

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

VALPARAÍSO - CHILE



Validación de Factores de Corrección para las Dimensiones de Probetas en Ensayos de Indentación de Asfalto.

Memoria de Título y Tesis de Grado presentada por:

MANUEL ANTONIO CÁRDENAS BERRÍOS

Como requisito para optar al título de

Ingeniero Civil

Y al grado de:

Magister en Ciencias de la Ingeniería Civil

Profesor Guía

RODRIGO DELGADILLO STURLA

Diciembre de 2019

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo financiero brindado por CONICYT PFCHA/MAGISTER BECAS NACIONALES/2018 – 22181045 para realizar la presente investigación.

Se agradece al personal del Laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María, en especial a Rodrigo Verdugo y Alejandra Zamora por el constante apoyo brindado durante la realización de los trabajos en laboratorio.

De igual forma se agradece al conjunto de profesores y guías que han aportado para desarrollo de este informe, en especial a Angelo Filonzi y Rodrigo Delgadillo, siendo personas claves a lo largo del desarrollo de este trabajo.

Agradezco a toda mi familia y amigos que han sido de gran apoyo y soporte durante el transcurso de todos estos años.

RESUMEN

En la actualidad, es muy común la construcción de pavimentos asfálticos debido a su impermeabilidad, capacidad de resistir cargas, a la fuerte cohesión y unión entre ligante-agregados y principalmente a la flexibilidad que poseen. Es por esto que es necesario determinar las propiedades de estos pavimentos para así predecir su comportamiento a lo largo de su vida útil, en este caso nos enfocaremos en el ligante asfáltico. El ligante asfáltico es un material viscoelástico cuyo comportamiento dependerá de varios factores los cuales son: niveles de carga, tiempos de carga y temperatura. Dicho comportamiento influirá directamente en el desempeño del pavimento frente a distintos tipos de falla. Es por esto que se hace necesario de proveer una precisa caracterización de este material viscoelástico y así predecir su desempeño. Para esto se determinan sus funciones fundamentales, las que pueden ser estudiadas en el dominio de la frecuencia (módulo complejo y ángulo de fase), o en el dominio del tiempo (flexibilidad en fluencia y módulo de relajación). En esta tesis se realiza una continuación a lo confeccionado en la tesis de Filonzi, la cual estudia una alternativa para determinar las funciones viscoelásticas en el dominio del tiempo de un ligante asfáltico. Este método alternativo corresponde a ensayos de indentación con cuerpos de geometrías esféricas, cilíndricas y cónicas. Para esto se desarrollan las soluciones para los tres diferentes cuerpos geométricos para un medio elástico semi-infinito y luego se expande a una solución para un medio viscoelástico semi-infinito. Finalmente se desarrollan factores de corrección para considerar los efectos de las paredes laterales y basales de las probetas. En lo que se refiere a lo presentado en esta tesis, se busca comprobar las soluciones desarrolladas anteriormente para una geometría cilíndrica. Para esto se han desarrollado modelos virtuales para ser resueltos por medio del método de elementos finitos (MEF) y de esta manera confeccionar, mediante puntos discretos, curvas de factores de corrección para ser comparadas con las obtenidas previamente de forma analítica. Adicionalmente, la investigación incluye una parte experimental llevada a cabo mediante ensayos de indentación cilíndrica a una temperatura intermedia para diferentes tamaños de probetas contenedoras de ligante asfáltico. Los resultados obtenidos, una vez aplicados los factores de corrección adecuados, son comparados con mediciones realizadas por el equipo reómetro de corte dinámico (DSR), por sus siglas en inglés. De los resultados, se tiene que los factores de corrección basal obtenidos por medio del método de elementos finitos son prácticamente idénticos a los obtenidos por soluciones analíticas. Sin embargo, con respecto al factor de corrección lateral, el efecto que se observa mediante MEF es mucho mayor al adquirido analíticamente, posibles causas de esto es que las soluciones analíticas desarrolladas no consideran el efecto volumétrico del fenómeno, aspecto que si se logra captar al realizar mediciones por medio del método de elementos finitos. Finalmente, los resultados de los ensayos de laboratorio alcanzan valores bastante cercanos de flexibilidad en fluencia con respecto a los entregados por el equipo DSR una vez aplicados los factores de corrección obtenidos por MEF.

Palabras Clave: *Ligante Asfáltico, Viscoelasticidad, Ensayo de Indentación, Flexibilidad en Fluencia, Módulo de Relajación, Método de Elementos Finitos, Indentador Cilíndrico.*

ABSTRACT

Asphalt binders are viscoelastic materials whose properties are directly responsible for the behavior of the pavement. This behavior would explain its resistance to several types of failures such as fatigue cracking, thermal cracking and rutting. Therefore, a proper characterization of viscoelastic materials through their fundamental properties is key for using an appropriate type of binder according to the requirements of the pavement for each particular case. A characterization of viscoelastic materials includes determination of fundamental viscoelastic functions. The viscoelastic functions in the time domain are the creep compliance and relaxation modulus. Also, the functions in the frequency domain are the complex modulus and the phase angle. Previous works suggest indentation test as a new methodology for characterization of viscoelastic materials. Analytical solutions are known for indentation tests in semi-infinite media that allow to determinate the creep compliance in shear. This thesis is an extension of the work done by Filonzi, where indentation tests are considering to be done using one of three different rigid body shapes: cylindrical, conical, and spherical. These indentation tests consider the effect of border conditions like specimen's radius and depth applying correction factors. The work has as purpose to verify previous solution obtained for a flat-ended cylindrical indenter by being supported from virtual models that are solved using the finite element method (FEM). Furthermore, by FEM this work aims to establish new correction factor curves considering lateral and basal border separately. In addition, experimental indentation tests are carried out at intermediate temperature for different specimen sizes. The results obtained applying the appropriate correction factors for each individual test are compared with the ones obtained using the dynamic shear rheometer (DSR). The results, for the basal correction factors obtained by FEM are almost the same as the ones obtained previously by analytical methods. However, the lateral correction factors obtained by FEM were far bigger than the analytical ones. Also experimental results conclude the same, proving that the effect of sample lateral border is bigger than the expected theoretical estimates. Possible reason for this may be associated with the volumetric effects due indenting a confined incompressible media.

Keywords: Asphalt binder, Viscoelasticity, Indentation test, Creep compliance, Relaxation modulus, Finite element method, Flat-ended cylindrical indenter.

GLOSARIO

α	: Ángulo interno de un indentador cónico.
α_i	: Módulos relativos en series Prony.
γ	: Cociente entre los radios de contacto del indentador sobre un medio influenciado por su base y sobre un medio semi – infinito.
ρ_a	: Densidad volumétrica del ligante asfáltico.
ν	: Módulo de Poisson del material viscoelástico.
σ_{ij}	: Esfuerzos totales.
τ_i	: Tiempo de relajación en series Prony.
a	: Radio de contacto del indentador.
a^H	: Radio de contacto del indentador sobre un medio semi – infinito.
DIC	: Digital Image Correlation (Correlación de imágenes digitales).
DSR	: Dynamic Shear Rheometer (Reómetro de Corte Dinámico).
$E(t)$: Curva del módulo de relajación del material viscoelástico.
FC_{Basal}	: Factor de corrección asociado al efecto de borde basal .
$FC_{Lateral}$: Factor de corrección asociado al efecto de borde lateral .
G	: Módulo de elasticidad en corte del material elástico.
G_0	: Módulo de corte elástico del material elástico para el tiempo 0.
G_∞	: Módulo de corte elástico del material totalmente relajado.
$H(t)$: Función escalón de Heaviside.
H_p	: Profundidad de la probeta de ensayo.
h	: Profundidad de indentación.
$h(t)$: Función de indentación en el tiempo.
h_b	: Profundidad de indentación en un medio elástico semi – infinito influenciado por la profundidad finita de la muestra.
h_h	: Profundidad de indentación en un medio elástico semi – infinito.
h_l	: Profundidad de indentación en un medio elástico semi – infinito influenciado por el radio finito de la muestra.
$J(t)$: Flexibilidad en fluencia en corte del material viscoelástico.
$K(y, \tau)$: Función Kernel de la integral de Fredholm.

MEF	: Método de elementos finitos.
P	: Carga constante de indentación.
R_i	: Radio del indentador esférico o cilíndrico.
R_p	: Radio de la probeta de ensayo.
$u(r, z)$: Campo de desplazamiento horizontal.
$w(r, z)$: Campo de desplazamiento vertical.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	2
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
GLOSARIO:	5
Capítulo 1. Introducción	17
1.1 Antecedentes generales	17
1.2 Objetivos del estudio.....	18
1.2.1 Objetivos generales	18
1.2.2 Objetivos específicos	18
1.3 Alcances del estudio	19
1.4 Metodología de trabajo	20
Capítulo 2. Marco Teórico	21
2.1 Mecánica de contacto	21
2.2 Modelamiento de indentadores	22
2.2.1 Modelación del indentador esférico.....	22
2.2.2 Modelación del indentador cónico	27
2.2.3 Modelación del indentador cilíndrico.....	31
2.2.4 Curvas de factores de corrección	35
Capítulo 3. Método de Elementos Finitos	37
3.1 Introducción.....	37
3.2 Modelamiento del problema de indentación	38
3.2.1 Tipo de análisis	38
3.2.2 Propiedades de los materiales	39
3.2.3 Geometría y enmallado.....	49
3.2.4 Condiciones de contorno.....	52
3.3 Resultados de las simulaciones.....	55
3.3.1 Comparación de los modelos 3D y 2D	55
3.3.2 Comparación de los modelos con y sin fricción.....	57
3.3.3 Efecto del borde basal de la probeta para indentaciones con geometría cilíndrica.....	60
3.3.3 Efecto del borde lateral de la probeta para indentaciones con geometría cilíndrica...	64

3.3.4 Factor de corrección lateral para distintas configuraciones de tamaño de la probeta	69
Capítulo 4. Ensayo de Indentación.....	72
4.1 Parámetros utilizados en los ensayos de indentación	72
4.1.1 Geometría del indentador.....	72
4.1.2 Valor del módulo de Poisson	72
4.1.3 Temperatura de ensayo	72
4.1.4 Tamaño de las probetas	73
4.2 Descripción del ensayo de indentación	74
4.2.1 Preparación de las muestras	74
4.2.2 Equipo del ensayo de indentación	76
4.2.3 Ejecución del ensayo de indentación con geometría cilíndrica	77
Capítulo 5. Resultados de los ensayos de indentación	80
5.1 Matriz de ensayos.....	80
5.2 Correlación de imágenes digitales (DIC)	81
5.3 Confección de gráficos de indentación en el tiempo	83
5.3.1 Conversión de píxeles a unidades métricas.....	83
5.3.2 Corrección por contacto inicial	83
5.3.3 Suavización de las curvas	85
5.4 Gráficos resultantes de indentación	86
5.4.1 Gráficos de indentación lote N°1	86
5.4.2 Gráficos de indentación lote N°2	91
5.4.3 Gráficos de indentación lote N°3	96
Capítulo 6. Ensayo de “Creep” en el Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	101
6.1 Equipo reómetro de corte dinámico (DSR).....	101
6.2 Ensayo de “creep” en el DSR	102
6.2.1 Preparación de la muestra	102
6.2.2 Preparar el equipo DSR	103
6.2.3 Colocación de la muestra	103
6.2.4 Ensayo de flexibilidad en fluencia.....	103
6.3 Curvas de flexibilidad en fluencia obtenidas del equipo DSR.....	104
Capítulo 7. Análisis de los Resultados Obtenidos	106
7.1 Efecto del tamaño finito de las probetas en los ensayos de indentación	106
7.1.1 Efecto del borde basal	106

7.1.2 Efecto del borde lateral	113
7.2 Aplicación de los factores de corrección a las curvas.....	119
7.3 Comparación de curvas de flexibilidad en fluencia obtenidas por ensayos de indentación y por el equipo DSR	123
Capítulo 8. Conclusiones	125
Capítulo 9. Referencias.....	127
Capítulo 10. Anexos.....	130
ANEXO A – Análisis de los resultados de obtenidos.....	130

TABLAS

Tabla 3-1: Parámetros Series de Prony entregados por el software ANSYS, a partir de los parámetros de un ligante asfáltico del tipo CA-24 utilizado como referencia para el análisis.....	44
Tabla 3-2: Parámetros Series de Prony entregados por el software ANSYS, a partir de los parámetros de un ligante asfáltico del tipo CA-24 utilizado como referencia para el análisis (Continuación).....	45
Tabla 3-3: Parámetros Series de Prony entregados por el software ANSYS, a partir de los parámetros de un ligante asfáltico del tipo CA-24 utilizado como referencia para el análisis (Continuación).....	46
Tabla 3-4: Parámetros Series de Prony entregados por el software ANSYS, a partir de los parámetros de un ligante asfáltico del tipo CA-24 utilizado como referencia para el análisis (Continuación).....	47
Tabla 3-5: Parámetros Series de Prony entregados por el software ANSYS, a partir de los parámetros de un ligante asfáltico del tipo CA-24 utilizado como referencia para el análisis (Continuación).....	48
Tabla 3-6: Dimensiones y carga aplicada para los modelos en 2D y 3D	55
Tabla 3-7: Indentación del modelo 2D y del modelo 3D en el software computacional ANSYS	56
Tabla 3-8: Indentación del modelo 2D y del modelo 3D en el software computacional ANSYS (Continuación)	57
Tabla 3-9: Condiciones de la simulación del modelo con y sin fricción en el software computacional ANSYS	58
Tabla 3-10: Indentación del modelo con fricción y modelo sin fricción en el software computacional ANSYS	59
Tabla 3-11: Indentación del modelo con fricción y modelo sin fricción en el software computacional ANSYS (Continuación)	60
Tabla 3-12: Valores utilizados para la simulación del efecto del borde basal de la probeta	61
Tabla 3-13: Resultados de indentación de las simulaciones variando la altura de la probeta en el software ANSYS	62
Tabla 3-14: Factores de corrección basal obtenidos de los resultados en el software ANSYS	62
Tabla 3-15: Comparación de los factores de corrección basal entre los obtenidos de los resultados del software ANSYS y los factores obtenidos analíticamente.....	63
Tabla 3-16: Valores utilizados para la simulación del efecto del borde lateral de la probeta	64
Tabla 3-17: Resultados de indentación de las simulaciones variando el radio de la probeta en el software ANSYS	65
Tabla 3-18: Factores de corrección lateral obtenidos de los resultados del software ANSYS	66
Tabla 3-19: Comparación de los factores de corrección lateral entre los obtenidos de los resultados del software ANSYS y los factores obtenidos analíticamente	67
Tabla 3-20: Configuración para cada serie de simulaciones para la confección de la curva de factor de corrección lateral	69
Tabla 3-21: Resultados serie 1 en el software ANSYS, $P = 0,5 N$; $H_p = 20 cm$; $R_i = 0,5 cm$	69
Tabla 3-22: Resultados serie 2 en el software ANSYS, $P = 1,0 N$; $H_p = 10 cm$; $R_i = 0,5 cm$	70

Tabla 3-23: Resultados serie 3 en el software ANSYS, $P = 0,1 \text{ N}$; $H_p = 10 \text{ cm}$; $R_i = 2,0 \text{ cm}$	70
Tabla 3-24: Resultados serie 4 en el software ANSYS, $P = 0,5 \text{ N}$; $H_p = 30 \text{ cm}$; $R_i = 0,5 \text{ cm}$	70
Tabla 4-1: Dimensiones de las probetas	73
Tabla 4-2: Factor de corrección basal asociado a las distintas alturas de las probetas	73
Tabla 4-3: Factor de corrección lateral asociado a los distintos radios de las probetas	74
Tabla 5-1: Matriz de probetas ensayadas para cada lote junto a sus factores de corrección asociados a una indentación cilíndrica de 10 mm de diámetro	80
Tabla 7-1: Factores de corrección basal y lateral aplicados según dimensión radial o basal de la probeta.....	119

FIGURAS

Figura 2-1: Diagrama de indentación en un medio viscoelástico semi-infinito por un indentador esférico.....	22
Figura 2-2: Diagrama de indentación influenciado por el efecto de la profundidad finita en un medio viscoelástico semi-infinito por un indentador esférico	23
Figura 2-3: Diagrama de indentación en un medio viscoelástico semi-infinito por un indentador cónico	27
Figura 2-4: Diagrama de indentación por un indentador cónico influenciado por el efecto de la profundidad finita en un medio viscoelástico semi-infinito	28
Figura 2-5: Diagrama de indentación, en un medio viscoelástico semi-infinito, por un indentador cilíndrico.....	31
Figura 2-6: Diagrama de indentación, influenciado por el efecto de la profundidad finita en un medio viscoelástico semi-infinito, por un indentador cilíndrico.....	32
Figura 2-7: Factores de corrección de borde basal para las tres geometrías analizadas [Filonzi, 2013]	35
Figura 2-8: Factores de corrección de borde lateral para las tres geometrías analizadas [Filonzi, 2013]	36
Figura 3-1: Sección del software computacional ANSYS 19.2 de análisis transiente.....	39
Figura 3-2: Modelo generalizado de Maxwell.....	39
Figura 3-3: Sección “Engineering Data” en software ANSYS 19.2.....	40
Figura 3-4: Herramientas material viscoelástico en biblioteca de ANSYS 19.2.....	41
Figura 3-5: Curva del módulo de relajación ingresada en el software ANSYS 19.2	43
Figura 3-6: Ajuste de la curva de series de Prony en biblioteca de propiedades de materiales de ANSYS 19.2	43
Figura 3-7: Propiedades de elasticidad y densidad en ANSYS 19.2.....	49
Figura 3-8: Sección “Geometry” en el software ANSYS 19.2	49
Figura 3-9: Geometría 3D del modelo en el software computacional ANSYS 19.2	50
Figura 3-10: Geometría 2D del modelo axisimétrico en el software computacional ANSYS 19.2 ...	50
Figura 3-11: Sección “Model” en el software computacional ANSYS 19.2	51
Figura 3-12: Enmallado del modelo 3D en el software computacional ANSYS 19.2.....	51
Figura 3-13: Enmallado del modelo axisimétrico 2D en el software computacional ANSYS 19.2 ...	52
Figura 3-14: Tipos de contactos en el software computacional ANSYS 19.2	53
Figura 3-15: Esquema del modelo 2D axisimétrico en el software computacional ANSYS.....	54
Figura 3-16: Resultados de indentación del modelo 3D y del modelo 2D en el software computacional ANSYS 19.2	55
Figura 3-17: Resultados de indentación de los modelos con y sin fricción en el software computacional ANSYS	58
Figura 3-18: Comparación de los factores de corrección basal mediante solución analítica y modelo de elementos finitos	63

