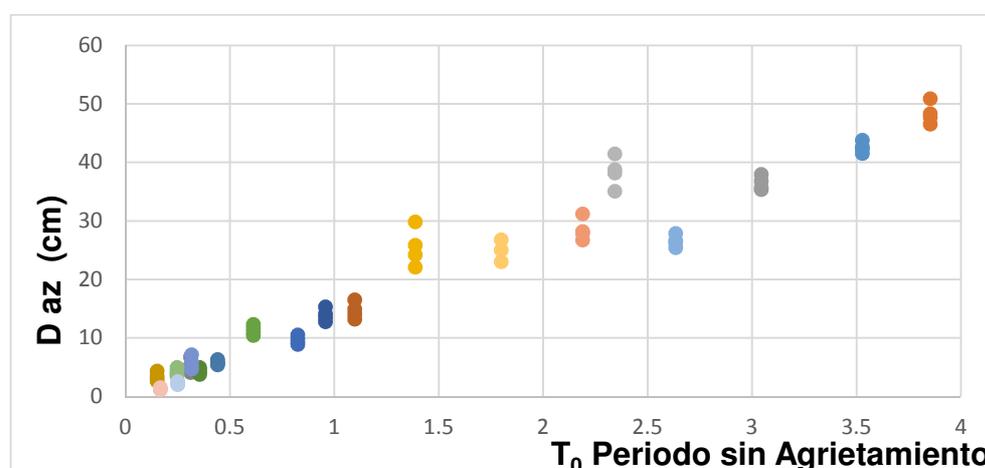


Figura 1. Influencia del Agrietamiento en el Desplazamiento de la azotea

Los valores de los periodos fundamentales en ambas direcciones se muestran en la Figura 2 también en función de los periodos fundamentales de los edificios sin agrietar.

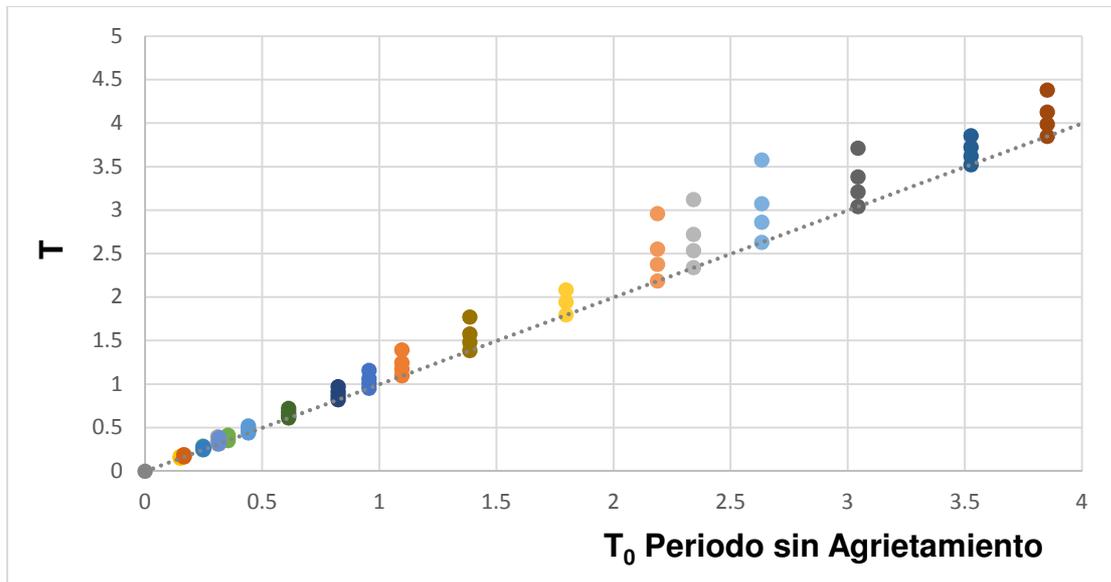


Figura 2. Influencia del Agrietamiento en el periodo fundamental.

La información correspondiente a los demás parámetros se presenta en el Anexo 1.

## 7. Influencia del Agrietamiento en los parámetros de estudio.

Para estimar la influencia del agrietamiento en los parámetros de estudio se compararon los resultados de los casos con agrietamiento respecto a los resultados de los edificios sin agrietar. La comparación se hizo empleando cocientes de los parámetros de respuesta.

Los índices de agrietamiento (“I<sub>a</sub>”) para los elementos componentes se agruparon formando Niveles de Agrietamiento, los mismos que se definen por el juego de valores de “I<sub>a</sub>” correspondientes a vigas, columnas y muros. La tabla 4 detalla los 4 Niveles de agrietamiento empleados en el estudio.

**Tabla 4. Niveles e índices de Agrietamiento empleados en el estudio.**

Elemento	Niveles de Agrietamiento			
	N-1	N-2	N-3	N-4
Vigas	1	0.9	0.6	0.35
Columnas	1	0.9	0.8	0.7
Muros	1	0.9	0.8	0.7

El primer nivel de agrietamiento, N-1, corresponde a la estructura con secciones brutas. El último nivel, N-4 corresponde a los valores de agrietamiento sugeridos por el ACI y la Norma Peruana de Diseño en Concreto Armado. El nivel N-3 podría tomarse como el representativo de los edificios peruanos.

### 7.1. Influencia del Agrietamiento en el Periodo Fundamental

La figura 3 muestra la variación del Periodo Fundamental ( $T_f / T_0$ ) para los 4 niveles de agrietamiento considerados en función de  $T_0$ .

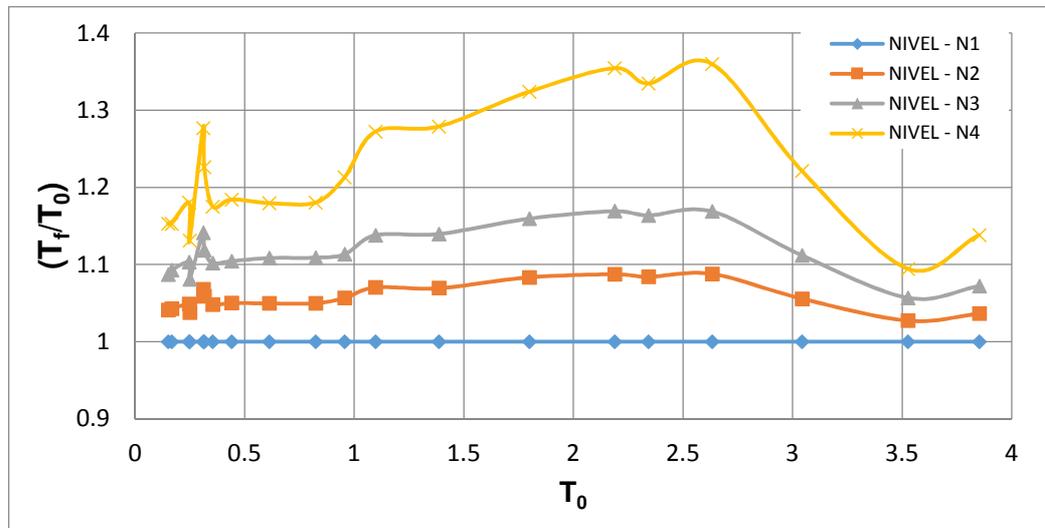


Figura 3. Agrietamiento y Periodo Fundamental

Los resultados muestran que los periodos de los modelos agrietados de Nivel N-4 son entre 1.1 y 1.35 veces los periodos de los modelo sin agrietar. Sin embargo para el nivel N-3, representativo de los edificios peruanos, los periodos de los modelos agrietados serían sólo 1.08 a 1.17 veces los valores de los modelos sin agrietar.

Una explicación a estos resultados se puede obtener empleando modelos sencillos de un grado de libertad. Para dos modelos de un grado de

libertad con igual masa, el cociente de sus periodos ( $T_f/T_0$ ) se relaciona con el cociente de sus rigideces ( $K_f / K_0$ ) mediante la expresión :

$$\frac{T_f}{T_0} = \sqrt{\frac{K_0}{K_f}}$$

Considerando que la reducción de rigidez solo se produce por flexión, el cociente de rigideces se puede aproximar por el cociente de las Inercias bruta y agrietada ("I<sub>a</sub>") como:

$$\frac{K_0}{K_f} = \frac{1}{I_a}$$

Por tanto el cociente de periodos sería:

$$\frac{T_f}{T_0} = \sqrt{\frac{1}{I_a}}$$

Si consideramos como índice general de agrietamiento para los niveles N-3 y N-4 los valores de 0.55 y 0.7 (promedio simple de vigas y elementos verticales), obtenemos para el cocientes  $T_f/T_0$  los valores de 1.35 y 1.2. Estos valores son muy aproximados a los límites superiores de variación encontrados en la muestra de edificios estudiada (1.35 y 1.17)

En general los valores encontrados para los cocientes  $T_f/T_0$  en los modelos estudiados, son ligeramente menores a los obtenidos por los modelos de flexión pura de 1gdl, debido a que la rigidez a cortante y fuerza normal no se consideran reducidas por el agrietamiento.

## 7.2. Influencia del Agrietamiento en los Desplazamientos

Las figuras 4 y 5 muestran la variación del desplazamiento de la azotea y de la deriva máxima con el agrietamiento.

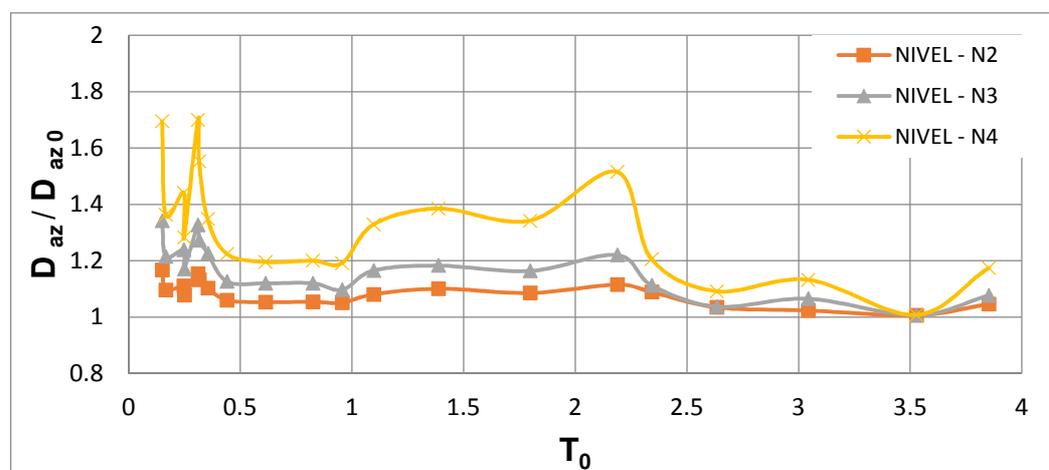


Figura 4. Influencia del Agrietamiento en el Desplazamiento de la Azotea.