Figura 3-19: Gráfico de la comparación de los factores de corrección lateral mediante el modelo analítico y el modelo desarrollado en el software ANSYS	67
Figura 3-20: Solevantamiento de la superficie del medio viscoelástico obtenido del software ANSYS 1.9	68
Figura 3-21: Gráfico del factor de corrección lateral obtenido para simulaciones de indentaciones de distintas dimensiones en el software ANSYS	71
Figura 4-1: Máquina de prueba universal utilizada para el control de temperatura.....	75
Figura 4-2: Conjunto Vástago-Indentador utilizado para los ensayos, A) Vástago, B) Indentador de geometría cilíndrica, C) Golillas.....	76
Figura 4-3: Equipo de indentación conformado por un penetrómetro, vástago, indentador y probeta.....	77
Figura 4-4: Posicionamiento de la superficie del indentador sobre la superficie del ligante asfáltico	78
Figura 5-1: Correlación de imágenes digitales, interfaz para preparar las imágenes	81
Figura 5-2: Correlación de imágenes digitales, interfaz con valores y enmallado de la correlación.....	82
Figura 5-3: Correlación de imágenes digitales, interfaz asociado a la visualización de los resultados.	82
Figura 5-4: Gráfico de indentación obtenidos por correlación de imágenes digitales en pixeles por segundo, sin modificar	84
Figura 5-5: Gráficos de indentación obtenidos por correlación de imágenes digitales sin modificación a partir de distintos tiempos iniciales	85
Figura 5-6: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°1 del Lote N°1.....	86
Figura 5-7: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°2 del Lote N°1.....	87
Figura 5-8: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°3 del Lote N°1.....	87
Figura 5-9: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°4 del Lote N°1.....	88
Figura 5-10: Gráfico de Indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°5 del Lote N°1.....	88
Figura 5-11: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°6 del Lote N°1.....	89
Figura 5-12: Gráfico de Indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°7 del Lote N°1.....	89
Figura 5-13: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°8 del Lote N°1.....	90
Figura 5-14: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°9 del Lote N°1.....	90
Figura 5-15: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°1 del Lote N°2.....	91
Figura 5-16: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°2 del Lote N°2.....	91

Figura 5-17: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°3 del Lote N°2.....	92
Figura 5-18: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°4 del Lote N°2.....	92
Figura 5-19: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°5 del Lote N°2.....	93
Figura 5-20: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°6 del Lote N°2.....	93
Figura 5-21: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°7 del Lote N°2.....	94
Figura 5-22: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°8 del Lote N°2.....	94
Figura 5-23: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°9 del Lote N°2.....	95
Figura 5-24: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°1 del Lote N°3.....	96
Figura 5-25: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°2 del Lote N°3.....	96
Figura 5-26: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°3 del Lote N°3.....	97
Figura 5-27: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°4 del Lote N°3.....	97
Figura 5-28: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°5 del Lote N°3.....	98
Figura 5-29: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°6 del Lote N°3.....	98
Figura 5-30: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°7 del Lote N°3.....	99
Figura 5-31: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°8 del Lote N°3.....	99
Figura 5-32: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°9 del Lote N°3.....	100
Figura 6-1: Reómetro de corte dinámico (DSR) marca Physica, modelo MCR 301.....	102
Figura 6-2: Curva de flexibilidad en fluencia obtenida por el equipo DSR para una muestra del Lote N°1 de ligante asfáltico	104
Figura 6-3: Curva de flexibilidad en fluencia obtenida por el equipo DSR para una muestra del Lote N°2 de ligante asfáltico	105
Figura 6-4: Curva de flexibilidad en fluencia obtenida por el equipo DSR para una muestra del Lote N°3 de ligante asfáltico	105
Figura 7-1: Curvas de indentación para distintas alturas de probeta con un Rp constante de 24 mm Lote N°1.....	107
Figura 7-2: Curvas de indentación para distintas alturas de probeta con un Rp constante de 15 mm Lote N°1.....	107

Figura 7-3: Curvas de indentación para distintas alturas de probeta con un Rp constante de 50 mm Lote N°1.....	108
Figura 7-4: Curvas de indentación para distintas alturas de probeta con un Rp constante de 24 mm Lote N°2.....	109
Figura 7-5: Curvas de indentación para distintas alturas de probeta con un Rp constante de 15 mm Lote N°2.....	109
Figura 7-6: Curvas de indentación para distintas alturas de probeta con un Rp constante de 50 mm Lote N°2.....	110
Figura 7-7: Curvas de indentación para distintas alturas de probeta con un Rp constante de 24 mm Lote N°3.....	111
Figura 7-8: Curvas de indentación para distintas alturas de probeta con un Rp constante de 15 mm Lote N°3.....	111
Figura 7-9: Curvas de indentación para distintas alturas de probeta con un Rp constante de 50 mm Lote N°3.....	112
Figura 7-10: Curvas de indentación para distintos Rp de probeta con un Hp constante de 6 cm Lote N°1.....	113
Figura 7-11: Curvas de indentación para distintos Rp de probeta con un Hp constante de 2 cm Lote N°1.....	114
Figura 7-12: Curvas de indentación para distintos Rp de probeta con un Hp constante de 1 cm Lote N°1.....	114
Figura 7-13: Curvas de indentación para distintos Rp de probeta con un Hp constante de 6 cm Lote N°2.....	115
Figura 7-14: Curvas de indentación para distintos Rp de probeta con un Hp constante de 2 cm Lote N°2.....	115
Figura 7-15: Curvas de indentación para distintos Rp de probeta con un Hp constante de 1 cm Lote N°2.....	116
Figura 7-16: Curvas de indentación para distintos Rp de probeta con un Hp constante de 6 cm Lote N°3.....	117
Figura 7-17: Curvas de indentación para distintos Rp de probeta con un Hp constante de 2 cm Lote N°3.....	117
Figura 7-18: Curvas de indentación para distintos Rp de probeta con un Hp constante de 1 cm Lote N°3.....	118
Figura 7-19: Curvas de indentación de todos los ensayos lote N°1 sin aplicar factores de corrección por tamaño finito de las probetas.....	120
Figura 7-20: Curvas de indentación de todos los ensayos lote N°1 aplicando los factores de corrección por tamaño finito de las probetas.....	120
Figura 7-21: Curvas de indentación de todos los ensayos del lote N°2 sin aplicar factores de corrección por tamaño finito de las probetas.....	121
Figura 7-22: Curvas de indentación de todos los ensayos lote N°2 aplicando los factores de corrección por tamaño finito de las probetas.....	121
Figura 7-23: Curvas de indentación de todos los ensayos del lote N°3 sin aplicar factores de corrección por tamaño finito de las probetas.....	122
Figura 7-24: Curvas de indentación de todos los ensayos del lote N°3 aplicando los factores de corrección por tamaño finito de las probetas.....	122

Figura 7-25: Curvas de flexibilidad en fluencia en corte asociados a todos los ensayos de indentación y DSR del ligante asfáltico del Lote N°1	123
Figura 7-26: Curvas de flexibilidad en fluencia asociados a todos los ensayos de indentación y DSR del material de ligante del Lote N°2.....	124
Figura 7-27: Curvas de flexibilidad en fluencia asociados a todos los ensayos de indentación y DSR del material de ligante del Lote N°3.....	124
Figura 10-1: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°1 del Lote N°1.....	130
Figura 10-2: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°2 del Lote N°1.....	130
Figura 10-3: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°3 del Lote N°1.....	131
Figura 10-4: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°4 del Lote N°1.....	131
Figura 10-5: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°5 del Lote N°1.....	132
Figura 10-6: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°6 del Lote N°1.....	132
Figura 10-7: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°7 del Lote N°1.....	133
Figura 10-8: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°8 del Lote N°1.....	133
Figura 10-9: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°9 del Lote N°1.....	134
Figura 10-10: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°1 del Lote N°2.....	134
Figura 10-11: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°2 del Lote N°2.....	135
Figura 10-12: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°3 del Lote N°2.....	135
Figura 10-13: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°4 del Lote N°2.....	136
Figura 10-14: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°5 del Lote N°2.....	136
Figura 10-15: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°6 del Lote N°2.....	137
Figura 10-16: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°7 del Lote N°2.....	137
Figura 10-17: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°8 del Lote N°2.....	138
Figura 10-18: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°9 del Lote N°2.....	138
Figura 10-19: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°1 del Lote N°3.....	139
Figura 10-20: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°2 del Lote N°3.....	139
Figura 10-21: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°3 del Lote N°3.....	140
Figura 10-22: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°4 del Lote N°3.....	140
Figura 10-23: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°5 del Lote N°3.....	141
Figura 10-24: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°6 del Lote N°3.....	141
Figura 10-25: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°7 del Lote N°3.....	142
Figura 10-26: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°8 del Lote N°3.....	142
Figura 10-27: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°9 del Lote N°3.....	143

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes generales

Los pavimentos flexibles corresponden a cualquier pavimento cuya superficie este compuesta por mezclas asfálticas, es decir, aquellos que están compuestos por una capa superficial de agregado mineral recubierto y aglomerado con ligante asfáltico. Los agregados minerales junto con el ligante asfáltico son aquellos que le proporcionan las características mecánicas al sistema, determinando su forma de comportarse y de distribuir los esfuerzos frente a las cargas impuestas. Estos materiales bituminosos, también denominados ligantes asfálticos, son un material de color entre negro y café producidos a partir del residuo de la destilación del petróleo, y que presentan propiedades viscoelásticas cuyo comportamiento depende principalmente de los niveles y tiempos de carga a los cuales se ve sometido junto a la temperatura.

Las propiedades de las mezclas asfálticas nos permiten predecir el comportamiento y desempeño del pavimento con respecto a las diferentes fallas. A bajas temperaturas se ve dominado por el agrietamiento térmico, mientras que, a altas temperaturas es dominado por el ahuellamiento. Para temperaturas intermedias el agrietamiento por fatiga es aquel que adquiere mayor importancia.

Debido a lo anterior es que se hace necesario determinar las propiedades de esta mezcla asfáltica y así poder predecir su comportamiento y desempeño frente a las cargas de tráfico y a las temperaturas a las cuales se verán sometidas. Con respecto al ligante asfáltico, los cuales como se mencionó anteriormente, se comportan como materiales viscoelásticos, se pueden caracterizar a través de sus funciones viscoelásticas. Estas pueden ser estudiadas por dos enfoques diferentes, los cuales son en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. Las funciones viscoelásticas en el dominio del tiempo corresponden a la flexibilidad en fluencia y al módulo de relajación. Con respecto a las funciones en el dominio de la frecuencia, el módulo complejo y el ángulo de fase.

1.2 Objetivos del estudio

1.2.1 Objetivos generales

El objetivo del presente trabajo es verificar la validez de los factores de corrección tanto lateral como basal adquiridos analíticamente para la obtención de la flexibilidad en fluencia de ligantes asfálticos resolviendo modelos computacionales por medio del método de elementos finitos, junto con la toma de mediciones con ensayos de indentación en laboratorio de probetas cilíndricas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar ensayos de indentación en laboratorio utilizando indentadores de geometría cilíndrica con probetas cilíndricas de distintas dimensiones para medir la profundidad de indentación en el tiempo. De esta forma, obtener la curva de flexibilidad en fluencia del ligante aplicando los factores de corrección obtenidos analíticamente.
- Desarrollar modelos de indentación en medios viscoelásticos utilizando el método de elementos finitos en donde se simulen ensayos similares a los realizados en laboratorio para distintas dimensiones de indentadores y probetas, además de distintos niveles de cargas.
- Obtener la curva de la flexibilidad en fluencia del ligante mediante el uso del reómetro de corte dinámico (DSR) y comparar con los resultados adquiridos de los ensayos en laboratorio y simulaciones computacionales.

1.3 Alcances del estudio

En la presente investigación se analiza el efecto de las dimensiones de las probetas contenedoras de ligante asfáltico sobre las mediciones de indentación. Junto a esto, se verifica la validez de los factores de corrección obtenidos analíticamente **[Filonzi, 2013]** los cuales permiten corregir el efecto de las dimensiones finitas de las probetas y de esta forma calcular la curva de flexibilidad en fluencia utilizando las soluciones ya conocidas, las cuales, consideran indentaciones sobre medios viscoelásticos semi-infinitos. Dichas soluciones son aplicables para indentadores de geometría esférica, cilíndrica y cónica. Sin embargo, en esta investigación sólo se utilizará un indentador del tipo cilíndrico.

Se realizan simulaciones computacionales resueltas por medio del método de elementos finitos para desarrollar nuevas curvas de factores de corrección y ser comparadas por las obtenidas por **Filonzi [2013]**, considerando el supuesto de contacto sin fricción entre indentador y material a indentar. Además, en esta investigación se dan a conocer los resultados de la comparación de los factores de corrección obtenidos mediante ambos métodos y se examina la razón de la diferencia entre ambos resultados.

Seguidamente, se realizan ensayos de indentación cilíndrica en laboratorio con el fin de comprobar la utilidad de los factores de corrección obtenidos por MEF para obtener la función de flexibilidad en fluencia en corte de un ligante asfáltico clasificado como CA-24 a 20 °C. Se presentan resultados y análisis de las funciones obtenidas durante estos ensayos las cuales son comparadas con las obtenidas utilizando el equipo reómetro de corte dinámico (DSR).

1.4 Metodología de trabajo

Para el desarrollo de la presente investigación se consideran las siguientes etapas:

La primera etapa consiste en la recopilación bibliográfica de antecedentes e investigaciones que profundicen el estado del arte en la indentación sobre medios viscoelásticos, considerando los efectos de las dimensiones finitas de las probetas.

La segunda etapa establece la confección de modelos computacionales que simulen ensayos de indentación sobre medios viscoelásticos de dimensiones finitas los cuales resueltos por medio del método de elementos finitos permitan estudiar el efecto de la altura (basal) y el radio (lateral) de probetas cilíndricas y desarrollar factores de corrección para eliminar el efecto dichas dimensiones finitas. Luego comparar estos factores de corrección con aquellos obtenidos de manera analítica.

La tercera etapa corresponde a la realización de ensayos de indentación utilizando el equipo de penetración modificado para tal propósito con un indentador de geometría cilíndrica. En esta etapa se analizan probetas asfálticas de distintas dimensiones de radio y altura, obteniendo las curvas de flexibilidad en fluencia en corte aplicando los factores de corrección adquiridos de los modelos computacionales estudiados en la etapa anterior.

La cuarta etapa consta de la obtención de las curvas de flexibilidad en fluencia para los mismos ligantes mediante ensayo en el equipo reómetro de corte dinámico (DSR) y comparar dichas curvas con las obtenidas en los ensayos de indentación.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Mecánica de contacto

Los estudios de la mecánica de contacto inician con las investigaciones realizadas por **Hertz [1882]**, quien resolvió el problema de dos cuerpos elásticos de superficies curvas en contacto siendo la base para el análisis de problemas de mecánica de contacto. Estas investigaciones permiten analizar los esfuerzos producidos en el contacto de dos sólidos elásticos. Los supuestos establecidos en la teoría de Hertz son:

- Deformaciones producidas son pequeñas en comparación con el tamaño de los cuerpos.
- Las superficies son continuas y no encajan entre sí.
- Cada cuerpo es considerado como un medio semi-infinito.
- No existe fricción entre las superficies de contacto.

Más tarde se realizan otros estudios [**Johnson et al., 1971**] que incorporan el efecto de la adhesión entre los cuerpos en contactos, configurándose el modelo conocido como JKR (Johnson-Kendall-Roberts). Posteriormente **Bowden y Tabor [2001]** establecieron la influencia de la fricción entre las superficies de contacto.

Utilizando los desarrollos de la teoría de Hertz y el método de ecuaciones funcionales, **Lee y Radok [1960]** desarrollaron una solución para la indentación viscoelástica lineal sin fricción. Sin embargo, este método requiere que el área de contacto entre el indentador y la superficie del material a indentar aumente continuamente con el tiempo, restricción que es eliminada por la solución de **Ting [1966]**. No obstante, debido a su formulación implícita, esta solución es difícil de aplicar, con excepción de algunos casos particulares. Por esto último, el método de las ecuaciones funcionales de Radok se mantiene como enfoque favorito en los análisis de indentación.

2.2 Modelamiento de indentadores

Se han obtenido soluciones para tres geometrías de indentadores, cilíndrica, esférica y cónica, que permiten adquirir la función de flexibilidad en fluencia de un material bituminoso a partir de un ensayo de indentación. Sin embargo, estas soluciones se rigen bajo el supuesto de indentación sobre medios semi-infinitos, lo cual lo siempre se puede lograr, por lo que **Filonzi [2013]** ha desarrollado curvas de factores de corrección para eliminar los efectos de las dimensiones finitas de probetas cilíndricas. A continuación, se detallan y analizan cada una de estas geometrías de indentación.

2.2.1 Modelación del indentador esférico

En la imagen presentada a continuación (Figura 2-1) se muestra un esquema de lo que es una indentación esférica en un medio viscoelástico semi-infinito.

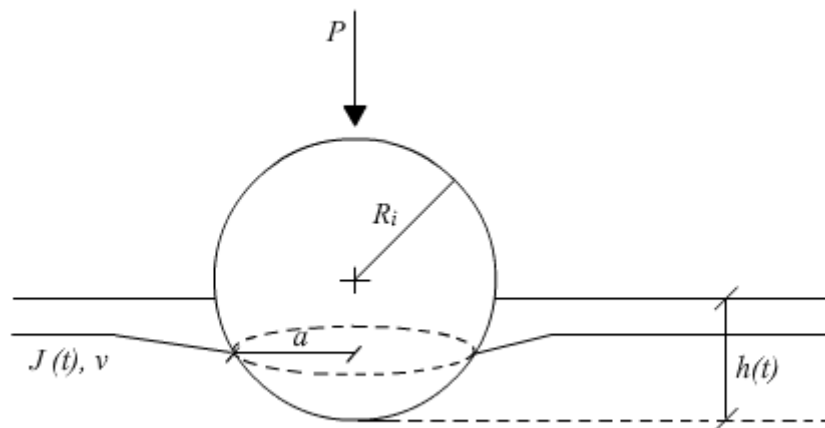


Figura 2-1: Diagrama de indentación en un medio viscoelástico semi-infinito por un indentador esférico

Donde:

- $J(t)$: Función de flexibilidad en fluencia del medio viscoelástico.
- R_i : Radio del indentador esférico.
- P : Carga constante aplicada por el indentador sobre el medio viscoelástico.
- $h(t)$: Función de indentación en el tiempo.
- ν : Módulo de Poisson del material viscoelástico.
- a : Radio de contacto.

Se ha conseguido, por el método de las ecuaciones funcionales [Sneddon, 1965], la solución viscoelástica para una indentación de geometría esférica. Cabe recordar que, debido al método utilizado, esta solución se encuentra bajo los supuestos de indentación en un medio semi-infinito y no existe fricción entre el indentador y el medio viscoelástico. Por su parte, por simplicidad, se considera al módulo de Poisson (ν) constante en el tiempo.

$$J(t) = \frac{8\sqrt{R_i}}{3P(1-\nu)} (h(t))^{\frac{3}{2}} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

En la ecuación 2.1, $J(t)$ representa la flexibilidad en fluencia en corte de un material viscoelástico lineal en el tiempo, R_i es el radio del indentador esférico, $h(t)$ corresponde a la profundidad de indentación en el tiempo, P es una carga constante aplicada por el indentador sobre el medio viscoelástico, y ν es el módulo de Poisson.

Filonzi [2013] estudió el efecto de la profundidad finita de un cuerpo viscoelástico semi-infinito de profundidad finita. Debido a la simetría axial del problema, este se puede trabajar en dos dimensiones. La Figura 2-2 muestra un esquema del sistema a analizar:

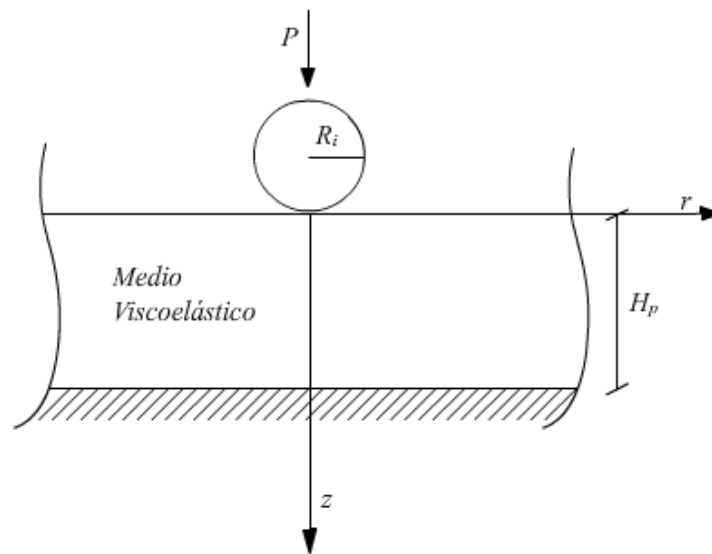


Figura 2-2: Diagrama de indentación influenciado por el efecto de la profundidad finita en un medio viscoelástico semi-infinito por un indentador esférico

Las condiciones de borde de la superficie del material a indentar quedan expresadas como:

$$w(r, 0) = h \quad r < a \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$\sigma_{zz}(r, 0) = 0 \quad r > a \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$\sigma_{rz}(r, 0) = 0 \quad r \geq 0 \quad (\text{Ec. 2.4})$$

En donde $w(r, z)$ es el campo desplazamiento vertical, $\sigma_{zz}(r, z)$ es el esfuerzo vertical, $\sigma_{rz}(r, z)$ es el esfuerzo de corte, a es el radio de contacto y h corresponde al desplazamiento vertical bajo el indentador.

La condición de borde a lo largo de la interfaz entre el material a indentar y la base del cuerpo viscoelástico es la siguiente:

$$u(r, H_p) = w(r, H_p) = 0 \quad r \geq 0 \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde $u(r, z)$ es el campo desplazamiento horizontal. La solución al problema puede ser reducida a una integral de Fredholm de segundo orden [Han et al., 2006], el cual puede ser resuelto utilizando el método de cuadratura de Gauss-Legendre.

$$H(\tau) - \frac{1}{\pi} \int_0^1 [H(y)[K(y + \tau) + K(y - \tau)]] dy = F_0(\tau) \quad (\text{Ec. 2.6})$$

$$F_0(\tau) = 1 - \gamma\tau * \frac{\ln(1 + \tau\rho) - \ln(1 - \tau\rho)}{\ln\left(1 + \frac{\rho}{\gamma}\right) - \ln\left(1 - \frac{\rho}{\gamma}\right)} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

$$\rho = \frac{a}{R_i} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

$$\gamma = \frac{a}{a^H} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

En donde a^H corresponde al radio de contacto para una indentación de idéntica condición sobre un medio semi-infinito no influenciado por su base. Luego para un indentador esférico de radio R_i se tiene que:

$$h = \frac{\alpha^H}{2} \ln\left(\frac{1 + \frac{\alpha^H}{R_i}}{1 - \frac{\alpha^H}{R_i}}\right) \quad (\text{Ec. 2.10})$$

A continuación, con el supuesto de una base infinitamente rígida, la carga de indentación P requerida para que un indentador esférico penetre una profundidad h en un medio viscoelástico semi-infinito influenciado por el efecto de una base es **[Yang y Li, 2008]**:

$$P = \frac{4\sqrt{R_i}}{1-\nu} * G\gamma h^{\frac{3}{2}} \int_0^1 H(x)dx \quad (\text{Ec. 2.11})$$

En la ecuación 2.11, G corresponde al módulo de corte del medio a indentar, y las demás variables han sido definidas anteriormente.

El desplazamiento vertical bajo un indentador esférico en un medio elástico semi-infinito homogéneo h_h y el desplazamiento vertical bajo un indentador esférico en un medio elástico semi-infinito influenciado por una profundidad (base) finita h_b se expresan respectivamente como:

$$h_h^{\frac{3}{2}} = \frac{3(1-\nu)}{8\sqrt{R_i}} * \frac{P}{G} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

$$h_b^{\frac{3}{2}} = \frac{1-\nu}{4\sqrt{R_i} * \gamma \int_0^1 H(x)dx} * \frac{P}{G} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Finalmente es posible obtener el factor de corrección de borde basal representado como el cociente entre ambos desplazamientos:

$$FC_{Basal} = \frac{h_h}{h_b} = \left(\frac{3}{2}\gamma \int_0^1 H(x)dx\right)^{\frac{2}{3}} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

De igual forma, [Filonzi, 2013] estudió el efecto de la presencia de un borde lateral en un cuerpo viscoelástico de geometría cilíndrica de radio finito. Para almacenar los ligantes en contenedores es necesario depositarlos a altas temperaturas, donde luego al enfriarse, se mantienen perfectamente adheridos a las paredes del contenedor. Esto implica que los desplazamientos tanto horizontales como verticales en dicho borde deben ser nulos.

Para imponer la condición de desplazamiento nulo en los bordes laterales se aplica el concepto de superposición de cargas. Esto consiste en aplicar una carga ficticia de misma geometría y magnitud, pero en sentido contrario, ubicada de manera simétrica con la carga real de indentación, cuyo eje de simetría corresponde al borde lateral. Entonces para calcular el desplazamiento vertical de una indentación afectada por un borde lateral, se calcula la diferencia entre el desplazamiento vertical de una indentación justo debajo del indentador y a una distancia de dos veces el radio de la probeta.

Finalmente, el factor de corrección asociado al borde lateral queda definido como:

$$FC_{lateral} = \frac{h_h}{h_l} = \frac{w(0,0)}{w(0,0) - w(2R_p, 0)} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Donde h_l corresponde al desplazamiento vertical bajo un indentador esférico en un medio elástico semi-infinito influenciado por el radio finito de la muestra. R_p es el radio de la probeta, h_h y $w(r, z)$ fueron definidos anteriormente.

2.2.2 Modelación del indentador cónico

En la Figura 2-3 presentada a continuación se muestra un esquema de lo que es una indentación cónica en un medio viscoelástico semi-infinito.

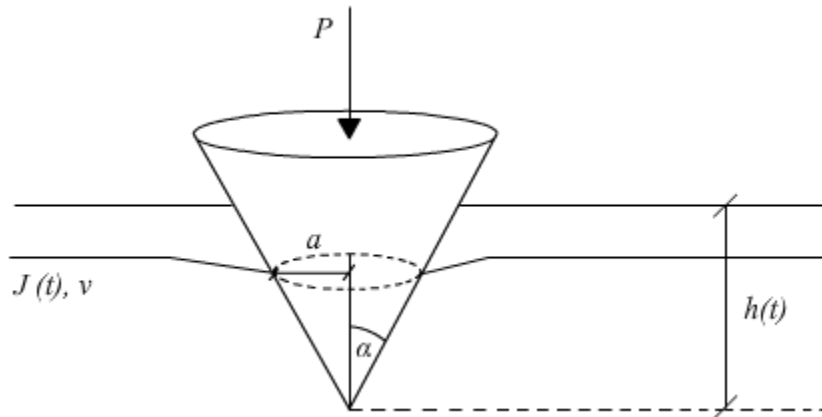


Figura 2-3: Diagrama de indentación en un medio viscoelástico semi-infinito por un indentador cónico

Donde:

- $J(t)$: Función de flexibilidad en fluencia del medio viscoelástico.
- α : Ángulo interno del indentador cónico.
- P : Carga constante que aplica el indentador al medio viscoelástico.
- $h(t)$: Función de indentación en el tiempo.
- ν : Módulo de Poisson del material viscoelástico.
- a : Radio de contacto.

Se ha conseguido, por el método de las ecuaciones funcionales [Lu et al. 2003], la solución viscoelástica para una indentación de geometría cónica. Cabe recordar que, debido al método utilizado, esta solución se encuentra bajo los supuestos de indentación en un medio semi-infinito y no existe fricción entre las superficies de contacto del indentador y el medio viscoelástico. Por su parte, por simplicidad, se considera el módulo de Poisson constante en el tiempo.

$$J(t) = \frac{4}{\pi P(1 - \nu) * \cot(\alpha)} (h(t))^2 \quad (\text{Ec. 2.16})$$

En la ecuación 2.16, $J(t)$ representa la flexibilidad en fluencia en corte de un material viscoelástico lineal en el tiempo, $h(t)$ corresponde a la profundidad de indentación en el tiempo, P es una carga constante aplicada por el indentador sobre el medio viscoelástico, α corresponde al ángulo interno del indentador cónico y ν es el módulo de Poisson.

Filonzi [2013] estudió el efecto de un cuerpo viscoelástico semi-infinito de profundidad finita. Debido a la simetría axial del problema, éste se puede trabajar en dos dimensiones. En la Figura 2-4 se muestra un esquema del sistema a analizar:

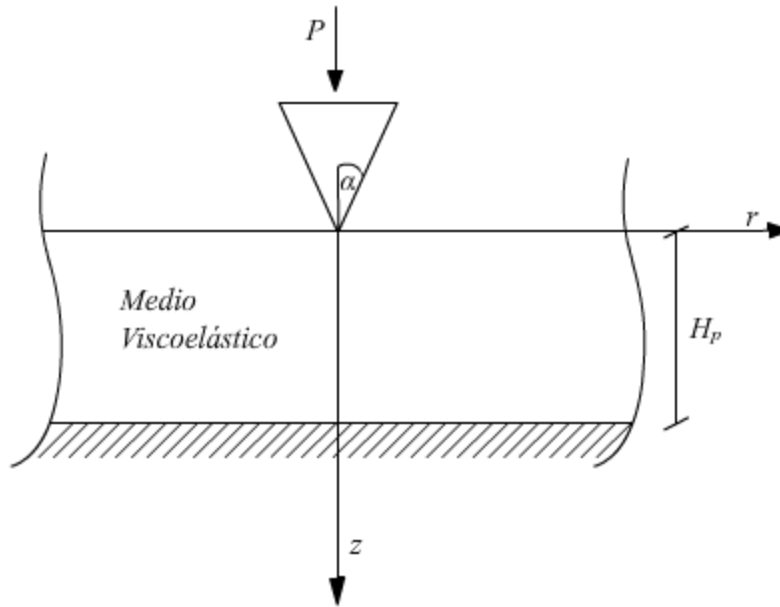


Figura 2-4: Diagrama de indentación por un indentador cónico influenciado por el efecto de la profundidad finita en un medio viscoelástico semi-infinito

Las condiciones de borde de la superficie del material a indentar quedan expresadas como:

$$w(r, 0) = h \quad r < a \quad (\text{Ec. 2.17})$$

$$\sigma_{zz}(r, 0) = 0 \quad r > a \quad (\text{Ec. 2.18})$$

$$\sigma_{rz}(r, 0) = 0 \quad r \geq 0 \quad (\text{Ec. 2.19})$$

En donde $w(r, z)$ es el campo desplazamiento vertical, $\sigma_{zz}(r, z)$ es el esfuerzo vertical, $\sigma_{rz}(r, z)$ es el esfuerzo de corte, a es el radio de contacto y h corresponde al desplazamiento vertical bajo el indentador.

La condición de borde a lo largo de la interfaz entre el material a indentar y la base del cuerpo viscoelástico es la siguiente:

$$u(r, H_p) = w(r, H_p) = 0 \quad r \geq 0 \quad (\text{Ec. 2.20})$$

Donde $u(r, z)$ es el campo desplazamiento horizontal. La solución al problema puede ser reducida a una integral de Fredholm de segundo orden [Han et al., 2006], el cual puede ser resuelto utilizando el método de cuadratura de Gauss-Legendre

$$H(\tau) - \frac{1}{\pi} \int_0^1 [H(y)[K(y + \tau) + K(y - \tau)]] dy = F_0(\tau) \quad (\text{Ec. 2.21})$$

$$F_0(\tau) = 1 - \gamma\tau \quad (\text{Ec. 2.22})$$

$$\gamma = \frac{a}{a^H} \quad (\text{Ec. 2.23})$$

En donde a^H corresponde al radio de contacto para una indentación de idéntica condición sobre un medio semi-infinito no influenciado por una base. Luego para un indentador cónico de ángulo interno α se tiene que:

$$h = \frac{\pi a^H}{2 \tan(\alpha)} \quad (\text{Ec. 2.24})$$

A continuación, con el supuesto de una base infinitamente rígida, la carga de indentación P requerida para que un indentador cónico penetre una profundidad h en un medio viscoelástico semi-infinito influenciado por el efecto de una base es [Yang y Li, 2008]:

$$P = \frac{8 \tan(\alpha)}{\pi(1 - \nu)} * G\gamma h^2 \int_0^1 H(x) dx \quad (\text{Ec. 2.25})$$

En la ecuación 2.25, G corresponde al módulo de corte del medio a indentar, y las demás variables han sido definidas anteriormente.

El desplazamiento vertical bajo un indentador cónico en un medio elástico homogéneo semi-infinito h_h y el desplazamiento vertical bajo un indentador cónico en un medio elástico semi-infinito influenciado por una profundidad (base) finita h_b se expresan respectivamente como:

$$h_h^2 = \frac{\pi(1-\nu)\cot(\alpha)}{4} * \frac{P}{G} \quad (\text{Ec. 2.26})$$

$$h_b^2 = \frac{(1-\nu)\pi}{8\tan(\alpha) * \gamma \int_0^1 H(x)dx} * \frac{P}{G} \quad (\text{Ec. 2.27})$$

Finalmente es posible obtener el factor de corrección de borde basal representado como el cociente entre ambos desplazamientos **[Filonzi, 2013]**:

$$FC_{Basal} = \frac{h_h}{h_b} = \left(2\gamma \int_0^1 H(x)dx \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ec. 2.28})$$

De igual forma, **Filonzi [2013]** estudió el efecto de la presencia de un borde lateral en un cuerpo viscoelástico de geometría cilíndrica de radio finito. Para almacenar los ligantes en contenedores es necesario depositarlos a altas temperaturas, donde luego al enfriarse, se mantienen perfectamente adheridos a las paredes del contenedor. Esto implica que los desplazamientos tanto horizontales como verticales en dicho borde deben ser nulos.

Para imponer la condición de desplazamiento nulo en los bordes laterales se aplica el concepto de superposición de cargas. Esto consiste en aplicar una carga ficticia de misma geometría y magnitud, pero en sentido contrario, ubicada de manera simétrica con la carga real de indentación, cuyo eje de simetría corresponde al borde lateral. Entonces para calcular el desplazamiento vertical de una indentación afectada por un borde lateral, se calcula la diferencia entre el desplazamiento vertical de una indentación justo debajo del indentador y a una distancia de dos veces el radio de la probeta.

Finalmente, el factor de corrección asociado al borde lateral queda definido como:

$$FC_{lateral} = \frac{h_h}{h_l} = \frac{w(0,0)}{w(0,0) - w(2R_p,0)} \quad (\text{Ec. 2.29})$$

Donde h_l corresponde al desplazamiento vertical bajo un indentador cónico en un medio elástico semi-infinito influenciado por el radio finito de la muestra (dimensión lateral). R_p es el radio de la probeta o contenedor, h_h y $w(r, z)$ fueron definidos anteriormente.

2.2.3 Modelación del indentador cilíndrico

En la Figura 2-5 presentada a continuación se muestra un esquema de lo que es una indentación cilíndrica en un medio viscoelástico semi-infinito.

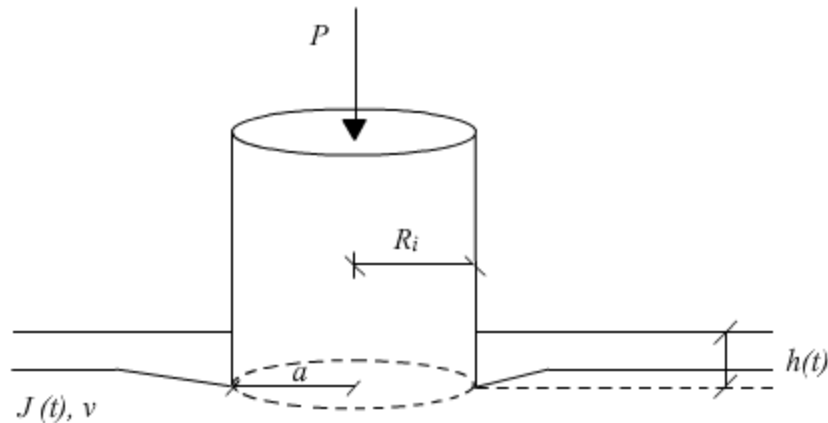


Figura 2-5: Diagrama de indentación, en un medio viscoelástico semi-infinito, por un indentador cilíndrico

Donde:

- $J(t)$: Función de flexibilidad en fluencia del medio viscoelástico.
- R_i : Radio del indentador de geometría cilíndrica.
- P : Carga constante que aplica el indentador al medio viscoelástico.
- $h(t)$: Función de indentación en el tiempo.
- ν : Módulo de Poisson del material viscoelástico.
- a : Radio de contacto.

Zofka y Nener-Plante [2011], han establecido la siguiente relación para determinar la flexibilidad en fluencia en corte de una indentación en un medio viscoelástico semi-infinito. Por simplicidad, se considera el módulo de Poisson (ν) constante en el tiempo.

$$J(t) = \frac{4R_i}{P(1-\nu)} h(t) \quad (\text{Ec. 2.30})$$

En la ecuación 2.30, $J(t)$ representa la flexibilidad en fluencia en corte de un material viscoelástico lineal en el tiempo, R_i es el radio del indentador cilíndrico, $h(t)$ corresponde a la profundidad de indentación en el tiempo, P es una carga constante aplicada por el indentador sobre el medio viscoelástico, y ν es el módulo de Poisson.