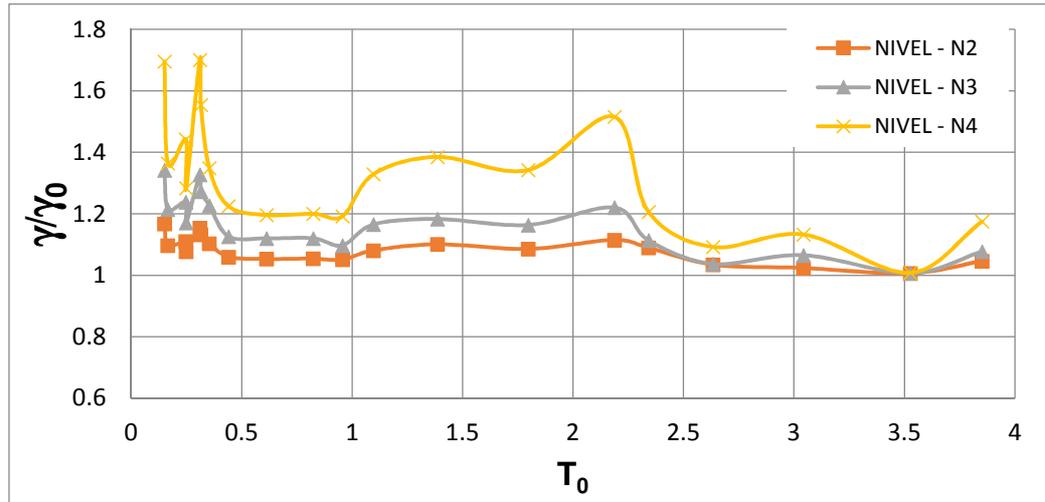


Figura 5. Influencia del Agrietamiento en la Deriva.

Se observa que para cada edificio estudiado, el incremento en la deriva tiene el mismo valor que el incremento en el desplazamiento de la azotea, (en las figuras 4 y 5, las curvas correspondientes al mismo nivel de agrietamiento son iguales). Esto se debe a que cuando se reduce la rigidez a flexión por agrietamiento, las formas modales se conservan prácticamente iguales y por tanto los desplazamientos y derivas crecen en igual proporción. En lo que sigue de este acápite el desplazamiento de la azotea y la deriva se refieren como “los desplazamientos”.

Los resultados muestran que los desplazamientos de los modelos agrietados de Nivel N-4 y N-3 alcanzan a ser hasta 1.7 y 1.3 veces los desplazamientos de los modelo sin agrietar, respectivamente.

Las curvas de las figuras 5 y 6 muestran tres regiones más o menos definidas. La región de periodos cortos con  $T < 0.4$  seg. corresponde a los mayores incrementos de desplazamientos (de hasta 1.7 veces). Una zona intermedia donde los desplazamientos se incrementan por valores cercanos a 1.4 y la zona de periodos mayores a 2.5 seg. donde los desplazamientos prácticamente ya no se incrementan con el agrietamiento.

Esta tendencia en el incremento de desplazamientos se explica por la forma del espectro elásticos de desplazamientos ( $S_d$ ), correspondiente al espectro de aceleración de la Norma Peruana NTE-030-2015. A manera de ejemplo, la figura 6 muestra el espectro de desplazamientos correspondiente a la zona 4 y perfil de suelo S1 de la NTE-030-2015.

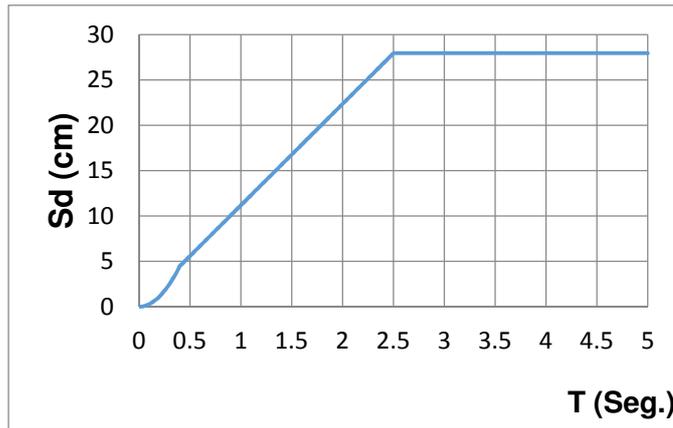


Figura 6.  
Espectro Elástico de  
Desplazamientos de  
la Norma Peruana  
NTE-030-2015,  
Zona 4, Suelo S1.

En la zona de periodos cortos ( $T < 0.4$  seg.) el desplazamiento espectral crece con el cuadrado del periodo y por tanto el incremento del periodo produce los mayores incrementos en los desplazamientos. Para la zona de periodos intermedios, el desplazamiento espectral es una función lineal del periodo y por tanto el crecimiento en el periodo produce valores menores de crecimiento en los desplazamientos. Para la zona de periodos largos del espectro ( $T > 2.5$  seg), los desplazamientos espectrales se hacen constantes y por tanto el incremento en el periodo ya no produce incremento en los desplazamientos de los modelos estudiados.

### 7.3. Influencia del Agrietamiento en el Índice de Giro

La figura 7 muestra la variación del Índice de Giro con el agrietamiento.

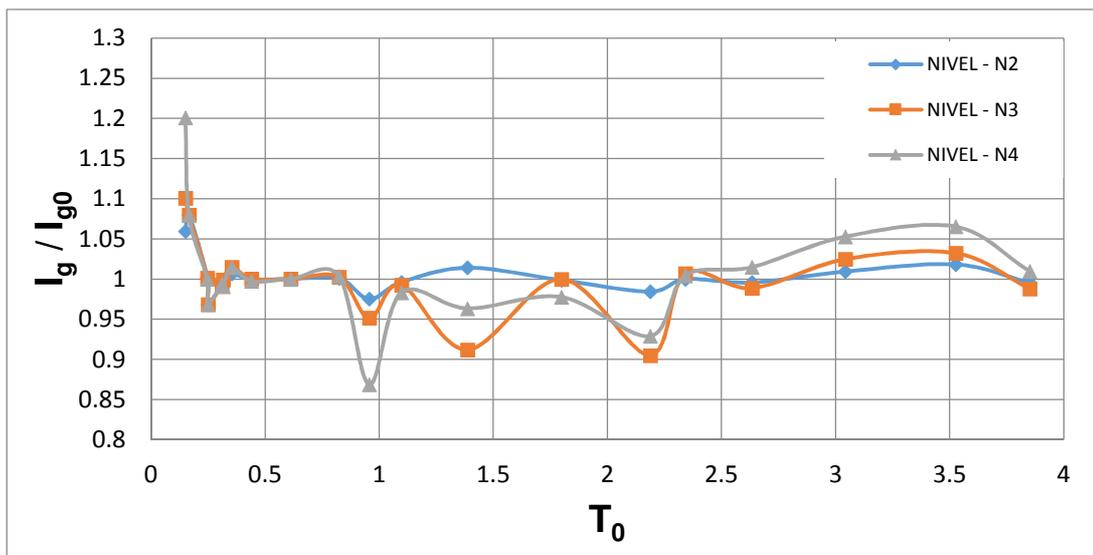


Figura 7. Agrietamiento e Índice de giro.

Se observa que el índice de giro de los modelos agrietados está entre el 0.9 y el 1.2 de los modelos sin agrietar. En particular para el Nivel de Agrietamiento N-3 los resultados van entre el 0.9 y 1.1. Esta diferencia es significativamente menor que la obtenida para los desplazamientos de la azotea y las derivas de entrepiso.

La reducida variación en el índice de giro se debe a que cuando se reduce la rigidez a flexión por agrietamiento, las formas modales se conservan prácticamente iguales y por tanto los índices de giro prácticamente se mantienen.

#### 7.4. Influencia del Agrietamiento en las Fuerzas Internas

Para estudiar la influencia del agrietamiento en las fuerzas internas se usó como parámetro representativo, la fuerza cortante en la base del edificio. La figura 7 muestra la variación del cortante en la base para los niveles de agrietamiento N-4, N-3 y N-2 respecto de N-1.

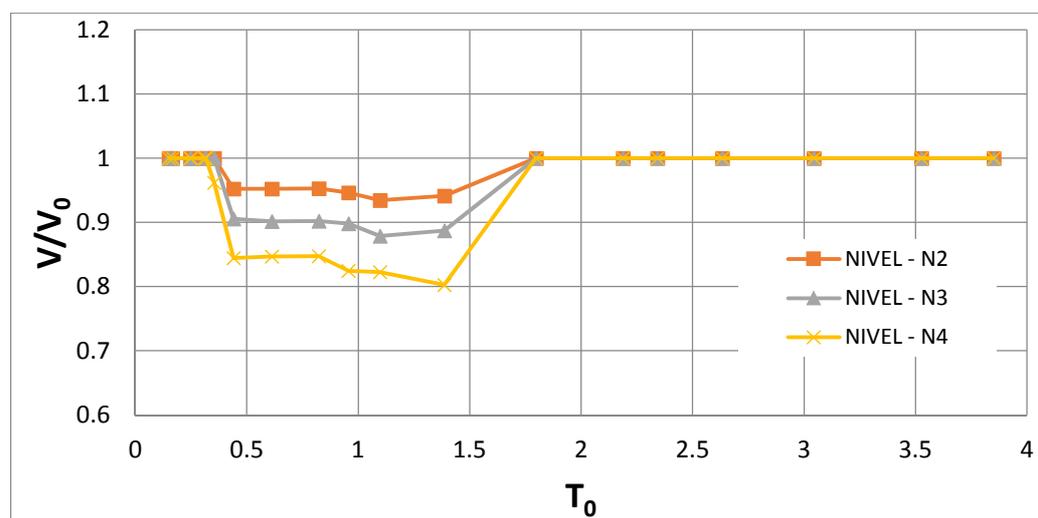


Figura 7. Agrietamiento y Fuerza Cortante en la base.