Filonzi [2013] estudió el efecto de la profundidad finita de un cuerpo viscoelástico semi-infinito. Debido a la simetría axial del problema, este se puede trabajar en dos dimensiones. En la Figura 2-6 se muestra un esquema del sistema a analizar:

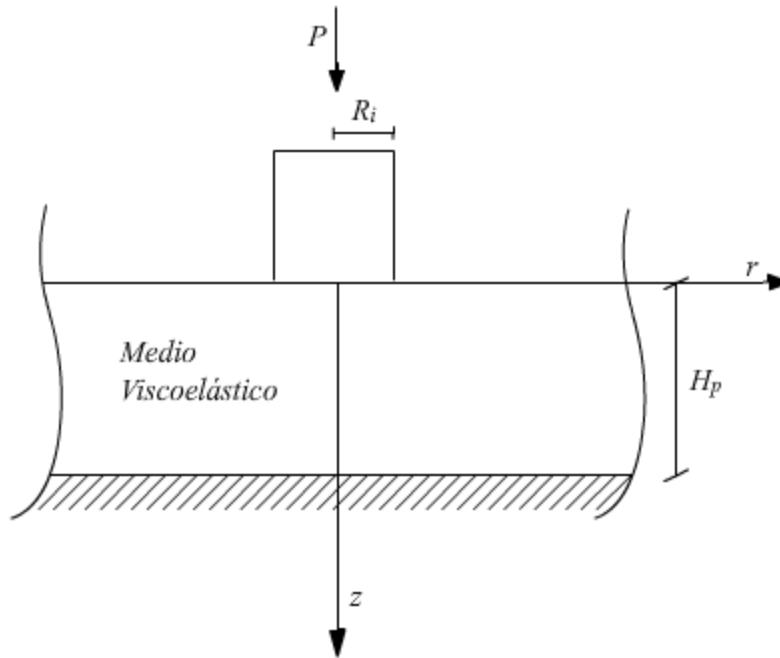


Figura 2-6: Diagrama de indentación, influenciado por el efecto de la profundidad finita en un medio viscoelástico semi-infinito, por un indentador cilíndrico

Las condiciones de borde de la superficie del material a indentar quedan expresadas como:

$$w(r, 0) = h \quad r < R_i \quad (\text{Ec. 2.31})$$

$$\sigma_{zz}(r, 0) = 0 \quad r > R_i \quad (\text{Ec. 2.32})$$

$$\sigma_{rz}(r, 0) = 0 \quad r \geq 0 \quad (\text{Ec. 2.33})$$

En donde $w(r, z)$ es el campo desplazamiento vertical, $\sigma_{zz}(r, z)$ es el esfuerzo vertical, $\sigma_{rz}(r, z)$ es el esfuerzo de corte, a es el radio de contacto y h corresponde al desplazamiento vertical bajo el indentador.

La condición de borde a lo largo de la interfaz entre el material a indentar y la base del cuerpo viscoelástico es la siguiente:

$$u(r, H_p) = w(r, H_p) = 0 \quad r \geq 0 \quad (\text{Ec. 2.34})$$

Donde $u(r, z)$ es el campo desplazamiento horizontal. La solución al problema puede ser reducida a una integral de Fredholm de segundo orden [Han et al., 2006], el cual puede ser resuelto utilizando el método numérico de cuadratura de Gauss-Legendre.

$$H(\tau) - \frac{1}{\pi} \int_0^1 [H(y)[K(y + \tau) + K(y - \tau)]] dy = F_0(\tau) \quad (\text{Ec. 2.35})$$

$$F_0(\tau) = 1 \quad (\text{Ec. 2.36})$$

A continuación, con el supuesto de una base infinitamente rígida, la carga de indentación P requerida para que un indentador cilíndrico penetre una profundidad h en un medio viscoelástico semi-infinito influenciado por el efecto de una base es [Yang y Li, 2008]:

$$P = \frac{4RGh}{(1 - \nu)} \int_0^1 H(x) dx \quad (\text{Ec. 2.37})$$

En la ecuación 2.37 G corresponde al módulo de corte del medio a indentar, y las demás variables han sido definidas anteriormente.

El desplazamiento vertical bajo un indentador cilíndrico en un medio elástico semi-infinito homogéneo h_h y el desplazamiento vertical bajo un indentador cilíndrico en un medio elástico semi-infinito influenciado por una profundidad (base) finita h_b se expresan respectivamente como:

$$h_h = \frac{(1 - \nu)}{4R_i} * \frac{P}{G} \quad (\text{Ec. 2.38})$$

$$h_b = \frac{(1 - \nu)}{4R \int_0^1 H(x) dx} * \frac{P}{G} \quad (\text{Ec. 2.39})$$

Finalmente es posible obtener el factor de corrección de borde basal representado como el cociente entre ambos desplazamientos:

$$FC_{Basal} = \frac{h_h}{h_b} = \int_0^1 H(x) dx \quad (\text{Ec. 2.40})$$

De igual forma, **Filonzi [2013]** estudió el efecto de la presencia de un borde lateral en un cuerpo viscoelástico de geometría cilíndrica de radio finito. Para almacenar los ligantes en contenedores es necesario depositarlos a altas temperaturas, donde luego al enfriarse, se mantienen perfectamente adheridos a las paredes del contenedor o probeta. Esto implica que los desplazamientos tanto horizontales como verticales en dicho borde deben ser nulos.

Para imponer la condición de desplazamiento nulo en los bordes laterales se aplica el concepto de superposición de cargas. Esto consiste en aplicar una carga ficticia de misma geometría y magnitud, pero en sentido contrario, ubicada de manera simétrica con la carga real de indentación, cuyo eje de simetría corresponde al borde lateral. Entonces para calcular el desplazamiento vertical de una indentación afectada por un borde lateral, se calcula la diferencia entre el desplazamiento vertical de una indentación justo debajo del indentador y a una distancia de dos veces el radio de la probeta (R_p).

Finalmente, el factor de corrección asociado al borde lateral queda definido como:

$$FC_{lateral} = \frac{h_h}{h_l} = \frac{w(0,0)}{w(0,0) - w(2R_p, 0)} \quad (\text{Ec. 2.41})$$

Donde h_l corresponde al desplazamiento vertical bajo un indentador cilíndrico en un medio elástico semi-infinito influenciado por el radio finito de la muestra (dimensión lateral). R_p es el radio de la probeta, h_h y $w(r, z)$ fueron definidos anteriormente.

2.2.4 Curvas de factores de corrección

Como se ha expuesto anteriormente, se han desarrollado ecuaciones que permiten obtener la curva de flexibilidad en fluencia de un material viscoelástico a partir de la curva de indentación para indentadores de geometría esférica, cilíndrica o cónica. No obstante, estas ecuaciones son válidas solo bajo el supuesto de indentación sobre un medio viscoelástico semi-infinito en donde no hay presencia de fricción entre la superficie de contacto del indentador y medio a indentar. Estos supuestos no siempre se pueden cumplir en ensayos reales debido a que las probetas poseen dimensiones finitas.

Debido a lo anterior, **Filonzi [2013]** desarrolló curvas de factores de corrección para estimar y anular los efectos que producen las dimensiones finitas de las probetas sobre la curva de indentación y de esta forma obtener curvas de indentación sobre un medio semi-infinito a partir de curvas de indentación influenciadas por el tamaño finito de la probeta.

A continuación, se exponen las curvas de factores de corrección tanto para el efecto del borde basal (Figura 2-7) y del borde lateral (Figura 2-8). Adicionalmente, es necesario destacar que estas curvas dependen solo de las variables adimensionales H_p/a y R_p/a para los factores de corrección de borde basal y lateral, respectivamente.

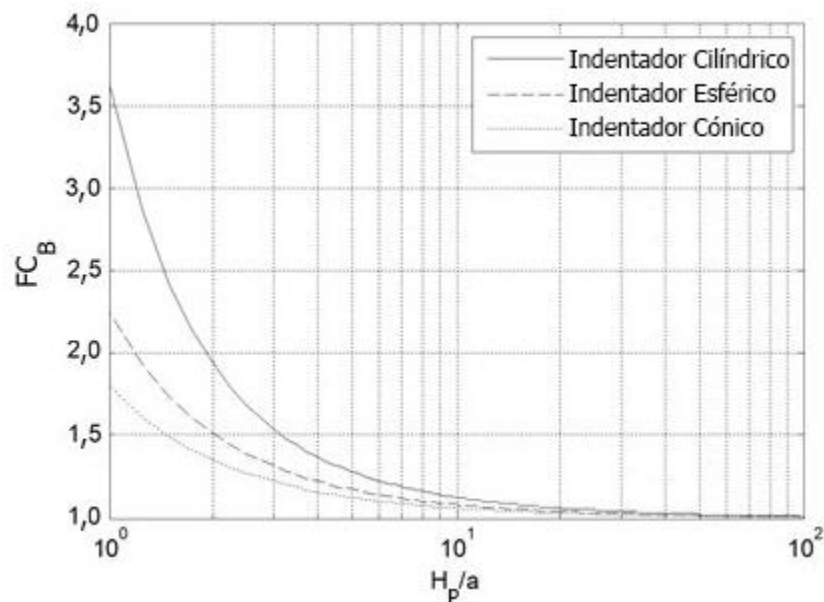


Figura 2-7: Factores de corrección de borde basal para las tres geometrías analizadas **[Filonzi, 2013]**

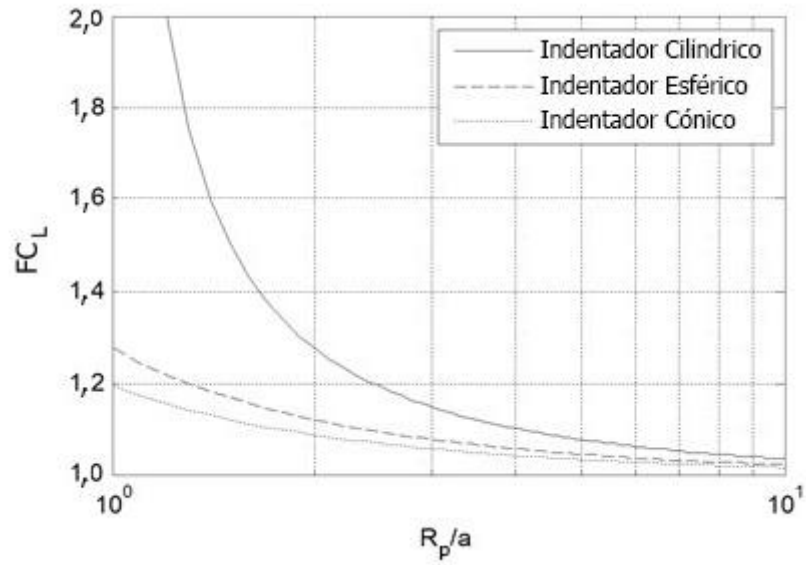


Figura 2-8: Factores de corrección de borde lateral para las tres geometrías analizadas [Filonzi, 2013]

Capítulo 3. Método de Elementos Finitos

3.1 Introducción

El método de elementos finitos (MEF) es una técnica numérica que trabaja en base a la discretización de un sistema continuo en un conjunto de elementos interconectados por puntos denominados nodos denominado sistema discreto. El comportamiento de ambos sistemas, tanto el continuo como el discreto, son definidos por las mismas ecuaciones por lo que esta discretización presenta la ventaja de pasar de un modelo continuo con infinitos grados de libertad a un modelo de grados de libertad finito, que puede ser resuelto por herramientas computacionales. En este método los nodos son las incógnitas del problema, que conectan cada elemento que contiene las propiedades del sistema. En el caso de la mecánica de sólidos las incógnitas son los desplazamientos nodales ya que a partir de estos es posible determinar las tensiones y deformaciones.

En el MEF se plantean las ecuaciones que rigen el comportamiento del sistema continuo para luego discretizar en nodos el sistema utilizando herramientas matemáticas que permiten formar un enmallado en la geometría. Luego, se obtienen ecuaciones que relacionan el comportamiento al interior de cada elemento del sistema con los grados de libertad nodales. El método se resuelve utilizando funciones de interpolación, calculando los valores por medio de análisis numérico.

3.2 Modelamiento del problema de indentación

Existen varias herramientas computacionales que utilizan el MEF (método de elementos finitos), entre las cuales podemos encontrar ABAQUS, NASTRAN, ANSYS Workbench, entre otros. Para este trabajo se utilizó la versión 19.2 del software ANSYS.

ANSYS es un software de simulación y análisis de ingeniería basado en la metodología de elementos finitos. En este software se pueden realizar simulaciones de tipo: estructural estática o dinámica, transferencia de calor, electromagnetismo, mecánica de fluidos, entre otras. Para su utilización es necesario seleccionar el tipo de simulación a utilizar ya que el software posee para cada tipo de simulación, diferentes métodos en la resolución de los cálculos. Luego se definen las propiedades de los materiales ya que todo elemento en el modelo debe tener asignado un material. El paso siguiente es determinar la geometría del problema y sobre ella generar la malla para realizar una aproximación discreta al problema en base a nodos que se conectan formando el volumen del modelo. A continuación, se aplican las condiciones de borde sobre la geometría del modelo para finalizar con la visualización de los resultados para su análisis posterior.

El modelo elaborado en este trabajo consiste en un indentador de geometría cilíndrica que aplica una carga constante sobre un medio viscoelástico de geometría igualmente cilíndrica. Se ha seleccionado un medio viscoelástico con esta geometría ya que representa la forma real de los recipientes utilizados para los ensayos de indentación. Además, los factores de corrección desarrollados analíticamente por **Filonzi [2013]** consideran este tipo de geometría.

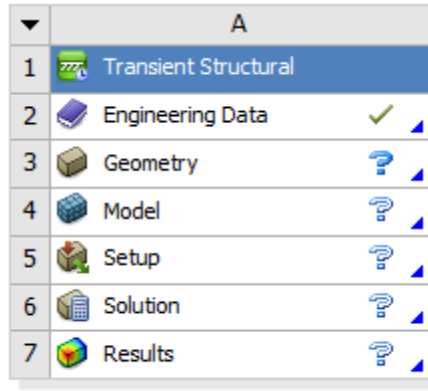
De igual modo, se ha decidido utilizar indentadores cilíndricos debido a que están asociados a menores costos computacionales para su resolución, principalmente gracias a que el área de contacto entre indentador y la superficie del medio viscoelástico se mantiene constante en todo momento.

3.2.1 Tipo de análisis

Para este trabajo el tipo de análisis utilizado en el software es el análisis transiente, el cual considera las variables de tiempo e inercias de los modelos. Este tipo de análisis presenta las siguientes características:

- Utiliza tensiones y fuerzas en función del tiempo en respuesta a cargas que pueden ser estáticas, transitorias y armónicas.
- Utilizada para determinar respuestas dinámicas de una estructura bajo cualquier carga.
- Considera los efectos de inercia y amortiguación.
- Considera un análisis más complicado con respecto a un análisis estático porque requiere más recursos computacionales por lo que los tiempos de resolución son considerables y se requieren equipos de gran capacidad.

La Figura 3-1 muestra la sección del software ANSYS 19.2, asociado al tipo de análisis descrito anteriormente:



Transient Structural

Figura 3-1: Sección del software computacional ANSYS 19.2 de análisis transiente

3.2.2 Propiedades de los materiales

Para realizar el análisis de MEF (método de elementos finitos) en ANSYS (Versión 19.2) se debe generar el material viscoelástico que se va a utilizar en el análisis. Para esto, solo basta definir las propiedades del ligante asfáltico CA-24 con el que se realiza la investigación. El software ANSYS trabaja con el modelo generalizado de Maxwell, el cual corresponde a una serie de elementos elásticos (representados por el módulo de elasticidad μ) y viscosos (representados por el coeficiente de viscosidad η) dispuestos de la forma en que se muestra en la Figura 3-2:

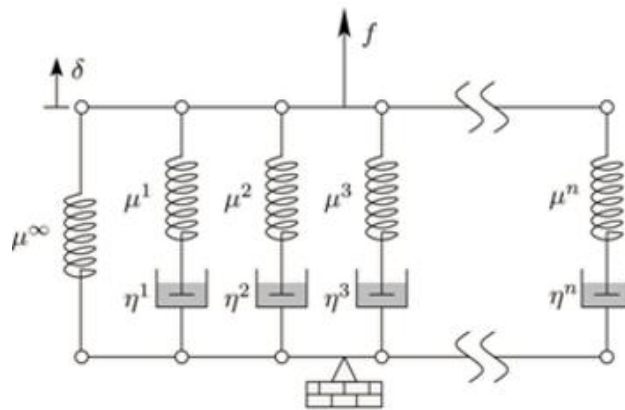


Figura 3-2: Modelo generalizado de Maxwell

Es posible describir el modelo generalizado de Maxwell utilizando Series de Prony obteniéndose la siguiente expresión:

$$G = G_0 \left(\alpha_\infty + \sum \alpha_i * e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \quad (\text{Ec. 3.1})$$

$$\alpha_i = \frac{G_i}{G_0} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

$$G_0 = G_\infty + \sum G_i \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Donde:

- G : *Módulo de corte elástico*
- α_i : *Módulos relativos en series Prony*
- τ : *Tiempo de relajación en series Prony*
- G_0 : *Módulo de corte elástico al tiempo $t=0$*
- G_∞ : *Módulo de corte elástico del material totalmente relajado*

El software ANSYS cuenta con la capacidad de obtener los valores de α , τ y G_0 una vez ingresada la curva del módulo de relajación del material. Para tal motivo se ha obtenido una curva de flexibilidad en fluencia de un ligante asfáltico del tipo CA-24 y resolviendo la integral de convolución que relaciona la flexibilidad en fluencia con el módulo de relajación, se ha obtenido la curva del módulo de relajación [Ferry, 1980], la cual es ingresada en el software.