Se observa que para periodos cortos ( $T < 0.4$  seg) y para periodos mayores que 1.7 seg. la fuerza cortante no se modifica con el agrietamiento. Para periodos entre 0.4 y 1.4 seg. la fuerza cortante de diseño se reduce significativamente y el cociente respecto a la fuerza cortante de los modelos sin agrietar alcanza valores de hasta el 0.90 y 0.80 para los Niveles de agrietamiento N-3 y N-4 respectivamente.

Esta tendencia en la variación del cortante se explica observando el espectro de aceleraciones mostrado en la figura 8, junto a dos rectas que corresponden al valor mínimo de  $C/R$  ( $C/R \text{ min} = 0.125$ ) para valores de  $R = 6$  y  $R = 4.5$ .

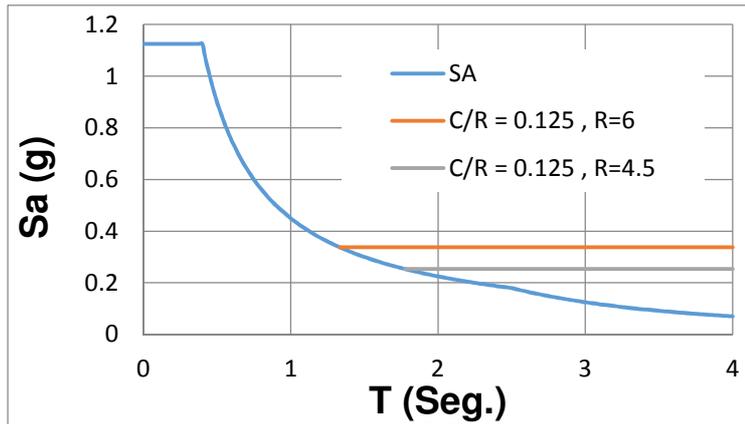


Figura 8.  
Espectro de  
Aceleraciones de la  
Norma Peruana  
NTE-030-2015, Zona 4,  
Suelo S1

El espectro de aceleraciones se hace constante para periodos menores a 0.4 seg. y para periodos mayores a 1.6 seg. la aceleración para definir la fuerza cortante de diseño también se hace constante. Por tanto en estos dos rangos de periodos el incremento de periodo ya no influye en la fuerza cortante de diseño. En cambio en la zona central del espectro, entre 0.4 y 1.4 seg. un incremento de periodo ocasiona una reducción de la fuerza cortante.

### 7.5. Influencia del Agrietamiento en la junta de separación sísmica.

La figura 9 muestra la junta de separación del edificio al límite de propiedad, calculada como los 2/3 del desplazamiento de la azotea junto al valor mínimo establecido por la NT-030-2015 en su artículo 5.3:  $S/2 = \frac{1}{2} (0.006 \times \text{altura total del edificio})$

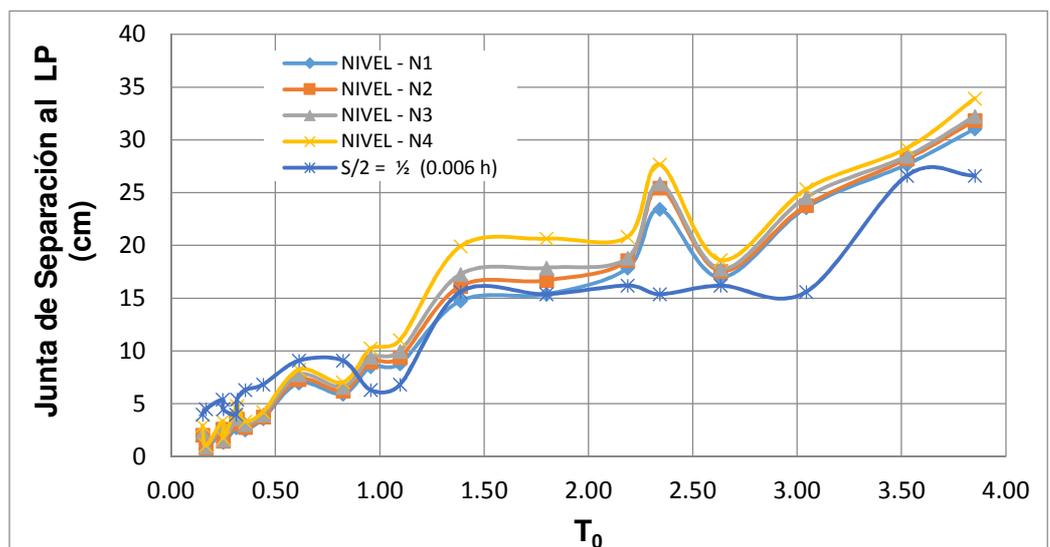
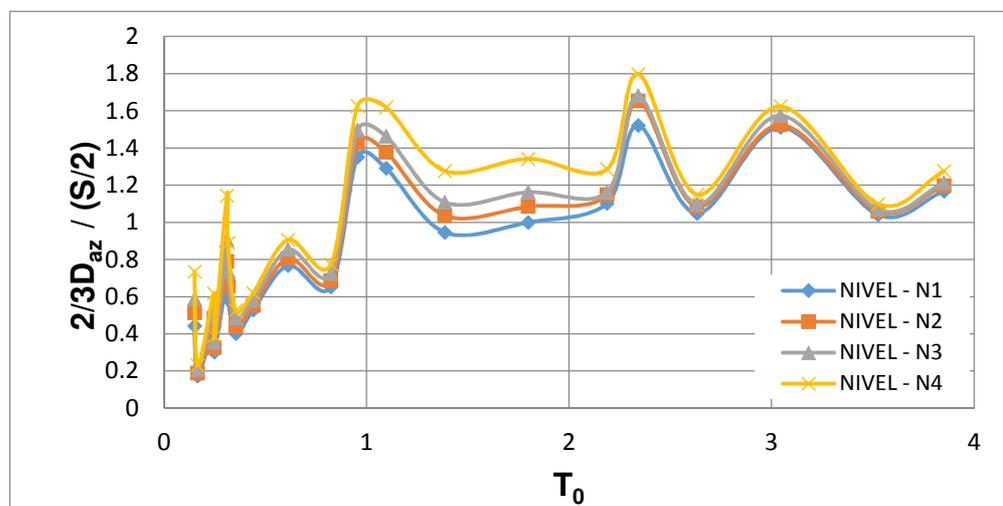


Figura 9. Agrietamiento y Junta de Separación Sísmica.

Se observa que para los 4 niveles de agrietamiento la junta calculada en base a desplazamientos sería prácticamente la misma para estructuras de 2.5 seg. en adelante (las 4 curvas están muy cercanas en esta zona). En base a los resultados del acápite 7.2, se puede decir que para el Nivel máximo de agrietamiento considerado, N-4, en la zona de periodos intermedios los valores de la junta se incrementarían por 1.4. y para el nivel de agrietamiento N-3, representativo de los edificios peruanos, los valores se incrementarían por 1.2.

Se calcularon también los cocientes entre el valor de la junta de separación obtenida como los 2/3 del desplazamiento de la azotea y el valor mínimo establecido por la NTE-030-2015 en su artículo 5.3. Estos cocientes se muestran en la figura 10.



La figura 10. Cocientes entre los 2/3 del Desplazamiento de Azotea y la separación mínima establecida por la NTE-030-2015.

Se observa que para las estructuras con periodos menores a 0.9 seg. la junta establecida en base al desplazamientos estructural está por debajo del mínimo requerido; sin embargo para periodos mayores a 1 seg. la junta calculada en base a desplazamientos alcanza valores de hasta 1.4 y 1.6 veces el mínimo para los niveles de agrietamiento N-1 y N-3.

## 8. Recomendaciones para la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente.

El agrietamiento influye tanto en los desplazamientos de respuesta como en la fuerza cortante de diseño de los edificios. A continuación se resumen los principales resultados para el nivel de agrietamiento representativo de los edificios peruanos, N-3.

### 8.1. **Influencia del Agrietamiento en los desplazamientos y fuerzas de los edificios peruanos.**

Los resultados de este estudio muestran que para el nivel de agrietamiento N-3 los parámetros estudiados tendrían la siguiente variación respecto a los modelos sin agrietamiento.

- Los periodos crecerían en el orden de 1.1 a 1.2 veces.
- Los desplazamientos de la azotea y la deriva de entrepiso, crecerían en el orden de 1.2 y 1.3 para periodos intermedios y cortos respectivamente.
- Para periodos largos ( $T > 2.5$  seg.) los desplazamientos (azotea y derivas) ya no cambiarían.
- El índice de giro tendría variaciones entre 0.9 y 1.1.
- Para estructuras con periodo fundamental entre 0.4 y 1.4 seg. la fuerza cortante en la base se reduciría por el factor 0.9. Para estructuras fuera de esta región de periodos no se producirían reducciones de las fuerzas de diseño.
- La junta de separación al límite de propiedad en estructuras de periodo corto ( $T < 0.4$  seg.) estaría gobernada por el valor mínimo establecido por la Norma y por tanto el agrietamiento no influiría en su valor final.
- La junta de separación al límite de propiedad crecería en el orden de 1.15 para estructuras en la zona de periodos intermedios y se mantendría prácticamente igual para la zona de periodos largos.

### 8.2. **Sugerencias para versiones futuras de la NTE-030.**

No parece apropiado incluir el agrietamiento en el análisis sísmico de edificios peruanos ya que por un lado se reduciría la fuerza cortante de diseño y por otro se tendría que redefinir el límite de deriva, para tener las mismas exigencias de rigidez que la NTE-030-2015. Como se sabe las Normas Peruanas de 1997 en adelante, conducen a edificios que ha mostrado buen desempeño en los últimos terremotos importantes.

- ***Por tanto se sugiere no incluir el agrietamiento en los modelos de análisis, tal como lo establecen la mayoría de códigos de diseño sismorresistente en el mundo y tal como lo indica la NTE.030-2015.***

El incremento en los desplazamientos ocasionado por el nivel de agrietamiento representativo de los edificios peruanos si se debería tomar en cuenta para redefinir la junta de separación al límite de propiedad de los edificios de periodo intermedio, de 0.4 a 2.5 seg.

- ***Se sugiere por razones de simplicidad hacer una modificación única para todas las zonas de periodos incrementando de 2/3 a 3/4 el coeficiente empleado en el cálculo de la junta. Este cambio se sustenta en el incremento de 1.2 para los valores de desplazamiento:  $1.2 * 2/3 \approx 3/4$ . Se sugiere la siguiente modificación en el párrafo cuarto del acápite 5.3 de la NTE-030-2015***

***“El edificio se retirará de los límites de propiedad adyacentes a otros lotes edificables, o con edificaciones, distancias no menores que 3/4 del desplazamiento máximo calculado según el numeral 5.1 ni menores que s/2 si la edificación existente cuenta con una junta sísmica reglamentaria.***



---

Ing. Alejandro Muñoz Peláez

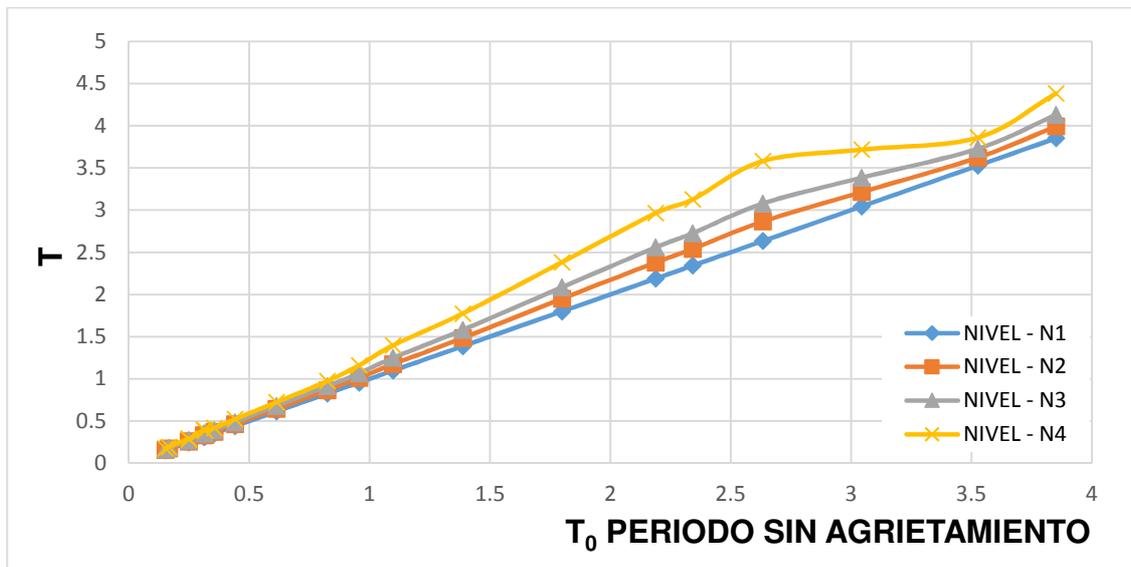
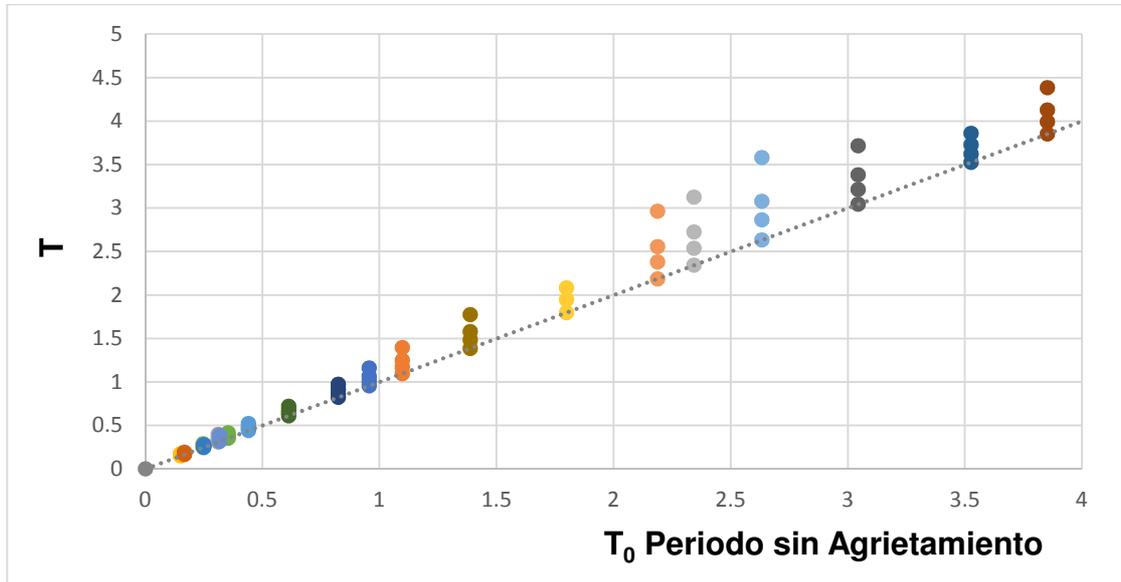
Gerente de Proyectos  
PRISMA INGENIEROS

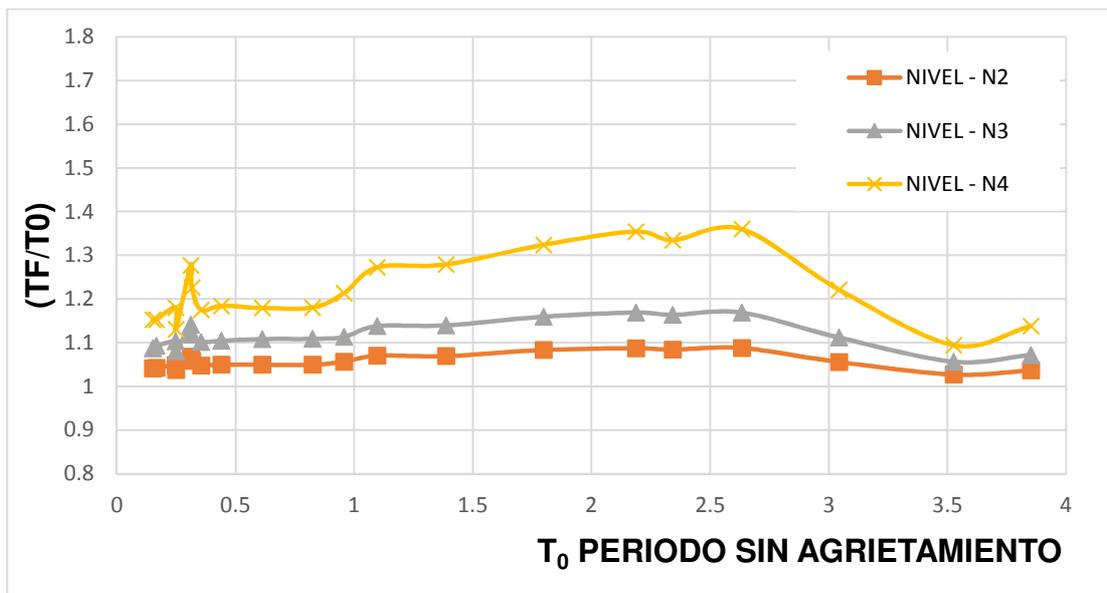
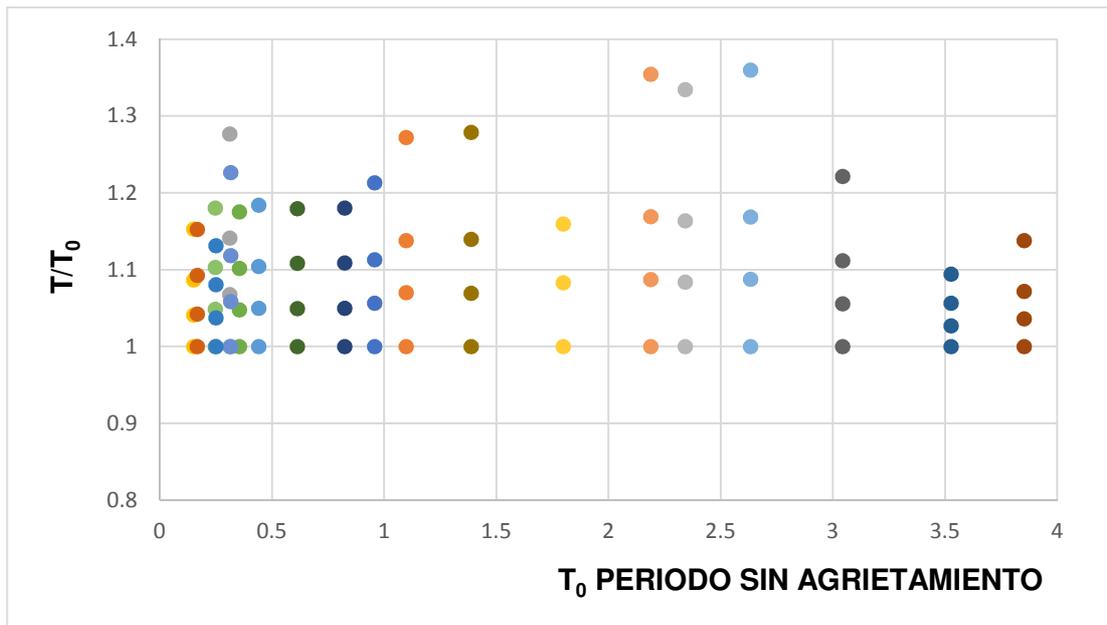
# **ANEXOS**