Con el fin de generar y determinar las propiedades del material que se desea modelar en ANSYS, se ingresa a la sección "Engineering Data" del módulo de análisis transiente tal como se muestra en la siguiente Figura 3-3:

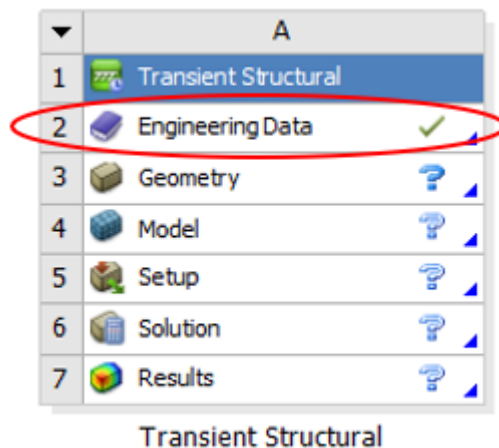


Figura 3-3: Sección "Engineering Data" en software ANSYS 19.2

En la biblioteca de propiedades de materiales del software existe una gran variedad de herramientas que permiten configurar y determinar las características del material con el que se desea trabajar. Dos de estas herramientas permiten definir al material viscoelástico, las cuales corresponden a “*Shear Data – Viscoelastic*” y “*Prony Shear Relaxation*”. Para que el material represente bien el comportamiento se requiere ingresar la curva del módulo de relajación en una de estas herramientas de tal forma que, realizando un ajuste de curva, ANSYS obtenga los parámetros a ingresar para desarrollar la Serie de Prony. En la Figura 3-4 se muestran las herramientas que se utilizan:

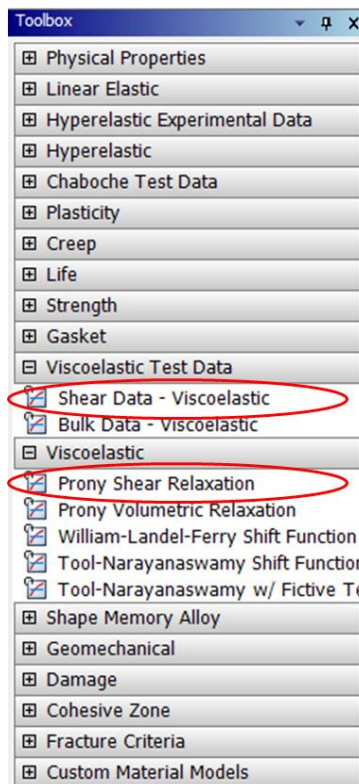


Figura 3-4: Herramientas material viscoelástico en biblioteca de ANSYS 19.2

Como se ha mencionado anteriormente, en la herramienta “*Shear Data – Viscoelastic*” se debe ingresar la curva del módulo de relajación del material a modelar mostrada a continuación, la cual ha sido obtenida a través de la interconversión de la curva de flexibilidad en fluencia de un ligante asfáltico del tipo CA-24, obtenida utilizando el equipo reómetro de corte dinámico. Dicha curva de flexibilidad en fluencia ha sido ajustada a una función potencial obteniéndose:

$$J(t) = 0,0016 * t^{0,91} \left[\frac{1}{kPa} \right] \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Para llevar a cabo la interconversión se utiliza el método de interconversión aproximado, basado en el concepto de tiempo equivalente, desarrollado por **Park y Kim [1999]**. Este método considera la siguiente interrelación entre la curva de flexibilidad en fluencia y curva del módulo de relajación:

$$J(t) * E(t^*) = 1 \quad (\text{Ec. 3.4})$$

En donde $J(\tau)$, corresponde a la curva flexibilidad en fluencia, $E(\tau)$ es la curva del módulo de relajación, t es el tiempo y t^* corresponde al tiempo equivalente. La ecuación 3.5 muestra la relación entre el tiempo y el tiempo equivalente.

$$t^* = \left(\frac{\sin(n * \pi)}{n * \pi} \right)^{\frac{1}{n}} * t \quad (\text{Ec. 3.5})$$

En donde n corresponde a la pendiente local a un tiempo τ de la representación logarítmica de $J(t)$, es decir:

$$n = \left| \frac{d \log(J(\tau))}{d \log(\tau)} \right|_{\tau=t} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Dado que la curva de flexibilidad en fluencia utilizada se ajusta a una función potencial, el valor de n es constante en cada punto de la representación logarítmica, tomando un valor de 0,91. Finalmente reemplazado la ecuación 3.5 en la ecuación 3.4 se obtiene la curva del módulo de relajación $E(t)$:

$$E(t) = 60,99 * t^{-0,91} \text{ [kPa]} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

En la Figura 3-5 se muestra la curva del módulo de relajación ingresada en el software.

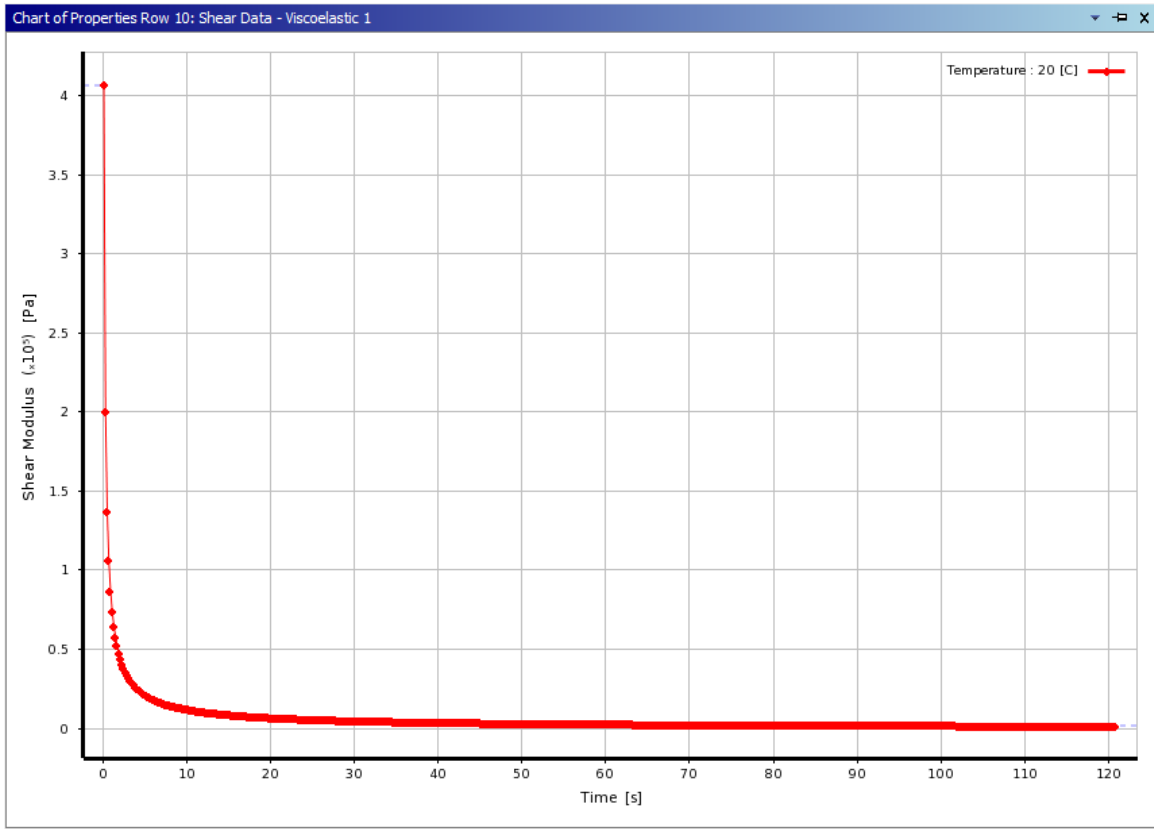


Figura 3-5: Curva del módulo de relajación ingresada en el software ANSYS 19.2

En el software ANSYS es posible realizar un ajuste de curva a la función entregada en la opción de “*Shear Data - Viscoelastic*” para que entregue los parámetros asociados a las Series de Prony y que deben ser ingresadas en la herramienta de “*Prony Shear Relaxation*” en donde quedarán determinadas las propiedades viscoelásticas del material que se utilizarán en el modelo computacional. La Figura 3-6 muestra las herramientas utilizadas dentro de la biblioteca de propiedades de materiales para determinar las propiedades anteriormente mencionadas.

14	Prony Shear Relaxation	Tabular
15	Number of Terms	100
16	Relative Moduli(): Scale	1
17	Relative Moduli(): Offset	0
18	Relaxation Time(): Scale	1
19	Relaxation Time(): Offset	0
20	Curve Fitting	Fit Type: Prony Shear Relaxation
21	Error Norm for Fit	Normalized Error
22	Shear Data - Viscoelastic 1	Tabular

Figura 3-6: Ajuste de la curva de series de Prony en biblioteca de propiedades de materiales de ANSYS 19.2

La Tabla 3-1 muestra los valores de los parámetros obtenidos del ajuste de curva y que deben ser ingresados en la herramienta asociada a las Series de Prony.

Tabla 3-1: Parámetros Series de Prony entregados por el software ANSYS, a partir de los parámetros de un ligante asfáltico del tipo CA-24 utilizado como referencia para el análisis


	B	C	D	E	F	G	H
1	Coefficient Name 	Index i	Seed Value	Seed Unit	Fix Seed Value	Calculated Value	Calculated Unit
2	Relaxation Time(i)	1	1	s	<input type="checkbox"/>	31,617	s
3	Relaxation Time(i)	2	1	s	<input type="checkbox"/>	1,5383	s
4	Relaxation Time(i)	3	1	s	<input type="checkbox"/>	2,5461	s
5	Relaxation Time(i)	4	1	s	<input type="checkbox"/>	0,92898	s
6	Relaxation Time(i)	5	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55214	s
7	Relaxation Time(i)	6	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55122	s
8	Relaxation Time(i)	7	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55187	s
9	Relaxation Time(i)	8	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55184	s
10	Relaxation Time(i)	9	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55196	s
11	Relaxation Time(i)	10	1	s	<input type="checkbox"/>	1,5491	s
12	Relaxation Time(i)	11	1	s	<input type="checkbox"/>	0,5582	s
13	Relaxation Time(i)	12	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55017	s
14	Relaxation Time(i)	13	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55165	s
15	Relaxation Time(i)	14	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55182	s
16	Relaxation Time(i)	15	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55214	s
17	Relaxation Time(i)	16	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55188	s
18	Relaxation Time(i)	17	1	s	<input type="checkbox"/>	1,5496	s
19	Relaxation Time(i)	18	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55201	s
20	Relaxation Time(i)	19	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55177	s
21	Relaxation Time(i)	20	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55161	s
22	Relaxation Time(i)	21	1	s	<input type="checkbox"/>	2,8213	s
23	Relaxation Time(i)	22	1	s	<input type="checkbox"/>	1,5419	s
24	Relaxation Time(i)	23	1	s	<input type="checkbox"/>	1,5423	s
25	Relaxation Time(i)	24	1	s	<input type="checkbox"/>	4,057	s
26	Relaxation Time(i)	25	1	s	<input type="checkbox"/>	8,0338	s
27	Relaxation Time(i)	26	1	s	<input type="checkbox"/>	1,5409	s
28	Relaxation Time(i)	27	1	s	<input type="checkbox"/>	1,5466	s
29	Relaxation Time(i)	28	1	s	<input type="checkbox"/>	13,953	s
30	Relaxation Time(i)	29	1	s	<input type="checkbox"/>	5,4629	s
31	Relaxation Time(i)	30	1	s	<input type="checkbox"/>	30,272	s
32	Relaxation Time(i)	31	1	s	<input type="checkbox"/>	5,8244	s
33	Relaxation Time(i)	32	1	s	<input type="checkbox"/>	15,824	s
34	Relaxation Time(i)	33	1	s	<input type="checkbox"/>	29,234	s
35	Relaxation Time(i)	34	1	s	<input type="checkbox"/>	29,841	s
36	Relaxation Time(i)	35	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55216	s
37	Relaxation Time(i)	36	1	s	<input type="checkbox"/>	1,5421	s
38	Relaxation Time(i)	37	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55213	s
39	Relaxation Time(i)	38	1	s	<input type="checkbox"/>	2,8137	s
40	Relaxation Time(i)	39	1	s	<input type="checkbox"/>	44,912	s
41	Relaxation Time(i)	40	1	s	<input type="checkbox"/>	52,897	s
42	Relaxation Time(i)	41	1	s	<input type="checkbox"/>	39,661	s
43	Relaxation Time(i)	42	1	s	<input type="checkbox"/>	45,854	s
44	Relaxation Time(i)	43	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55213	s
45	Relaxation Time(i)	44	1	s	<input type="checkbox"/>	16,739	s

Tabla 3-2: Parámetros Series de Prony entregados por el software ANSYS, a partir de los parámetros de un ligante asfáltico del tipo CA-24 utilizado como referencia para el análisis (Continuación)

46	Relaxation Time(t)	45	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55213	s
47	Relaxation Time(t)	46	1	s	<input type="checkbox"/>	18,126	s
48	Relaxation Time(t)	47	1	s	<input type="checkbox"/>	14,793	s
49	Relaxation Time(t)	48	1	s	<input type="checkbox"/>	15,354	s
50	Relaxation Time(t)	49	1	s	<input type="checkbox"/>	5,7906	s
51	Relaxation Time(t)	50	1	s	<input type="checkbox"/>	12,279	s
52	Relaxation Time(t)	51	1	s	<input type="checkbox"/>	14,647	s
53	Relaxation Time(t)	52	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55199	s
54	Relaxation Time(t)	53	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55214	s
55	Relaxation Time(t)	54	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55187	s
56	Relaxation Time(t)	55	1	s	<input type="checkbox"/>	1,5414	s
57	Relaxation Time(t)	56	1	s	<input type="checkbox"/>	3,8013	s
58	Relaxation Time(t)	57	1	s	<input type="checkbox"/>	2,8562	s
59	Relaxation Time(t)	58	1	s	<input type="checkbox"/>	19,78	s
60	Relaxation Time(t)	59	1	s	<input type="checkbox"/>	58,211	s
61	Relaxation Time(t)	60	1	s	<input type="checkbox"/>	15,64	s
62	Relaxation Time(t)	61	1	s	<input type="checkbox"/>	6,0733	s
63	Relaxation Time(t)	62	1	s	<input type="checkbox"/>	6,1181	s
64	Relaxation Time(t)	63	1	s	<input type="checkbox"/>	5,3915	s
65	Relaxation Time(t)	64	1	s	<input type="checkbox"/>	8,0935	s
66	Relaxation Time(t)	65	1	s	<input type="checkbox"/>	15,122	s
67	Relaxation Time(t)	66	1	s	<input type="checkbox"/>	32,518	s
68	Relaxation Time(t)	67	1	s	<input type="checkbox"/>	24,249	s
69	Relaxation Time(t)	68	1	s	<input type="checkbox"/>	15,697	s
70	Relaxation Time(t)	69	1	s	<input type="checkbox"/>	63,566	s
71	Relaxation Time(t)	70	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55191	s
72	Relaxation Time(t)	71	1	s	<input type="checkbox"/>	16,713	s
73	Relaxation Time(t)	72	1	s	<input type="checkbox"/>	15,152	s
74	Relaxation Time(t)	73	1	s	<input type="checkbox"/>	15,499	s
75	Relaxation Time(t)	74	1	s	<input type="checkbox"/>	21,184	s
76	Relaxation Time(t)	75	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55214	s
77	Relaxation Time(t)	76	1	s	<input type="checkbox"/>	42,622	s
78	Relaxation Time(t)	77	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55214	s
79	Relaxation Time(t)	78	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55215	s
80	Relaxation Time(t)	79	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55214	s
81	Relaxation Time(t)	80	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55215	s
82	Relaxation Time(t)	81	1	s	<input type="checkbox"/>	11,049	s
83	Relaxation Time(t)	82	1	s	<input type="checkbox"/>	14,301	s
84	Relaxation Time(t)	83	1	s	<input type="checkbox"/>	36,534	s
85	Relaxation Time(t)	84	1	s	<input type="checkbox"/>	41,112	s
86	Relaxation Time(t)	85	1	s	<input type="checkbox"/>	10,168	s
87	Relaxation Time(t)	86	1	s	<input type="checkbox"/>	16,796	s
88	Relaxation Time(t)	87	1	s	<input type="checkbox"/>	15,099	s
89	Relaxation Time(t)	88	1	s	<input type="checkbox"/>	16,39	s

Tabla 3-3: Parámetros Series de Prony entregados por el software ANSYS, a partir de los parámetros de un ligante asfáltico del tipo CA-24 utilizado como referencia para el análisis (Continuación)

90	Relaxation Time(i)	89	1	s	<input type="checkbox"/>	43,828	s
91	Relaxation Time(i)	90	1	s	<input type="checkbox"/>	39,1	s
92	Relaxation Time(i)	91	1	s	<input type="checkbox"/>	17,413	s
93	Relaxation Time(i)	92	1	s	<input type="checkbox"/>	18,338	s
94	Relaxation Time(i)	93	1	s	<input type="checkbox"/>	21,01	s
95	Relaxation Time(i)	94	1	s	<input type="checkbox"/>	0,55214	s
96	Relaxation Time(i)	95	1	s	<input type="checkbox"/>	34,498	s
97	Relaxation Time(i)	96	1	s	<input type="checkbox"/>	43,443	s
98	Relaxation Time(i)	97	1	s	<input type="checkbox"/>	41,451	s
99	Relaxation Time(i)	98	1	s	<input type="checkbox"/>	1,5489	s
100	Relaxation Time(i)	99	1	s	<input type="checkbox"/>	21,887	s
101	Relaxation Time(i)	100	1	s	<input type="checkbox"/>	90,863	s
102	Residual	0	0		<input type="checkbox"/>	5,0583E-06	
103	Shear Modulus at Time ∞	0	1	Pa	<input type="checkbox"/>	38,524	Pa
104	SQRT(Shear Modulus(i))	1	1		<input type="checkbox"/>	12,641	
105	SQRT(Shear Modulus(i))	2	1		<input type="checkbox"/>	153,28	
106	SQRT(Shear Modulus(i))	3	1		<input type="checkbox"/>	142,2	
107	SQRT(Shear Modulus(i))	4	1		<input type="checkbox"/>	119,85	
108	SQRT(Shear Modulus(i))	5	1		<input type="checkbox"/>	67,978	
109	SQRT(Shear Modulus(i))	6	1		<input type="checkbox"/>	117,05	
110	SQRT(Shear Modulus(i))	7	1		<input type="checkbox"/>	111,78	
111	SQRT(Shear Modulus(i))	8	1		<input type="checkbox"/>	112,8	
112	SQRT(Shear Modulus(i))	9	1		<input type="checkbox"/>	107,74	
113	SQRT(Shear Modulus(i))	10	1		<input type="checkbox"/>	53,175	
114	SQRT(Shear Modulus(i))	11	1		<input type="checkbox"/>	121,27	
115	SQRT(Shear Modulus(i))	12	1		<input type="checkbox"/>	118,25	
116	SQRT(Shear Modulus(i))	13	1		<input type="checkbox"/>	115,24	
117	SQRT(Shear Modulus(i))	14	1		<input type="checkbox"/>	113,2	
118	SQRT(Shear Modulus(i))	15	1		<input type="checkbox"/>	68,32	
119	SQRT(Shear Modulus(i))	16	1		<input type="checkbox"/>	111,75	
120	SQRT(Shear Modulus(i))	17	1		<input type="checkbox"/>	52,075	
121	SQRT(Shear Modulus(i))	18	1		<input type="checkbox"/>	103,23	
122	SQRT(Shear Modulus(i))	19	1		<input type="checkbox"/>	114,02	
123	SQRT(Shear Modulus(i))	20	1		<input type="checkbox"/>	115,56	
124	SQRT(Shear Modulus(i))	21	1		<input type="checkbox"/>	47,953	
125	SQRT(Shear Modulus(i))	22	1		<input type="checkbox"/>	81,391	
126	SQRT(Shear Modulus(i))	23	1		<input type="checkbox"/>	78,622	
127	SQRT(Shear Modulus(i))	24	1		<input type="checkbox"/>	88,762	
128	SQRT(Shear Modulus(i))	25	1		<input type="checkbox"/>	33,847	
129	SQRT(Shear Modulus(i))	26	1		<input type="checkbox"/>	90,791	
130	SQRT(Shear Modulus(i))	27	1		<input type="checkbox"/>	59,191	
131	SQRT(Shear Modulus(i))	28	1		<input type="checkbox"/>	31,211	
132	SQRT(Shear Modulus(i))	29	1		<input type="checkbox"/>	39,132	
133	SQRT(Shear Modulus(i))	30	1		<input type="checkbox"/>	12,634	