## **ANEXO 1**

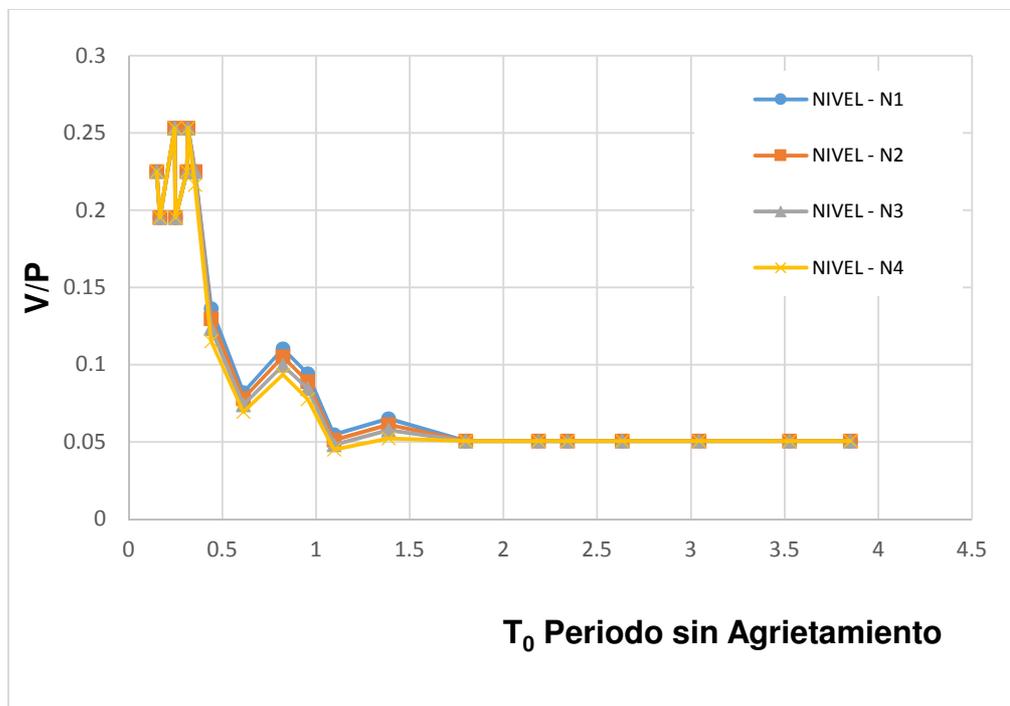
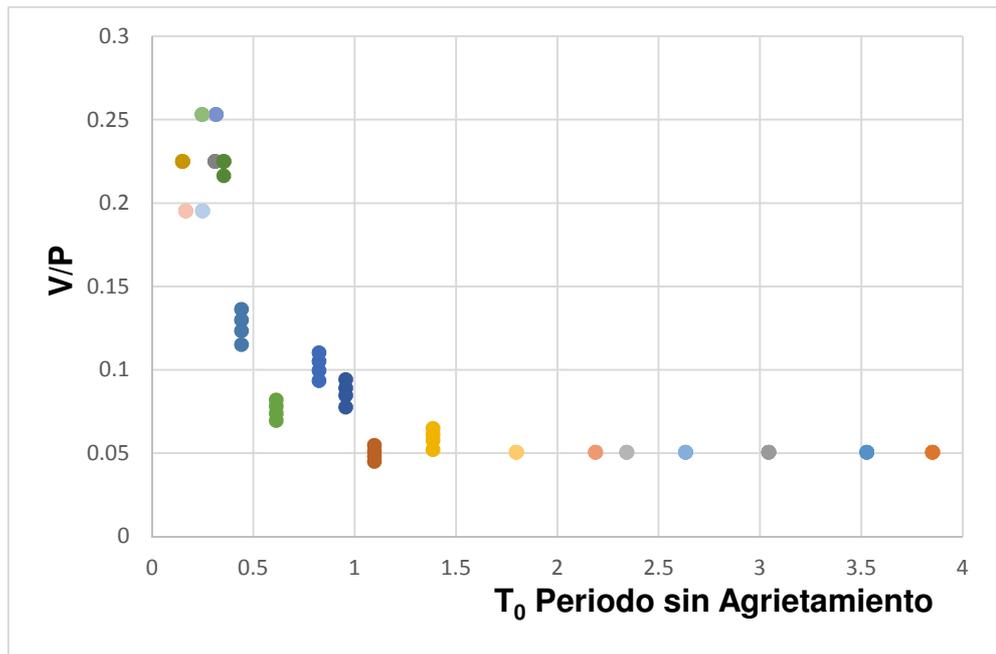
# **RESULTADOS DE LOS PARAMETROS EMPLEADOS PARA ESTUDIAR LA INFLUENCIA DEL AGRIETAMIENTO EN LA RESPUESTA SÍSMICA DE EDIFICIOS DE CONCRETO ARMADO**

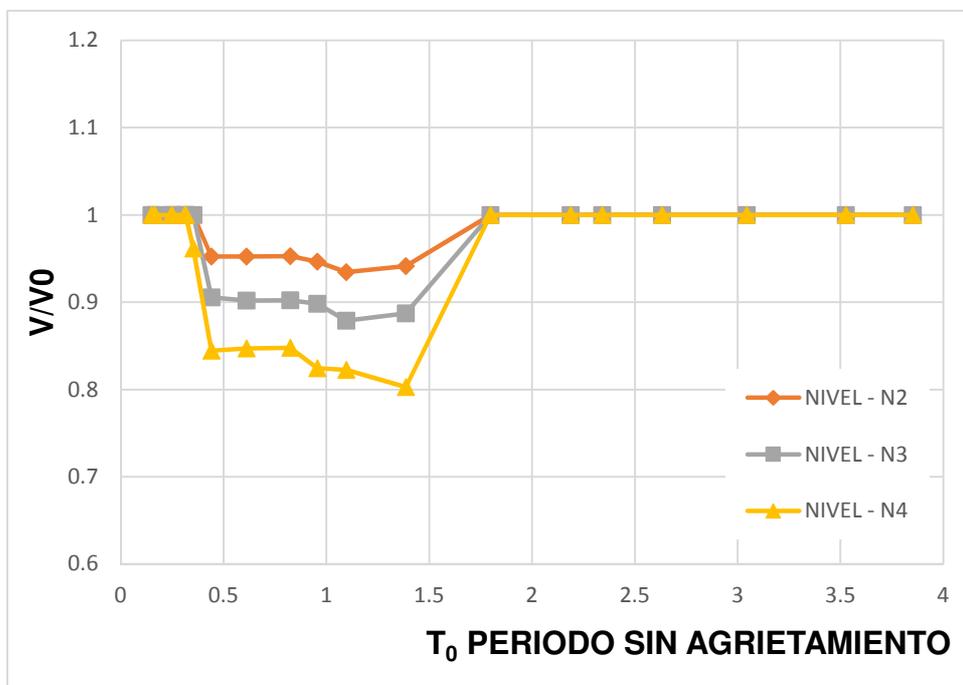
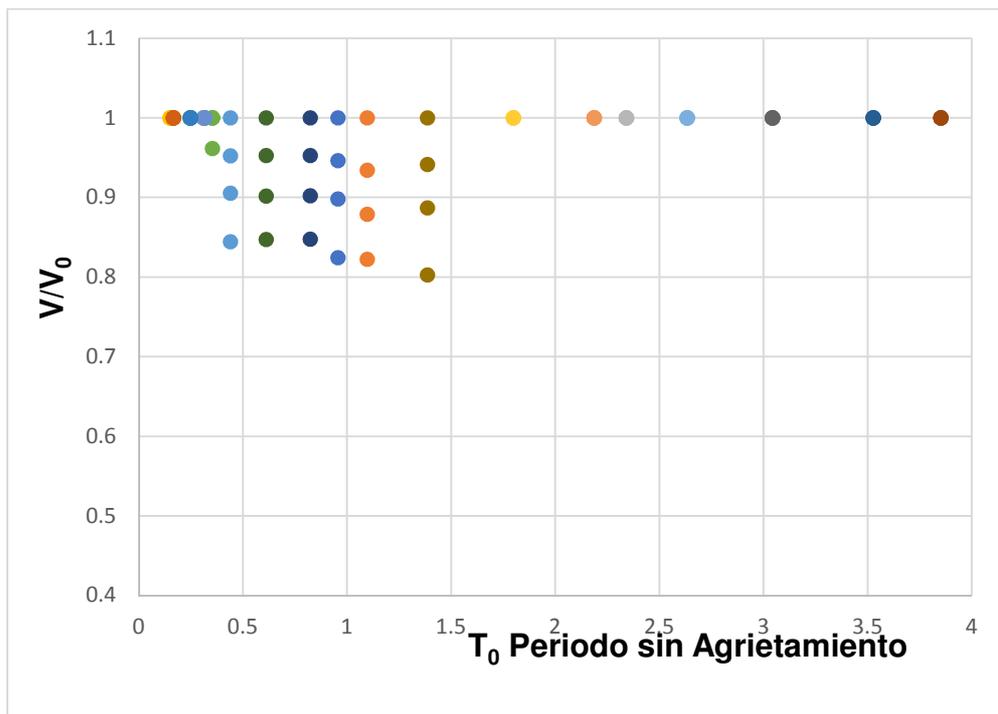
- Variación del periodo fundamental (T) según el nivel de agrietamiento.



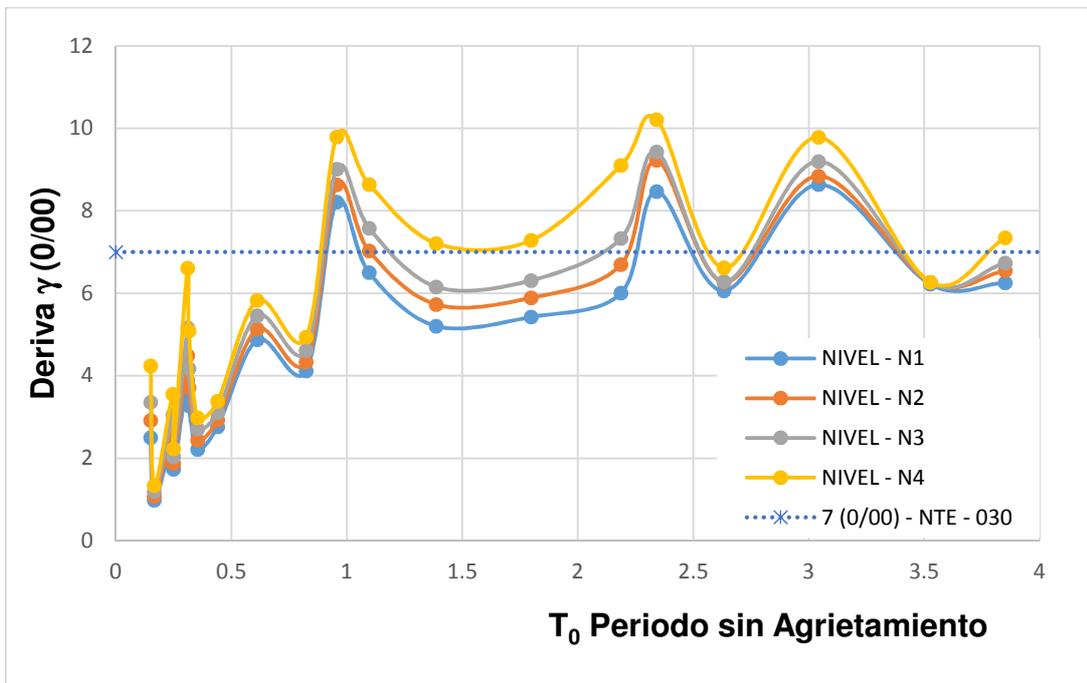
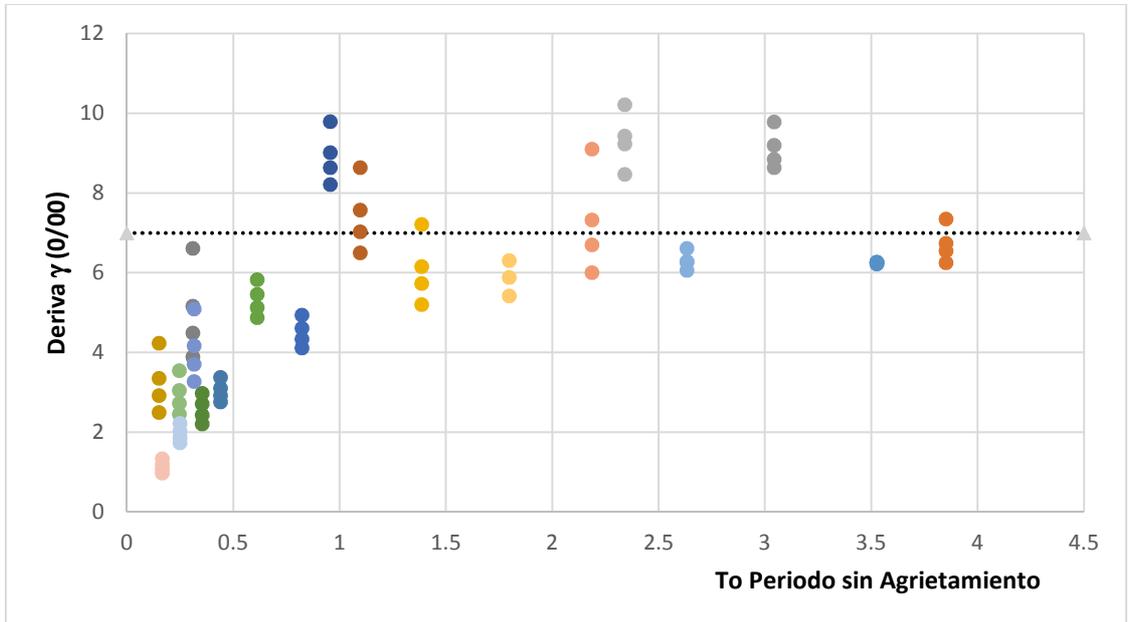


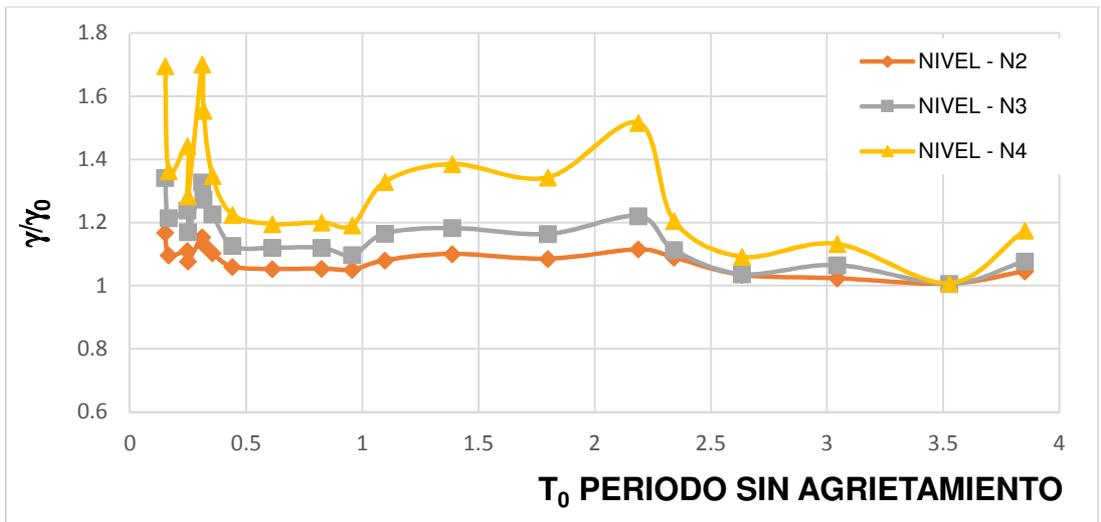
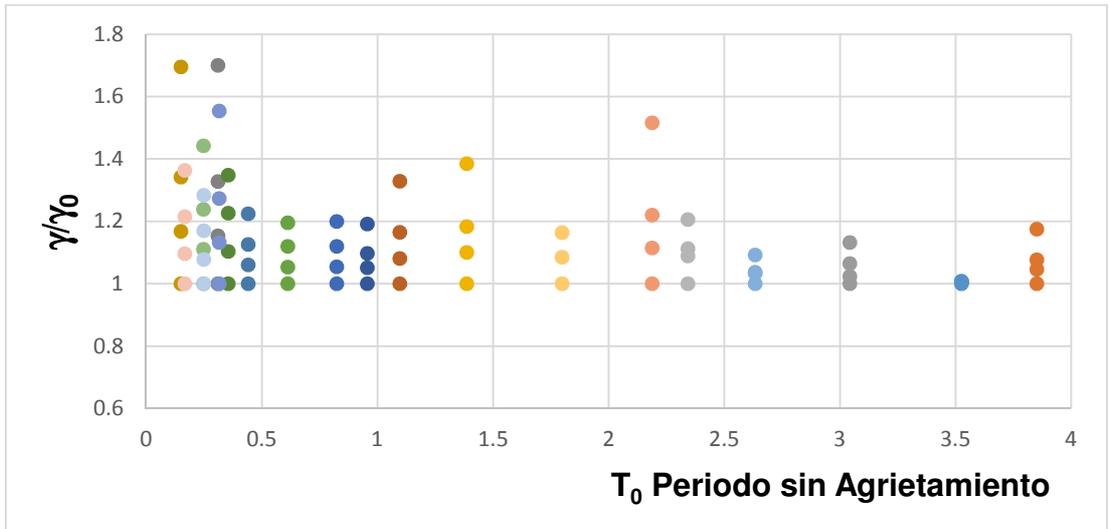
- Variación de la Fuerza Cortante según el nivel de agrietamiento.



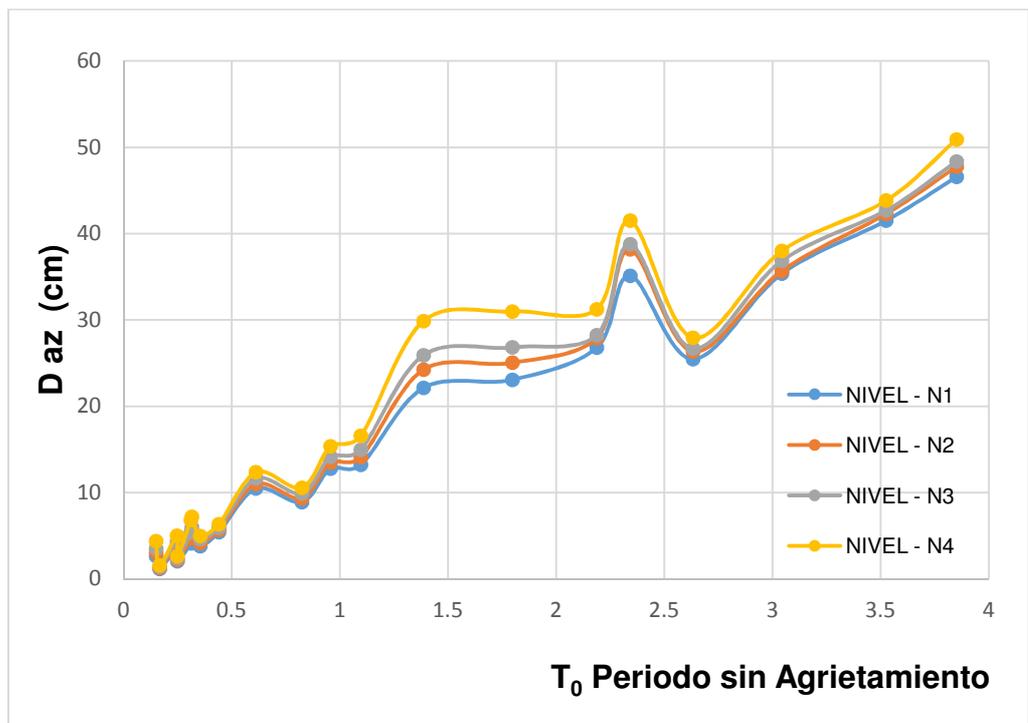
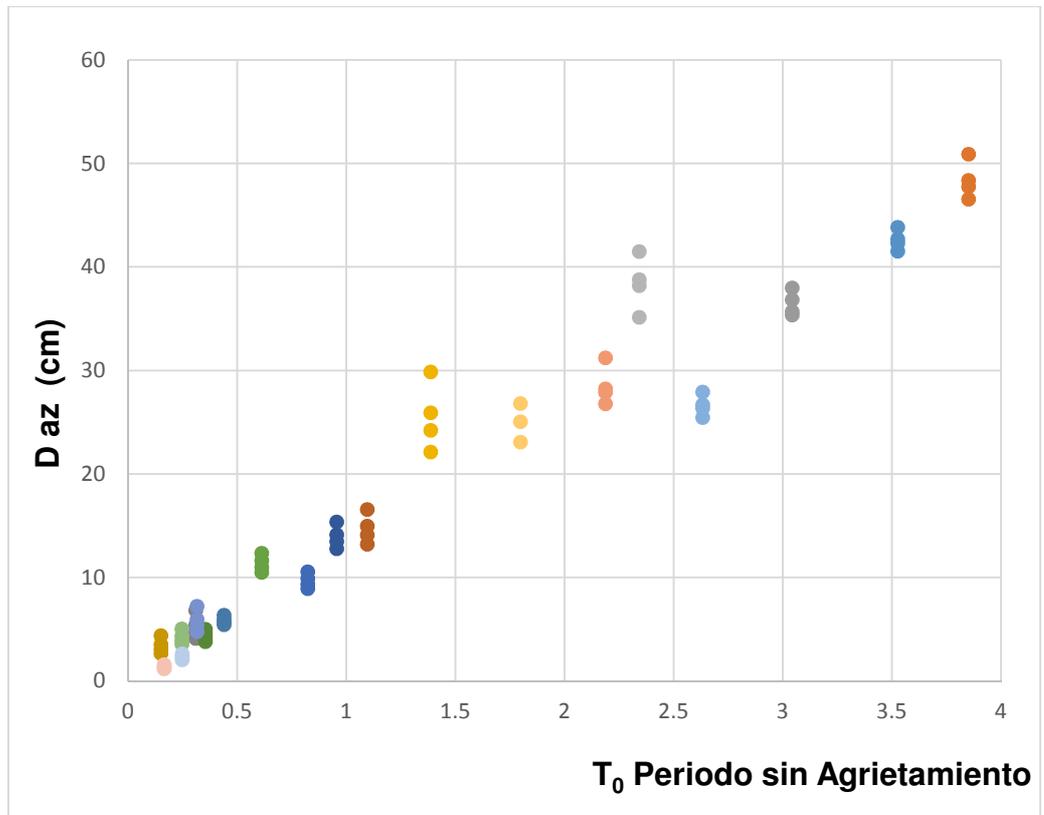