Tabla 3-4: Parámetros Series de Prony entregados por el software ANSYS, a partir de los parámetros de un ligante asfáltico del tipo CA-24 utilizado como referencia para el análisis (Continuación)

133	SQRT(Shear Modulus(i))	30	1		<input type="checkbox"/>	12,634	
134	SQRT(Shear Modulus(i))	31	1		<input type="checkbox"/>	89,024	
135	SQRT(Shear Modulus(i))	32	1		<input type="checkbox"/>	22,868	
136	SQRT(Shear Modulus(i))	33	1		<input type="checkbox"/>	12,688	
137	SQRT(Shear Modulus(i))	34	1		<input type="checkbox"/>	12,65	
138	SQRT(Shear Modulus(i))	35	1		<input type="checkbox"/>	59,927	
139	SQRT(Shear Modulus(i))	36	1		<input type="checkbox"/>	80,227	
140	SQRT(Shear Modulus(i))	37	1		<input type="checkbox"/>	75,131	
141	SQRT(Shear Modulus(i))	38	1		<input type="checkbox"/>	48,432	
142	SQRT(Shear Modulus(i))	39	1		<input type="checkbox"/>	16,506	
143	SQRT(Shear Modulus(i))	40	1		<input type="checkbox"/>	21,324	
144	SQRT(Shear Modulus(i))	41	1		<input type="checkbox"/>	14,258	
145	SQRT(Shear Modulus(i))	42	1		<input type="checkbox"/>	16,991	
146	SQRT(Shear Modulus(i))	43	1		<input type="checkbox"/>	75,96	
147	SQRT(Shear Modulus(i))	44	1		<input type="checkbox"/>	20,112	
148	SQRT(Shear Modulus(i))	45	1		<input type="checkbox"/>	73,106	
149	SQRT(Shear Modulus(i))	46	1		<input type="checkbox"/>	17,843	
150	SQRT(Shear Modulus(i))	47	1		<input type="checkbox"/>	29,067	
151	SQRT(Shear Modulus(i))	48	1		<input type="checkbox"/>	25,352	
152	SQRT(Shear Modulus(i))	49	1		<input type="checkbox"/>	37,993	
153	SQRT(Shear Modulus(i))	50	1		<input type="checkbox"/>	32,405	
154	SQRT(Shear Modulus(i))	51	1		<input type="checkbox"/>	29,681	
155	SQRT(Shear Modulus(i))	52	1		<input type="checkbox"/>	105,77	
156	SQRT(Shear Modulus(i))	53	1		<input type="checkbox"/>	67,831	
157	SQRT(Shear Modulus(i))	54	1		<input type="checkbox"/>	111,95	
158	SQRT(Shear Modulus(i))	55	1		<input type="checkbox"/>	86,099	
159	SQRT(Shear Modulus(i))	56	1		<input type="checkbox"/>	41,466	
160	SQRT(Shear Modulus(i))	57	1		<input type="checkbox"/>	46,441	
161	SQRT(Shear Modulus(i))	58	1		<input type="checkbox"/>	16,198	
162	SQRT(Shear Modulus(i))	59	1		<input type="checkbox"/>	25,327	
163	SQRT(Shear Modulus(i))	60	1		<input type="checkbox"/>	23,705	
164	SQRT(Shear Modulus(i))	61	1		<input type="checkbox"/>	36,712	
165	SQRT(Shear Modulus(i))	62	1		<input type="checkbox"/>	36,528	
166	SQRT(Shear Modulus(i))	63	1		<input type="checkbox"/>	88,834	
167	SQRT(Shear Modulus(i))	64	1		<input type="checkbox"/>	33,818	
168	SQRT(Shear Modulus(i))	65	1		<input type="checkbox"/>	26,993	
169	SQRT(Shear Modulus(i))	66	1		<input type="checkbox"/>	12,693	
170	SQRT(Shear Modulus(i))	67	1		<input type="checkbox"/>	13,746	
171	SQRT(Shear Modulus(i))	68	1		<input type="checkbox"/>	23,43	
172	SQRT(Shear Modulus(i))	69	1		<input type="checkbox"/>	29,934	
173	SQRT(Shear Modulus(i))	70	1		<input type="checkbox"/>	110,45	
174	SQRT(Shear Modulus(i))	71	1		<input type="checkbox"/>	20,169	
175	SQRT(Shear Modulus(i))	72	1		<input type="checkbox"/>	26,773	
176	SQRT(Shear Modulus(i))	73	1		<input type="checkbox"/>	24,455	

Tabla 3-5: Parámetros Series de Prony entregados por el software ANSYS, a partir de los parámetros de un ligante asfáltico del tipo CA-24 utilizado como referencia para el análisis (Continuación)

176	SQRT(Shear Modulus(i))	73	1		<input type="checkbox"/>	24,455	
177	SQRT(Shear Modulus(i))	74	1		<input type="checkbox"/>	15,209	
178	SQRT(Shear Modulus(i))	75	1		<input type="checkbox"/>	69,613	
179	SQRT(Shear Modulus(i))	76	1		<input type="checkbox"/>	15,426	
180	SQRT(Shear Modulus(i))	77	1		<input type="checkbox"/>	71,77	
181	SQRT(Shear Modulus(i))	78	1		<input type="checkbox"/>	64,897	
182	SQRT(Shear Modulus(i))	79	1		<input type="checkbox"/>	68,205	
183	SQRT(Shear Modulus(i))	80	1		<input type="checkbox"/>	62,326	
184	SQRT(Shear Modulus(i))	81	1		<input type="checkbox"/>	32,832	
185	SQRT(Shear Modulus(i))	82	1		<input type="checkbox"/>	30,635	
186	SQRT(Shear Modulus(i))	83	1		<input type="checkbox"/>	13,337	
187	SQRT(Shear Modulus(i))	84	1		<input type="checkbox"/>	14,796	
188	SQRT(Shear Modulus(i))	85	1		<input type="checkbox"/>	33,091	
189	SQRT(Shear Modulus(i))	86	1		<input type="checkbox"/>	19,987	
190	SQRT(Shear Modulus(i))	87	1		<input type="checkbox"/>	27,163	
191	SQRT(Shear Modulus(i))	88	1		<input type="checkbox"/>	20,964	
192	SQRT(Shear Modulus(i))	89	1		<input type="checkbox"/>	15,976	
193	SQRT(Shear Modulus(i))	90	1		<input type="checkbox"/>	14,068	
194	SQRT(Shear Modulus(i))	91	1		<input type="checkbox"/>	18,846	
195	SQRT(Shear Modulus(i))	92	1		<input type="checkbox"/>	17,589	
196	SQRT(Shear Modulus(i))	93	1		<input type="checkbox"/>	15,318	
197	SQRT(Shear Modulus(i))	94	1		<input type="checkbox"/>	69,928	
198	SQRT(Shear Modulus(i))	95	1		<input type="checkbox"/>	12,929	
199	SQRT(Shear Modulus(i))	96	1		<input type="checkbox"/>	15,796	
200	SQRT(Shear Modulus(i))	97	1		<input type="checkbox"/>	14,932	
201	SQRT(Shear Modulus(i))	98	1		<input type="checkbox"/>	53,579	
202	SQRT(Shear Modulus(i))	99	1		<input type="checkbox"/>	14,802	
203	SQRT(Shear Modulus(i))	100	1		<input type="checkbox"/>	61,449	
*					<input type="checkbox"/>		

Además de las propiedades viscoelásticas es necesario, para desarrollar el análisis, utilizar las herramientas de la biblioteca del software ANSYS asociadas a la densidad volumétrica y a las propiedades elásticas del ligante. Se ingresa una densidad típica para este tipo de ligante CA-24, con un valor de $1,015 \text{ kg m}^{-3}$. Con respecto a las propiedades elásticas, éstas son ingresadas con el ajuste de las Series de Prony, y solo es necesario seleccionar el valor del módulo de Poisson. Estudios previos [Benedetto et al., 2007], indican que, para una temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y baja frecuencia de carga, se puede considerar un valor de módulo de Poisson constante de 0,5. Dado que la solución se indetermina al ingresar en el software un valor del módulo de Poisson de 0,5, se utiliza para este trabajo y a lo largo de toda esta sección, un valor constante de 0,49999. La Figura 3-7 muestra las herramientas aplicadas a la biblioteca de propiedades del material para determinar lo anteriormente mencionado.

Property	Value	Unit
Density	1,015	kg m ⁻³
Isotropic Elasticity		
Derive from	Shear Modulus and Poi...	
Young's Modulus	8,8388E+05	Pa
Poisson's Ratio	0,49999	
Bulk Modulus	1,4731E+10	Pa
Shear Modulus	2,9463E+05	Pa

Figura 3-7: Propiedades de elasticidad y densidad en ANSYS 19.2

3.2.3 Geometría y enmallado

Las geometrías por simular son dos cilindros de distintos tamaños, el más pequeño en la superficie del más grande, donde el cilindro superior representa un cuerpo rígido siendo el indentador y el cilindro inferior representa al ligante asfáltico a indentar. Las dimensiones tanto de la altura como del radio de estos cilindros son variadas en este estudio de acuerdo con los resultados que se desean obtener de las simulaciones. La geometría se establece en la sección “*Geometry*” del módulo transiente del software ANSYS como muestra la Figura 3-8.

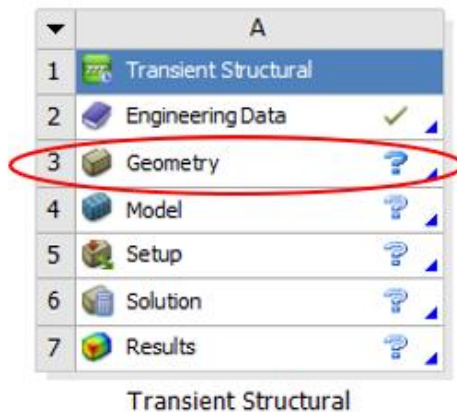


Figura 3-8: Sección “*Geometry*” en el software ANSYS 19.2

Con el fin de acelerar los procesos computacionales se utilizan modelos 2D axisimétricos, conformado por dos rectángulos cuyos lados basales simbolizan los radios de los cilindros. Sin embargo, de igual forma se confecciona un modelo 3D para corroborar que se obtienen los mismos resultados con ambos modelos. Las Figuras 3-9 y 3-10 muestran la geometría del modelo en 3D y 2D, respectivamente.

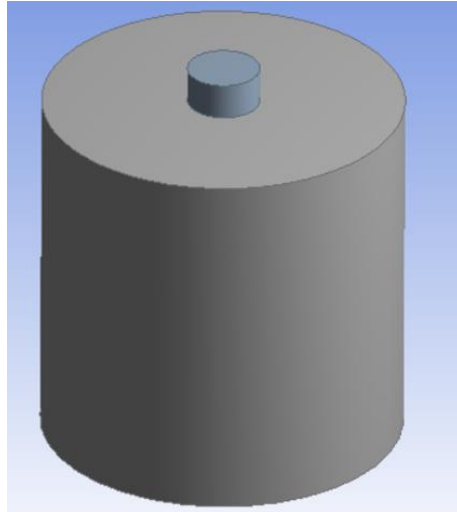


Figura 3-9: Geometría 3D del modelo en el software computacional ANSYS 19.2

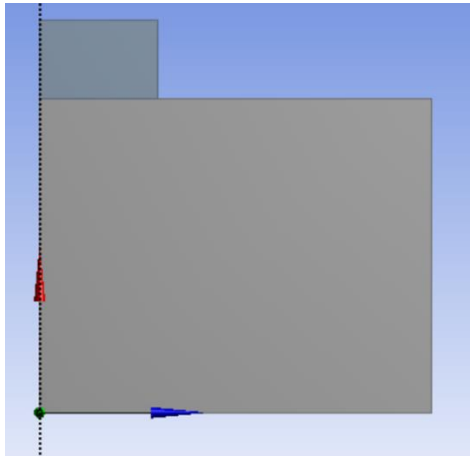


Figura 3-10: Geometría 2D del modelo axisimétrico en el software computacional ANSYS 19.2

El enmallado es una etapa de las más importantes en el método de elementos finitos, en donde se definen el tipo y características de la malla, modelos de elementos a utilizar y calidad de éstos. La calidad de la malla tiene relación con la finura del tamaño de sus elementos, en donde a menor tamaño se mejora la precisión de los resultados. Es por esto que la calidad afecta de forma notable en los resultados y en los tiempos computacionales requeridos para llegar a ellos. Algunos parámetros por considerar al momento de establecer la configuración de la malla son los siguientes:

- Se recomienda que la razón entre el lado más largo y el más corto de un elemento tenga un valor cercano a 1.
- En las zonas donde se produzcan cambios bruscos en la forma de la superficie se debe colocar una mayor cantidad de elementos.
- Idealmente la forma de los elementos de la malla debe ser lo más parecido posible a la forma de la configuración global de la cara.
- Se aconseja utilizar elementos simétricos con el fin de mejorar la calidad de la malla.
- Entre mejor sea la calidad ortogonal del elemento, mejor será la calidad de la malla.

En caso de que el mallado sea inadecuado el software ANSYS entrega un mensaje de error indicando que las características de la malla no cumplen lo necesario para realizar una adecuada simulación. El enmallado se configura en la sección “*Model*” del módulo transiente del software como muestra la Figura 3-11.

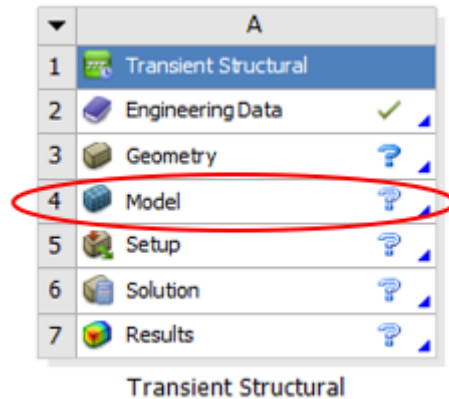


Figura 3-11: Sección “*Model*” en el software computacional ANSYS 19.2

Para el caso del modelo en 3D se utilizan elementos hexaédricos de segundo orden de tamaño variable de acuerdo con el refinado requerido para el mallado. El refinado requerido es aquel que se logra iterando las simulaciones afinando y mejorando la calidad de la malla hasta lograr la convergencia de los resultados. Para tener una idea en la Figura 3-12 se puede visualizar la configuración de la malla de la geometría en cuestión.

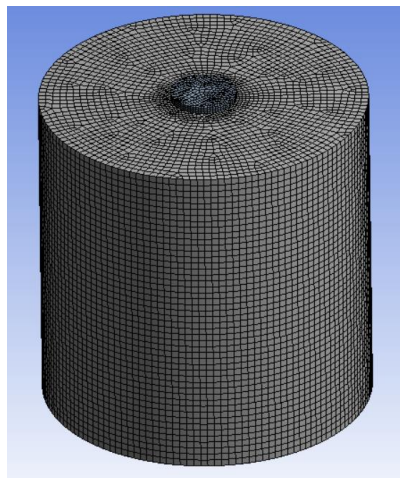


Figura 3-12: Enmallado del modelo 3D en el software computacional ANSYS 19.2

Con respecto al modelo axisimétrico en 2D, el mallado utilizado está conformado por elementos triangulares de segundo orden ya que ayudan a cubrir de manera eficiente las zonas donde ocurren los mayores esfuerzos. Asimismo, se utiliza un método que ofrece el software ANSYS llamado “Esfera de Influencia” para lograr un mallado más fino alrededor de la zona de carga, en donde el centro de esta esfera se encuentra en la intersección entre el eje de simetría y el eje de contacto entre el indentador y el material a indentar. Similar al caso del modelo 3D, el tamaño de los elementos utilizado es aquel que logra la convergencia de los resultados después de iterar simulaciones. La convergencia es lograda cuando la diferencia entre los resultados de dos simulaciones, de distinta calidad de mallado, es menor a 5%. En la figura 3-13 se puede observar la geometría de la malla para el modelo axisimétrico.

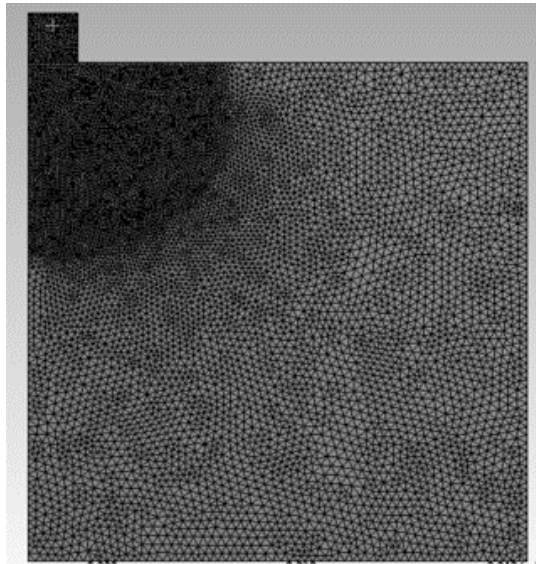


Figura 3-13: Enmallado del modelo axisimétrico 2D en el software computacional ANSYS 19.2

3.2.4 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno son todas aquellas fuerzas y desplazamientos a los cuales está sometido en el MEF. Para el modelo en estudio, la primera condición a definir tiene relación al tipo de contacto entre el cuerpo rígido (indentador) y el cuerpo viscoelástico a indentar. En el software ANSYS 19.2, el contacto entre dos cuerpos se identifica automáticamente cuando ambos cuerpos están lo suficientemente cercanos, aun así, es posible establecer manualmente una condición de contacto entre dos cuerpos. En la Figura 3-14 se muestran los tipos de contactos que ofrece el software.