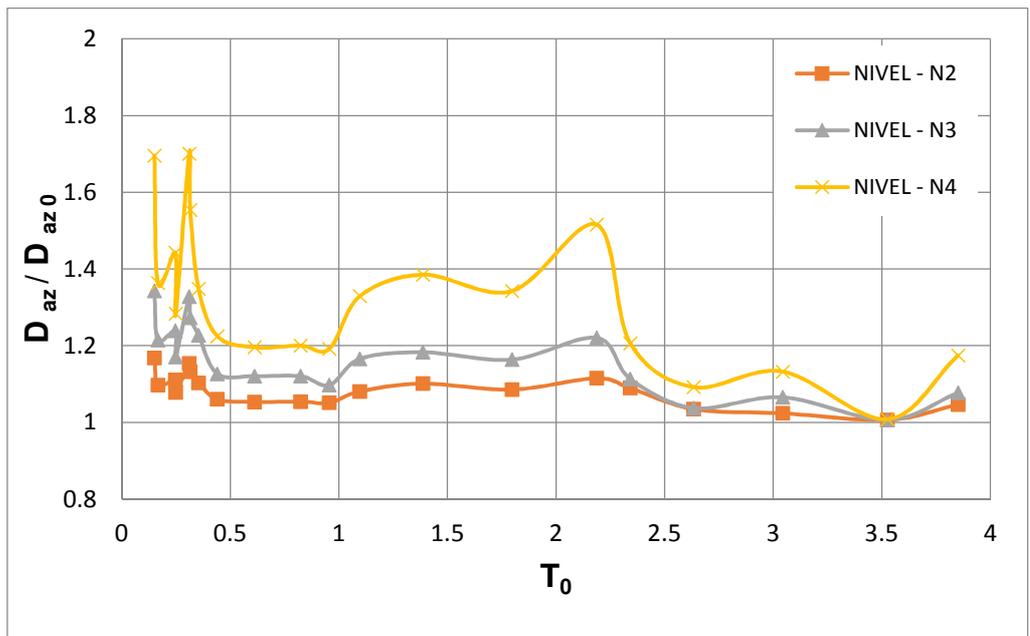
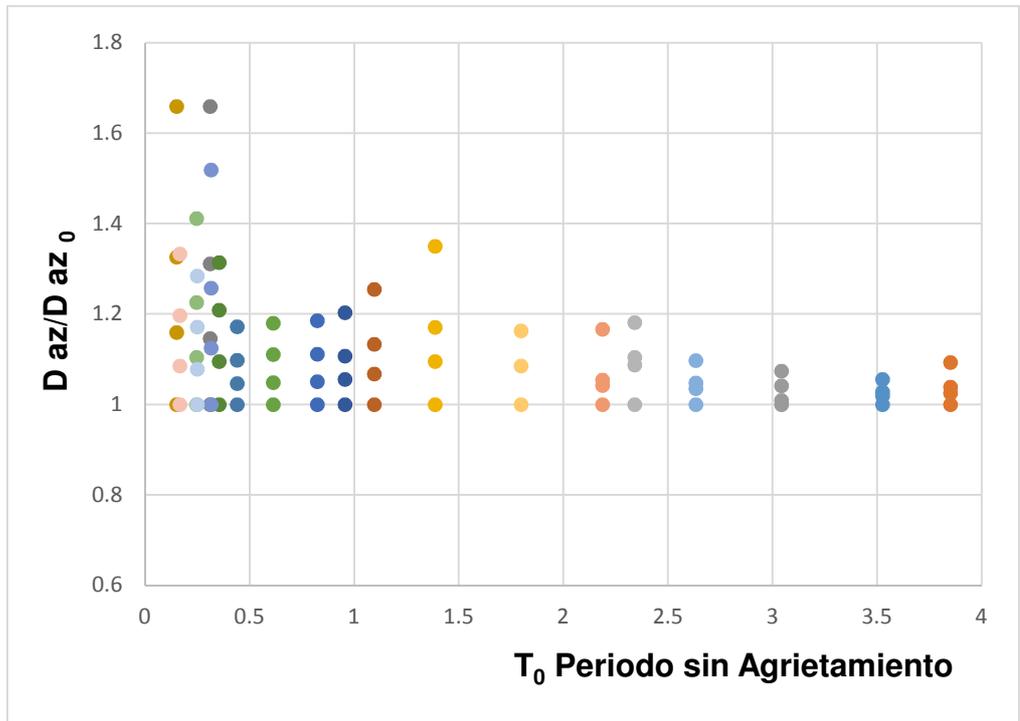
- Variación de la deriva ( $\gamma$ ) según el nivel de agrietamiento.



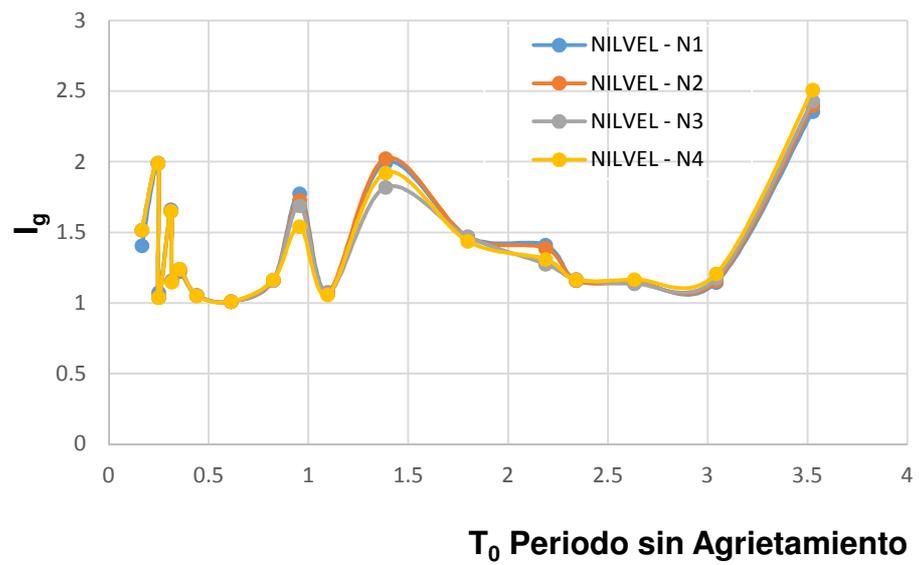
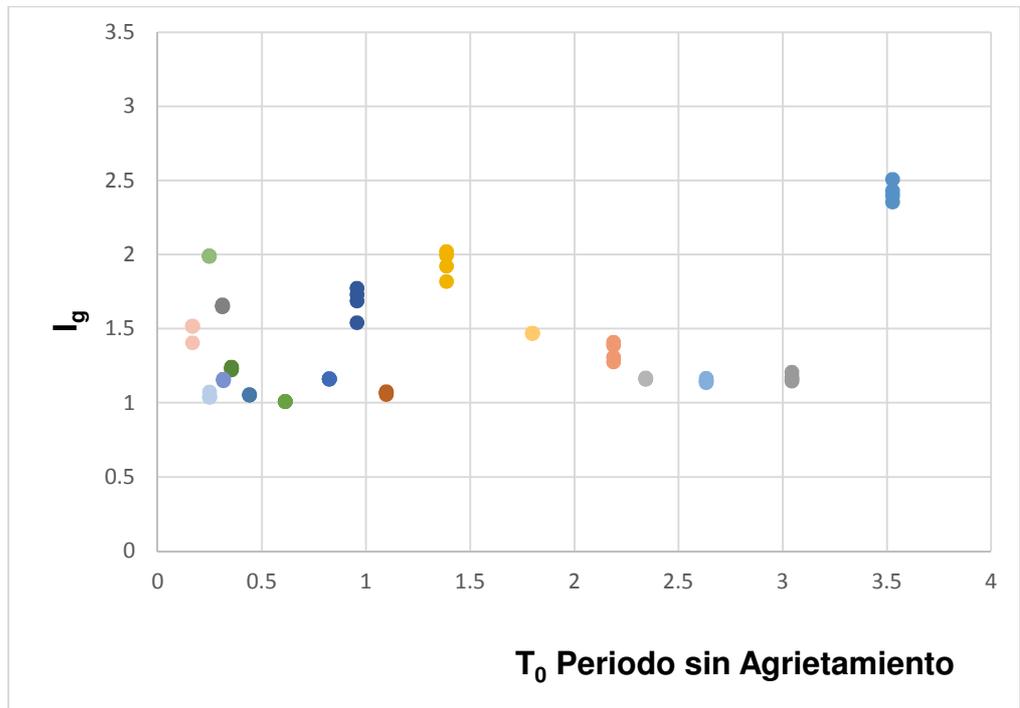


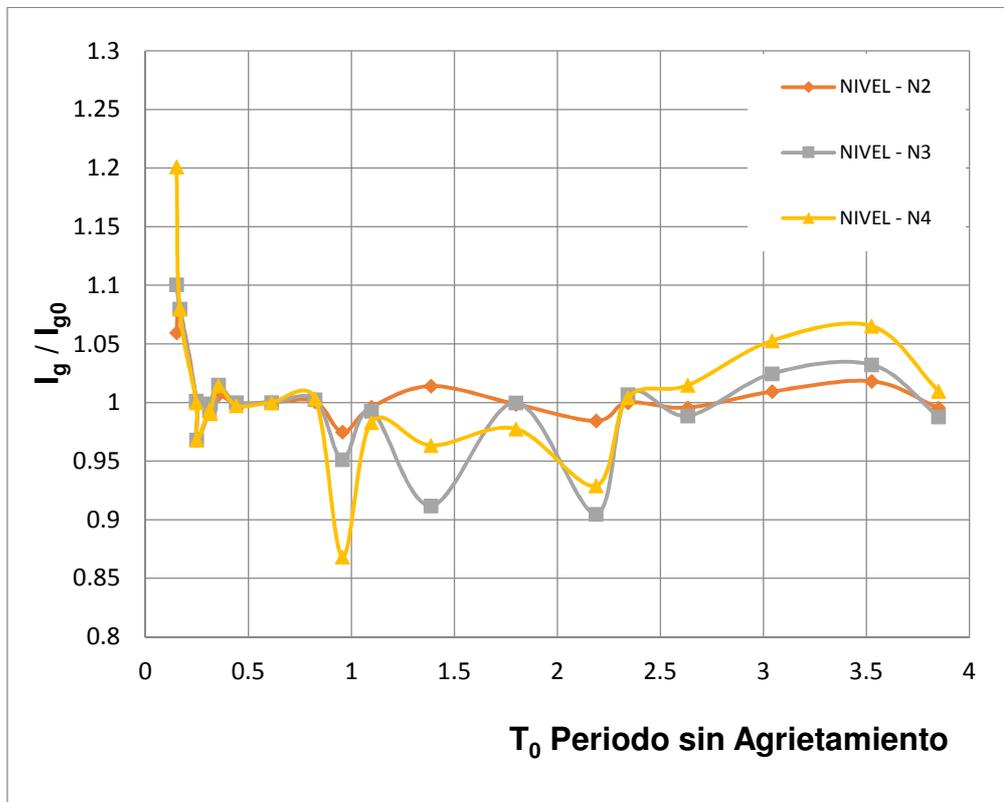
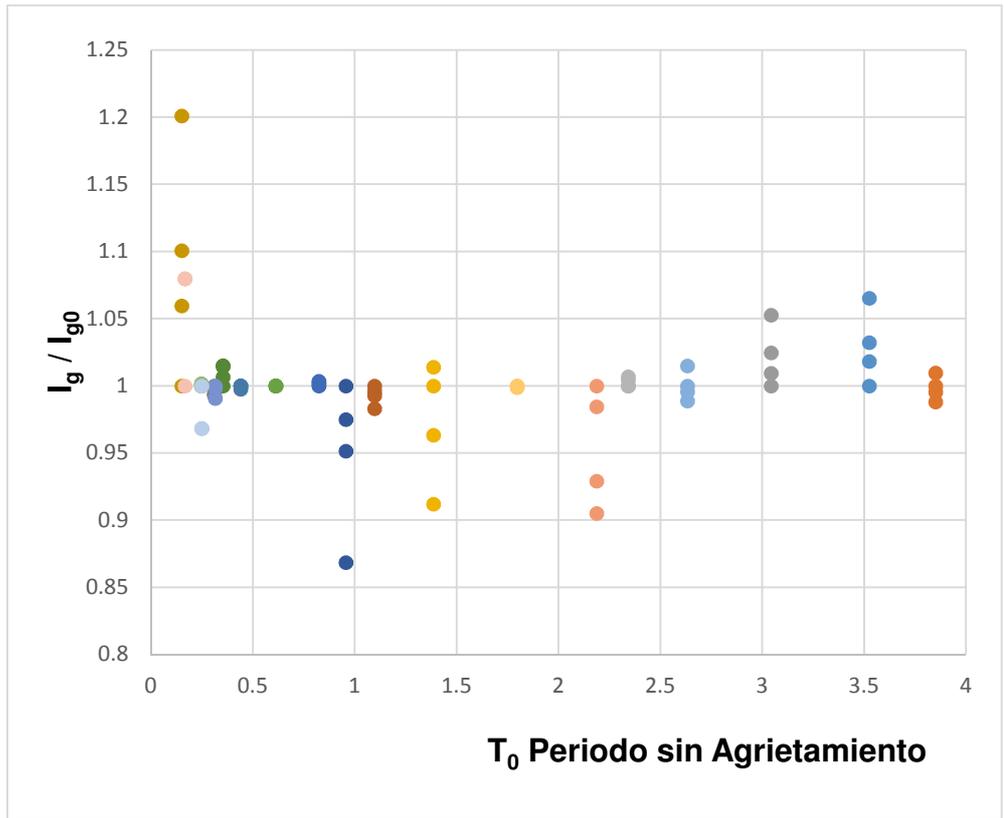
- Variación del desplazamiento de la azotea ( $D_{az}$ ) según el nivel de agrietamiento.



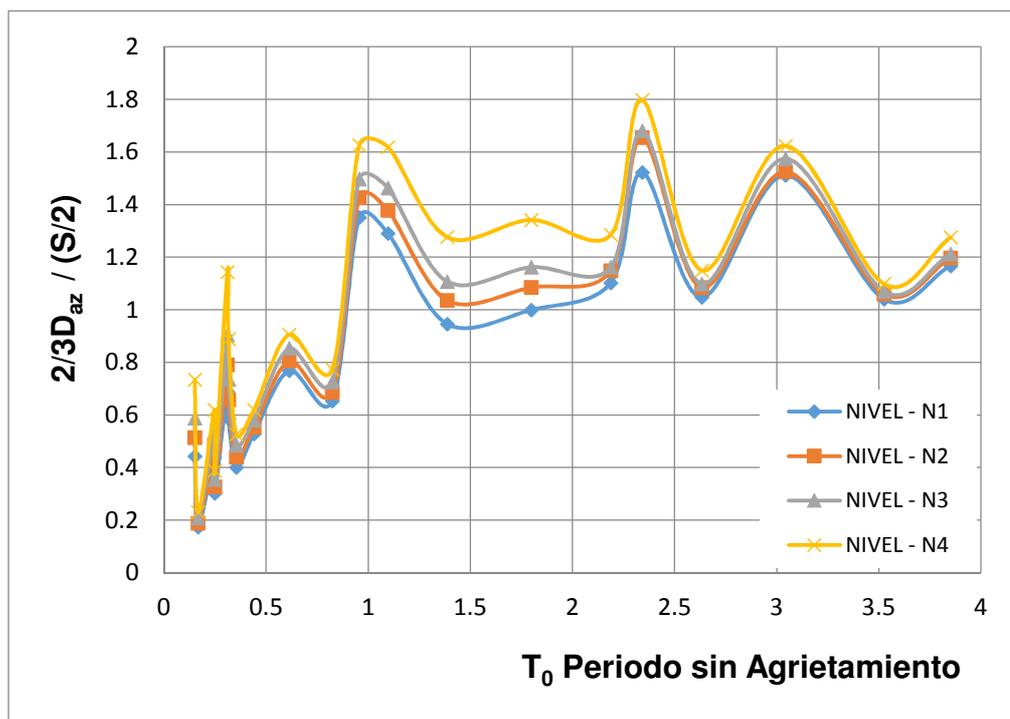
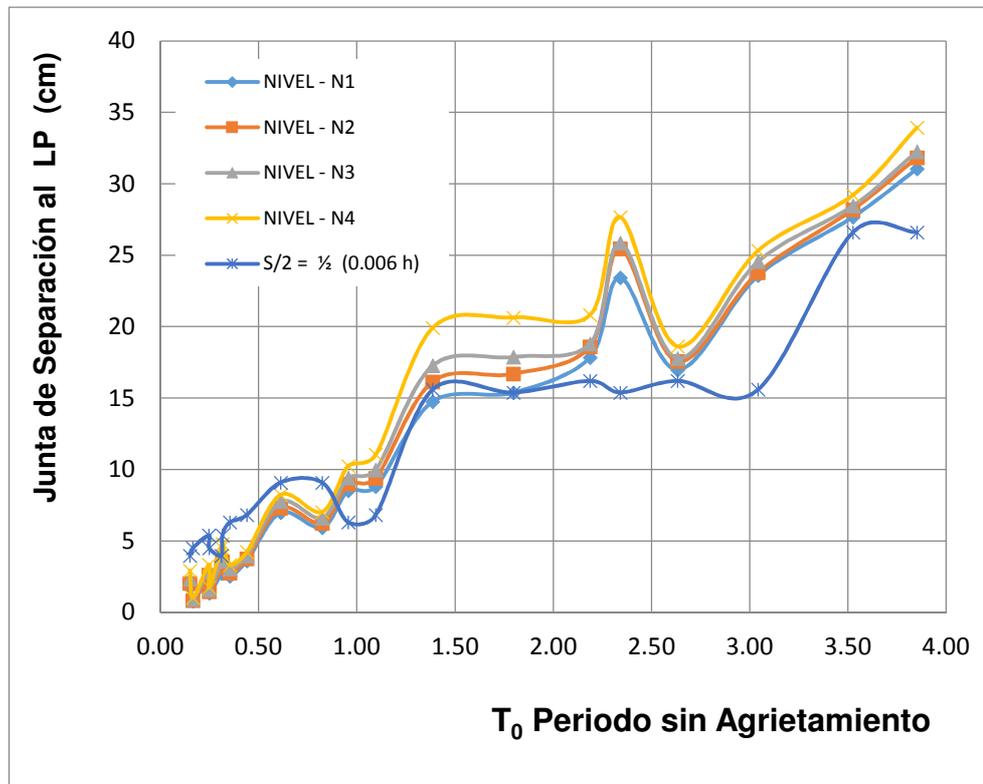


- Variación del Índice de Giro ( $I_g$ ) según el nivel de agrietamiento.





- Variación de la Junta de Separación al Límite de Propiedad (Lp).



## **ANEXO 2**

### **Información Digital**