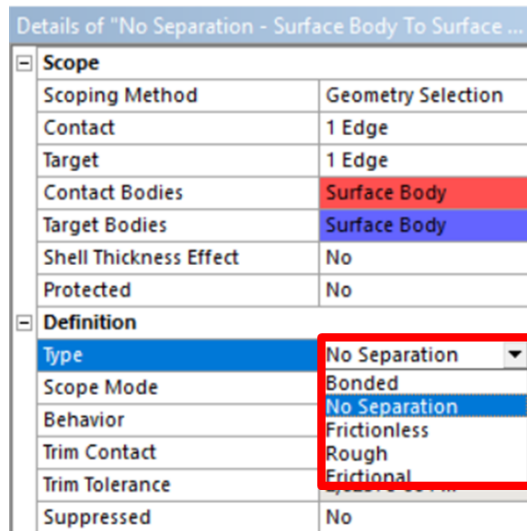


Figura 3-14: Tipos de contactos en el software computacional ANSYS 19.2

A continuación, se detallan las características de cada uno de los cinco tipos de contactos que ofrece el software ANSYS:

- El tipo de contacto *"Bonded"* impide que ambas caras en contacto de los cuerpos se deslicen tanto en la dirección tangencial como en dirección normal.
- El tipo de contacto *"No Separation"* provoca que una vez detectado el contacto entre ambos cuerpos, ambas superficies se atan para el resto del análisis, permitiendo el deslizamiento de forma tangencial de las superficies, pero no en la dirección normal.
- El tipo de contacto *"Frictionless"* permite el deslizamiento tangencial entre las superficies en contacto además de la separación en la dirección normal.
- El tipo de contacto *"Rough"* impide el deslizamiento tangencial de las superficies en contacto emulando un coeficiente de roce de valor infinito. Sin embargo, permite la separación normal de las superficies en contacto.
- El tipo de contacto *"Frictional"* recibe un valor de entrada que corresponde al coeficiente de roce o fricción. Este tipo de contacto permite la separación de las superficies en la dirección normal y en caso de existir desplazamiento tangencial, aplica una fuerza de roce en sentido contrario al desplazamiento.

El tipo de contacto *"No separation"* es aquel que se utiliza en el modelo para el presente estudio, puesto que refleja adecuadamente el comportamiento del contacto en los ensayos de indentación realizados en el laboratorio.

Posteriormente se definen las condiciones de borde para el caso del modelo 3D. Esto consiste en restringir el movimiento lateral y movimiento basal del material a indentar, haciendo uso de la condición de soporte del software ANSYS *"Fixed Support"* en dichas caras emulando una condición de empotramiento. Asimismo, se agrega la fuerza sobre la superficie superior del cuerpo rígido que actúa como indentador.

Por otra parte, el modelo 2D axisimétrico recibe una carga sobre la cara superior del cuerpo rígido y empotramiento (*"Fixed Support"*) en la cara basal y cara contraria al eje de simetría del sistema. A lo largo del eje de simetría se impide el desplazamiento transversal al mismo debido a

que en una condición perfectamente simétrica no deberían producirse movimientos en dicha dirección de dichos puntos. La Figura 3-15 presenta un esquema del modelo 2D axisimétrico.

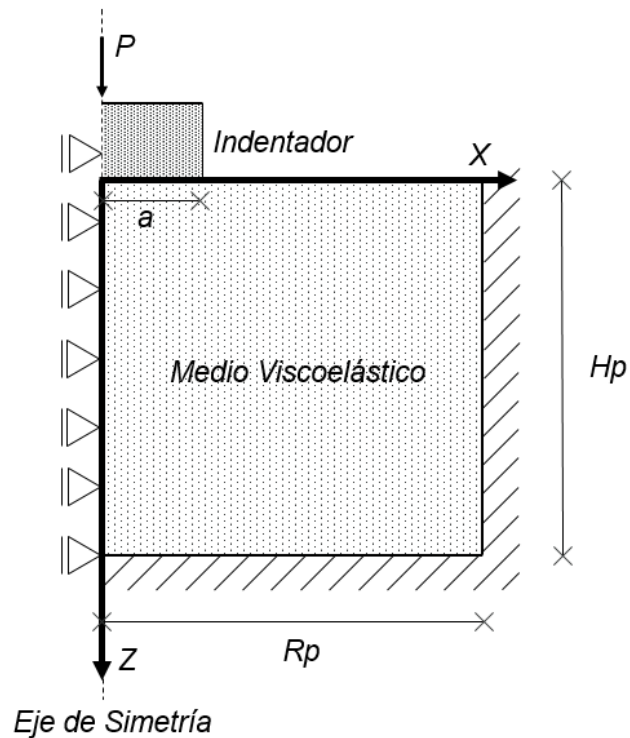


Figura 3-15: Esquema del modelo 2D axisimétrico en el software computacional ANSYS

Donde:

P : Carga constante aplicada por el indente

a : Radio de contacto entre el indente y el material a indente idéntico a R_i

H_p : Altura de la probeta cilíndrica

R_p : Radio de la probeta cilíndrica

Para ambos modelos, tanto el modelo 3D como el 2D, los tiempos de mediciones considerados son de 60 segundos en los cuales la carga será aplicada permanentemente a lo largo de este periodo de tiempo.

3.3 Resultados de las simulaciones

3.3.1 Comparación de los modelos 3D y 2D

Con el fin de corroborar que el modelo axisimétrico 2D este bien definido, se han realizado dos simulaciones sometidas a las mismas condiciones tanto en el modelo 2D como en el 3D para verificar que ambos resultados sean idénticos. La Tabla 3-16 detalla las dimensiones de los cuerpos y la carga constante aplicada para ambos casos.

Tabla 3-6: Dimensiones y carga aplicada para los modelos en 2D y 3D

Pi [N]	Hp [cm]	Ri [cm]	Rp [cm]
0,50	10,00	0,50	4,75

En la Figura 3-16 y Tablas 3-7, 3-8 se pueden observar los resultados obtenidos en el software ANSYS, confirmando que se obtienen valores similares en ambos modelos (2D y 3D).

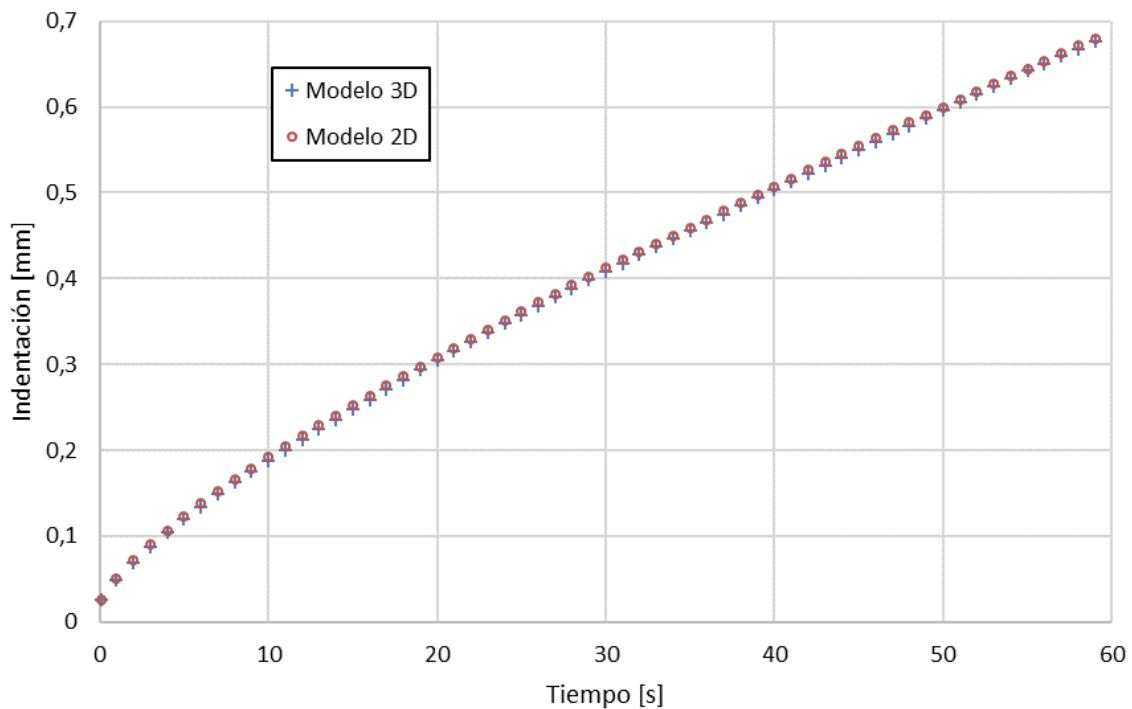


Figura 3-16: Resultados de indentación del modelo 3D y del modelo 2D en el software computacional ANSYS 19.2

Tabla 3-7: Indentación del modelo 2D y del modelo 3D en el software computacional ANSYS

	2D	3D
t [s]	h [mm]	h [mm]
0,1	0,03	0,03
1	0,05	0,05
2	0,07	0,07
3	0,09	0,09
4	0,11	0,10
5	0,12	0,12
6	0,14	0,13
7	0,15	0,15
8	0,17	0,16
9	0,18	0,17
10	0,19	0,19
11	0,20	0,20
12	0,22	0,21
13	0,23	0,22
14	0,24	0,24
15	0,25	0,25
16	0,26	0,26
17	0,28	0,27
18	0,29	0,28
19	0,30	0,29
20	0,31	0,30
21	0,32	0,32
22	0,33	0,33
23	0,34	0,34
24	0,35	0,35
25	0,36	0,36
26	0,37	0,37
27	0,38	0,38
28	0,39	0,39
29	0,40	0,40
30	0,41	0,41
31	0,42	0,42
32	0,43	0,43
33	0,44	0,44
34	0,45	0,45
35	0,46	0,46

Tabla 3-8: Indentación del modelo 2D y del modelo 3D en el software computacional ANSYS
(Continuación)

	2D	3D
t [s]	h [mm]	h [mm]
36	0,47	0,46
37	0,48	0,48
38	0,49	0,48
39	0,50	0,49
40	0,51	0,50
41	0,52	0,51
42	0,53	0,52
43	0,54	0,53
44	0,54	0,54
45	0,55	0,55
46	0,56	0,56
47	0,57	0,57
48	0,58	0,58
49	0,59	0,59
50	0,60	0,60
51	0,61	0,61
52	0,62	0,61
53	0,63	0,62
54	0,64	0,63
55	0,64	0,64
56	0,65	0,65
57	0,66	0,66
58	0,67	0,67
59	0,68	0,68

3.3.2 Comparación de los modelos con y sin fricción

Fueron comparados los resultados de modelos 2D y 3D que consideran la fricción entre el indentador y la superficie del material a indentar con el fin de examinar el efecto de dicha fricción en los ensayos de indentación. Para el caso con fricción se utiliza el tipo de contacto “*Bonded*” el cual representa una fricción máxima entre ambos cuerpos impidiendo el deslizamiento entre las superficies de contacto. En la Tabla 3-9 se detalla las dimensiones de los cuerpos y la carga constante aplicada para estudiar este efecto.

Tabla 3-9: Condiciones de la simulación del modelo con y sin fricción en el software computacional ANSYS

Pi [N]	Hp [cm]	Ri [cm]	Rp [cm]
0,50	10,00	0,50	4,75

En la Figura 3-17 y Tablas 3-10, 3-11 se muestran los resultados obtenidos en el software ANSYS. Se puede concluir que los efectos de la fricción resultan en indentaciones levemente menores.

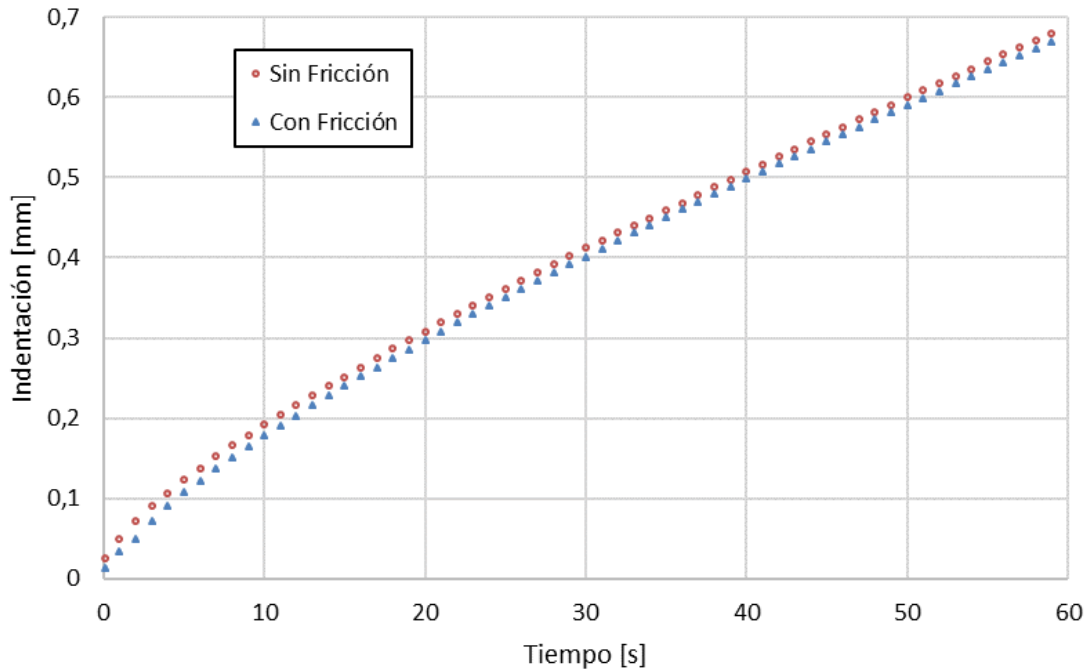


Figura 3-17: Resultados de indentación de los modelos con y sin fricción en el software computacional ANSYS

Tabla 3-10: Indentación del modelo con fricción y modelo sin fricción en el software computacional ANSYS

Tiempo [s]	Fricción	Sin fricción
	h [mm]	h [mm]
0,1	0,01	0,03
1	0,03	0,05
2	0,05	0,07
3	0,07	0,09
4	0,09	0,11
5	0,11	0,12
6	0,12	0,14
7	0,14	0,15
8	0,15	0,17
9	0,17	0,18
10	0,18	0,19
11	0,19	0,20
12	0,20	0,22
13	0,22	0,23
14	0,23	0,24
15	0,24	0,25
16	0,25	0,26
17	0,26	0,28
18	0,28	0,29
19	0,29	0,30
20	0,30	0,31
21	0,31	0,32
22	0,32	0,33
23	0,33	0,34
24	0,34	0,35
25	0,35	0,36
26	0,36	0,37
27	0,37	0,38
28	0,38	0,39
29	0,39	0,40
30	0,40	0,41
31	0,41	0,42
32	0,42	0,43
33	0,43	0,44
34	0,44	0,45
35	0,45	0,46

Tabla 3-11: Indentación del modelo con fricción y modelo sin fricción en el software computacional ANSYS (Continuación)

	Fricción	Sin fricción
Tiempo [s]	h [mm]	h [mm]
36	0,46	0,47
37	0,47	0,48
38	0,48	0,49
39	0,49	0,50
40	0,50	0,51
41	0,51	0,52
42	0,52	0,53
43	0,53	0,54
44	0,54	0,54
45	0,54	0,55
46	0,55	0,56
47	0,56	0,57
48	0,57	0,58
49	0,58	0,59
50	0,59	0,60
51	0,60	0,61
52	0,61	0,62
53	0,62	0,63
54	0,63	0,64
55	0,63	0,64
56	0,64	0,65
57	0,65	0,66
58	0,66	0,67
59	0,67	0,68

3.3.3 Efecto del borde basal de la probeta para indentaciones con geometría cilíndrica

Para estudiar el efecto del borde basal se realizan varias simulaciones en el software ANSYS variando la altura de la probeta (H_p), y manteniendo las demás variables constante. Estudios previos han concluido para indentaciones con geometría esférica, con L/a mayores a 40 el error alcanzado debido al efecto de borde de la probeta es inferior al 1%, donde L corresponde simultáneamente a la altura y radio de la probeta [Fadil et al. 2018]. Con el fin de evitar que el borde lateral influya en los resultados, el radio de la probeta es iterado hasta lograr una diferencia inferior al 1% entre dos alturas distintas. La Tabla 3-12 presenta los parámetros y valores que se utilizaran en estas simulaciones.

Tabla 3-12: Valores utilizados para la simulación del efecto del borde basal de la probeta

Pi [N]	Hp [cm]	Ri [cm]	Rp [cm]
0,50	Variable	0,50	20,00

El factor de corrección basal es determinado mediante la siguiente expresión:

$$FC_{basal} = \frac{h_h}{h_b} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Donde:

- FC_{basal} : Factor de corrección basal asociado a la altura de la probeta
 h_h : Profundidad de indentación en un medio semi-infinito
 h_b : Profundidad de indentación en un medio influenciado por la profundidad finita de la probeta

Se realizan iteraciones preliminares en el software ANSYS obteniendo que la indentación en un medio semi-infinito se logra para una probeta de altura cien veces mayor al radio de contacto entre el indentador y el medio a indentar. De esta forma, y considerando los valores mostrados en la Tabla 3-12, se seleccionan valores para la altura de probeta que varían desde 0,5 cm hasta los 50 cm. En cada simulación se registra la profundidad de indentación medida a los 60 segundos. Los resultados son expuestos en la Tabla 3-13.

Tabla 3-13: Resultados de indentación de las simulaciones variando la altura de la probeta en el software ANSYS

R_i [mm]	R_p [m]	H_p [mm]	a [mm]	H_p/a	h_b [mm]
5,00	0,20	500,00	5,00	100,00	0,76
5,00	0,20	200,00	5,00	40,00	0,75
5,00	0,20	100,00	5,00	20,00	0,72
5,00	0,20	50,00	5,00	10,00	0,67
5,00	0,20	40,00	5,00	8,00	0,66
5,00	0,20	30,00	5,00	6,00	0,61
5,00	0,20	20,00	5,00	4,00	0,54
5,00	0,20	10,00	5,00	2,00	0,40
5,00	0,20	9,00	5,00	1,80	0,39
5,00	0,20	7,00	5,00	1,40	0,30
5,00	0,20	6,00	5,00	1,20	0,25
5,00	0,20	5,50	5,00	1,10	0,23
5,00	0,20	5,00	5,00	1,00	0,20

Considerando, para las dimensiones trabajadas en esta sección, que el valor de indentación para la probeta de 50 cm de altura corresponde a una indentación en un medio semi-infinito y utilizando la ecuación 3.8 se calculan los factores de corrección basal (FC Basal) para los distintos valores de la razón H_p/a . Los resultados obtenidos son resumidos en la Tabla 3-14.

Tabla 3-14: Factores de corrección basal obtenidos de los resultados en el software ANSYS

H_p/a	h_b [mm]	FC Basal
100,00	0,76	1,00
40,00	0,75	1,01
20,00	0,72	1,06
10,00	0,67	1,13
8,00	0,66	1,16
6,00	0,61	1,24
4,00	0,54	1,41
2,00	0,40	1,90
1,80	0,39	1,97
1,40	0,30	2,51
1,20	0,25	3,03
1,10	0,23	3,35
1,00	0,20	3,86

Posteriormente se comparan estos valores de factores de corrección con los factores de corrección basales obtenidos por **Filonzi [2013]**. A continuación, se presenta una tabla (Tabla 3-15) con estos valores y se muestra el porcentaje de error de la diferencia entre ambos factores de corrección.

Tabla 3-15: Comparación de los factores de corrección basal entre los obtenidos de los resultados del software ANSYS y los factores obtenidos analíticamente

Hp/a	FC Basal MEF	FC Basal Análítico	Error%
40,00	1,01	1,03	2,06
20,00	1,06	1,06	0,11
10,00	1,13	1,13	0,55
8,00	1,16	1,16	0,01
6,00	1,24	1,23	1,38
4,00	1,41	1,37	2,76
2,00	1,90	1,93	1,61
1,80	1,97	2,08	5,83
1,40	2,51	2,57	2,44
1,20	3,03	2,98	1,58
1,10	3,35	3,26	2,76
1,00	3,86	3,62	6,28

A continuación, se muestra un gráfico (Figura 3-18) comparativo entre ambas soluciones para los factores de corrección basal.

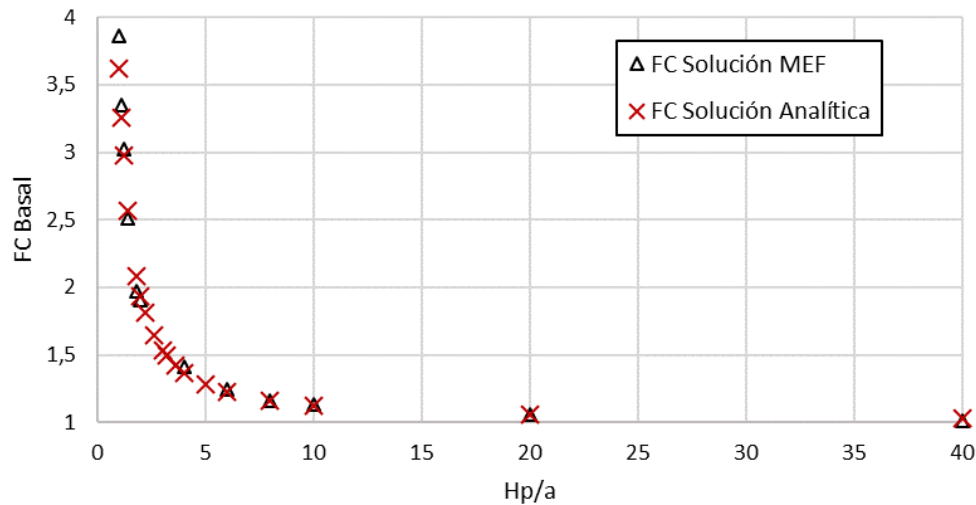


Figura 3-18: Comparación de los factores de corrección basal mediante solución analítica y modelo de elementos finitos

Es posible observar que por ambos métodos se consiguen resultados similares para la obtención de los factores de corrección basal.

3.3.3 Efecto del borde lateral de la probeta para indentaciones con geometría cilíndrica

Para estudiar el efecto del borde lateral o radio de la probeta (R_p) se realizan varias simulaciones en el software ANSYS variando el radio de la probeta, y manteniendo las demás variables constante. Con el fin de evitar que el borde basal influya en los resultados de indentación, se iteran las alturas de la probeta manteniendo las demás dimensiones constantes, hasta lograr una diferencia en los resultados inferior al 1%. La Tabla 3-16 resume los parámetros que cumplen con esta condición, los cuales serán utilizados en este análisis.

Tabla 3-16: Valores utilizados para la simulación del efecto del borde lateral de la probeta

Pi [N]	Hp [cm]	Ri [cm]	Rp [cm]
0,50	20,00	0,50	Variable

El factor de corrección lateral es determinado mediante la siguiente expresión:

$$FC_{Lateral} = \frac{h_h}{h_l} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Donde:

$FC_{Lateral}$: Factor de corrección lateral asociado al radio de la probeta

h_h : Indentación en un medio semi-infinito homogéneo

h_l : Indentación en un medio influenciado por el radio finito de la probeta

Se realizan iteraciones preliminares en el software ANSYS en donde se obtiene que la indentación en un medio semi-infinito se logra para una probeta de radio cuarenta veces mayor al radio de contacto entre el indentador y el medio a indentar. De esta forma, considerando los valores mostrados por la Tabla 3-16, se seleccionan valores para el radio de la probeta que varían desde 0,5 cm hasta los 20 cm. En cada simulación se registra la profundidad de indentación medida al segundo 60. La Tabla 3-17 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 3-17: Resultados de indentación de las simulaciones variando el radio de la probeta en el software ANSYS

Ri [mm]	Rp [mm]	a [mm]	Hp [mm]	Rp/a	hl [mm]
5,00	200,00	5,00	200,00	40,00	0,75
5,00	150,00	5,00	200,00	30,00	0,75
5,00	100,00	5,00	200,00	20,00	0,73
5,00	50,00	5,00	200,00	10,00	0,65
5,00	25,00	5,00	200,00	5,00	0,54
5,00	15,00	5,00	200,00	3,00	0,37
5,00	14,00	5,00	200,00	2,80	0,34
5,00	13,50	5,00	200,00	2,70	0,32
5,00	12,50	5,00	200,00	2,50	0,29
5,00	11,50	5,00	200,00	2,30	0,27
5,00	11,00	5,00	200,00	2,20	0,24
5,00	10,00	5,00	200,00	2,00	0,20
5,00	9,00	5,00	200,00	1,80	0,15
5,00	8,50	5,00	200,00	1,70	0,13
5,00	8,00	5,00	200,00	1,60	0,11
5,00	7,50	5,00	200,00	1,50	0,08
5,00	7,00	5,00	200,00	1,40	0,06
5,00	6,50	5,00	200,00	1,30	0,04
5,00	6,25	5,00	200,00	1,25	0,03
5,00	6,00	5,00	200,00	1,20	0,02
5,00	5,50	5,00	200,00	1,10	0,00
5,00	5,25	5,00	200,00	1,05	0,00

Considerando, para las dimensiones trabajadas en esta sección, que el valor de indentación para la probeta de 20 cm de radio corresponde a una indentación en un medio semi-infinito y utilizando la Ecuación 3.9 se calculan los factores de corrección lateral para los distintos valores de la razón del parámetro adimensional Rp/a . Estos resultados son mostrados en la Tabla 3-18.

Tabla 3-18: Factores de corrección lateral obtenidos de los resultados del software ANSYS

Rp/a	hl [mm]	FC Lateral
40,000	0,746	1,000
30,000	0,746	1,000
20,000	0,727	1,026
10,000	0,654	1,141
5,000	0,535	1,393
3,000	0,373	2,000
2,800	0,342	2,178
2,700	0,323	2,308
2,500	0,291	2,561
2,300	0,266	2,802
2,200	0,241	3,099
2,000	0,200	3,728
1,800	0,154	4,845
1,700	0,130	5,753
1,600	0,105	7,092
1,500	0,082	9,123
1,400	0,059	12,733
1,300	0,035	21,280
1,250	0,026	28,439
1,200	0,017	44,344
1,100	0,004	165,854
1,050	0,001	591,938

Luego se comparan estos valores de factores de corrección lateral con los valores obtenidos por **Filonzi [2013]**. La Tabla 3-19 presenta dos columnas con ambos factores de corrección junto con el porcentaje de error de la diferencia entre ambos.

Tabla 3-19: Comparación de los factores de corrección lateral entre los obtenidos de los resultados del software ANSYS y los factores obtenidos analíticamente

Rp/a	FC Lateral MEF	FC Lateral Análítico	Error%
10,00	1,14	1,05	8,62
5,00	1,39	1,11	25,73
3,00	2,00	1,20	66,79
2,80	2,18	1,22	78,95
2,70	2,31	1,23	87,90
2,50	2,56	1,25	104,25
2,30	2,80	1,28	118,08
2,20	3,10	1,30	137,54
2,00	3,73	1,35	175,67
1,80	4,85	1,42	241,14
1,70	5,75	1,47	292,53
1,60	7,09	1,52	365,51
1,50	9,12	1,60	471,12
1,40	12,73	1,71	646,42
1,30	21,28	1,86	1042,35
1,20	44,34	2,14	1975,52
1,10	165,85	2,79	5842,44

La Figura 3-19 muestra un gráfico comparativo entre ambas soluciones para los factores de corrección lateral.

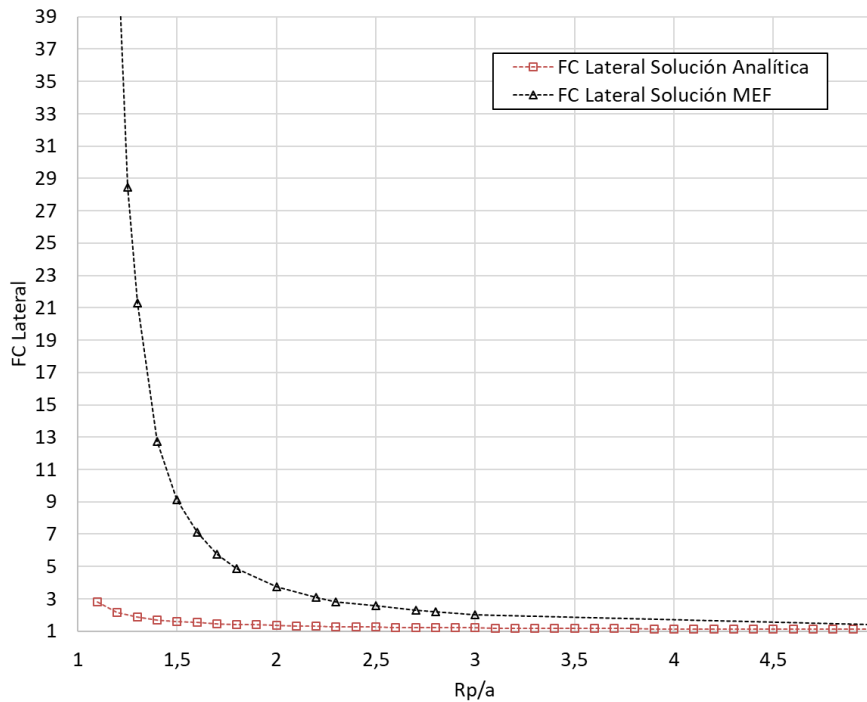


Figura 3-19: Gráfico de la comparación de los factores de corrección lateral mediante el modelo analítico y el modelo desarrollado en el software ANSYS

Es posible concluir que los factores de corrección lateral obtenidos por MEF son superiores en comparación a los obtenidos analíticamente. La explicación de esta diferencia entre ambos análisis radica en que el método analítico no considera el efecto volumétrico del fenómeno. Debido a que el ligante asfáltico es depositado en el contenedor a altas temperaturas al enfriarse se mantiene adherido con las paredes de éste, imposibilitando el desplazamiento tanto horizontal como vertical en cualquier punto del borde. Para imponer esta condición de borde lateral el método analítico aplica superposición de cargas en donde se crea una carga de indentación cilíndrica virtual de las mismas características a la carga real, pero en sentido contrario, ubicada simétricamente con respecto a la pared de la probeta. Debido a estas condiciones, este análisis implica que cada punto de la superficie del material viscoelástico se encontrará en una cota menor a la cota inicial, situación que no ocurre cuando se resuelven los modelos por medio de MEF. La Figura 3-20 muestra como ocurre el solevantamiento en la superficie de la probeta debido a los efectos volumétricos del fenómeno, cabe destacar que las deformaciones han sido escaladas para poder observar de forma más clara este comportamiento.

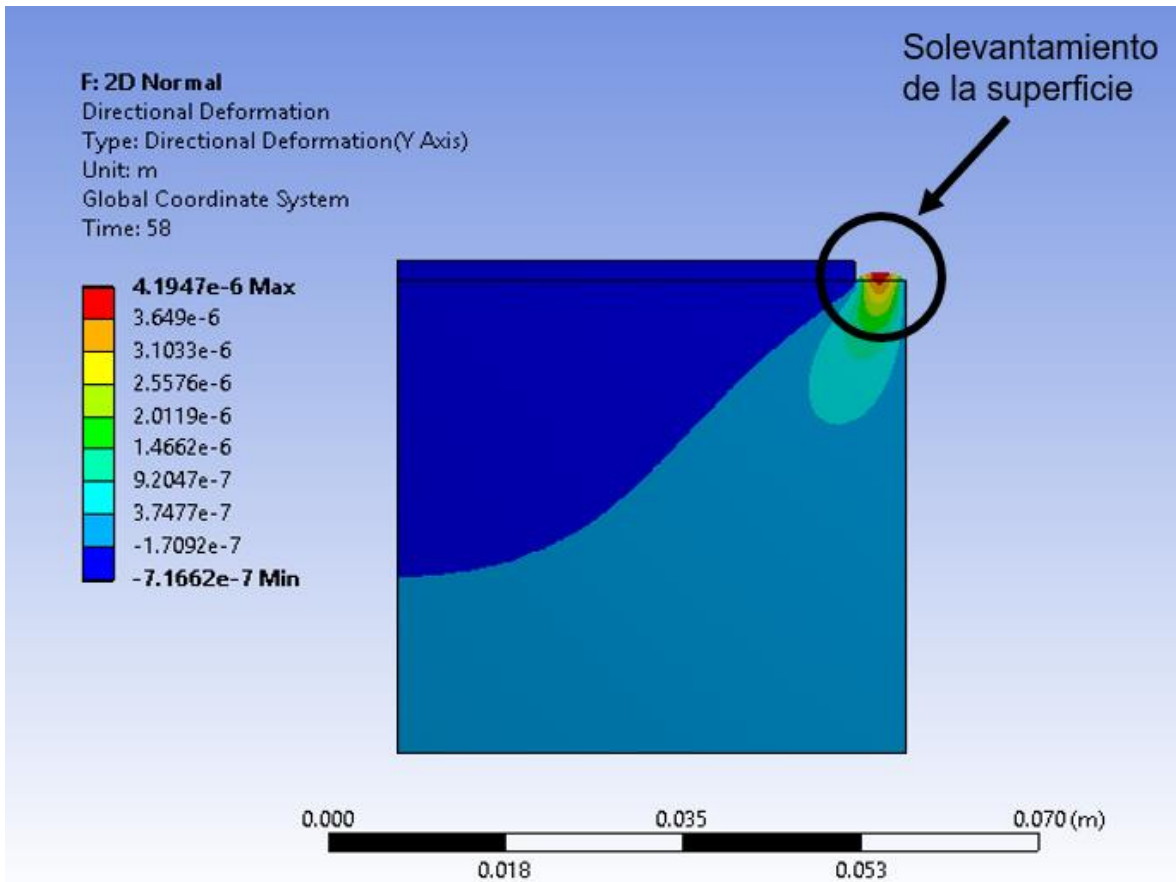


Figura 3-20: Solevantamiento de la superficie del medio viscoelástico obtenido del software ANSYS 1.9

3.3.4 Factor de corrección lateral para distintas configuraciones de tamaño de la probeta

Con el objetivo de demostrar que los factores de corrección lateral obtenidos por MEF son dependientes de la razón entre el radio de contacto a y el radio de la probeta R_p , y no de los valores individuales de éstos, se han realizado cuatro series de simulaciones con diferentes configuraciones de tamaños y obteniendo los factores de corrección lateral para cada una de las simulaciones del mismo modo que la sección anterior. Adicionalmente, se aplican los factores de corrección basal para anular el efecto de la altura de las probetas. La Tabla 3-20 muestra las dimensiones utilizadas para cada una de las simulaciones.

Tabla 3-20: Configuración para cada serie de simulaciones para la confección de la curva de factor de corrección lateral

Serie	Pi [N]	Hp [cm]	Ri [cm]	Rp [cm]
1	0,50	20,00	0,50	Variable
2	1,00	10,00	0,50	Variable
3	0,10	10,00	2,00	Variable
4	0,50	30,00	5,00	Variable

De las simulaciones realizadas en el software ANSYS con las dimensiones anteriormente señaladas, se han obtenido los resultados mostrados en las Tablas 3-21, 3-22, 3-23 y 3-24.

Tabla 3-21: Resultados serie 1 en el software ANSYS, $P = 0,5 \text{ N}$; $H_p = 20 \text{ cm}$; $R_i = 0,5 \text{ cm}$

Serie 1			
Rp/a	hl [mm]	FC Basal	FC Lateral
40,00	0,79	1,00	1,00
30,00	0,78	1,00	1,01
10,00	0,69	1,00	1,15
5,00	0,54	1,00	1,47
3,00	0,37	1,00	2,12
2,00	0,20	1,00	3,94
1,50	0,08	1,00	9,65
1,25	0,03	1,00	30,07
1,05	0,00	1,00	625,97

Tabla 3-22: Resultados serie 2 en el software ANSYS, $P = 1,0 \text{ N}$; $H_p = 10 \text{ cm}$; $R_i = 0,5 \text{ cm}$

Serie 2			
Rp/a	hl [mm]	FC Basal	FC Lateral
40,00	1,49	1,06	1,00
30,00	1,53	1,06	0,98
10,00	1,36	1,06	1,10
5,00	1,10	1,06	1,36
3,00	0,73	1,06	2,05
2,00	0,39	1,06	3,80
1,50	0,16	1,06	9,53
1,25	0,05	1,06	29,14
1,05	0,00	1,06	729,96

Tabla 3-23: Resultados serie 3 en el software ANSYS, $P = 0,1 \text{ N}$; $H_p = 10 \text{ cm}$; $R_i = 2,0 \text{ cm}$

Serie 3			
Rp/a	hl [mm]	FC Basal	FC Lateral
40,00	0,03	1,32	1,00
30,00	0,03	1,32	1,01
10,00	0,03	1,32	1,02
5,00	0,03	1,32	1,25
3,00	0,02	1,32	1,94
2,00	0,01	1,32	3,88
1,50	0,00	1,32	9,95
1,25	0,00	1,32	30,98
1,05	0,00	1,32	549,09

Tabla 3-24: Resultados serie 4 en el software ANSYS, $P = 0,5 \text{ N}$; $H_p = 30 \text{ cm}$; $R_i = 0,5 \text{ cm}$

Serie 4			
Rp/a	hl [mm]	FC Basal	FC Lateral
40,00	0,07	1,23	1,00
30,00	0,07	1,23	1,00
10,00	0,07	1,23	1,02
5,00	0,05	1,23	1,32
3,00	0,04	1,23	1,97
2,00	0,02	1,23	3,82
1,50	0,01	1,23	9,44
1,25	0,00	1,23	27,23
1,05	0,00	1,23	262,85

Finalmente son graficados los resultados del factor de corrección lateral (Figura 3-21) para una fácil comparación visual. Se puede apreciar que independiente de la configuración de las dimensiones de los cuerpos de la simulación, el factor de corrección lateral es solo dependiente de la razón R_p/a . Además, que los factores de corrección son dependientes del valor del módulo de Poisson, el cual se ha mantenido constante.

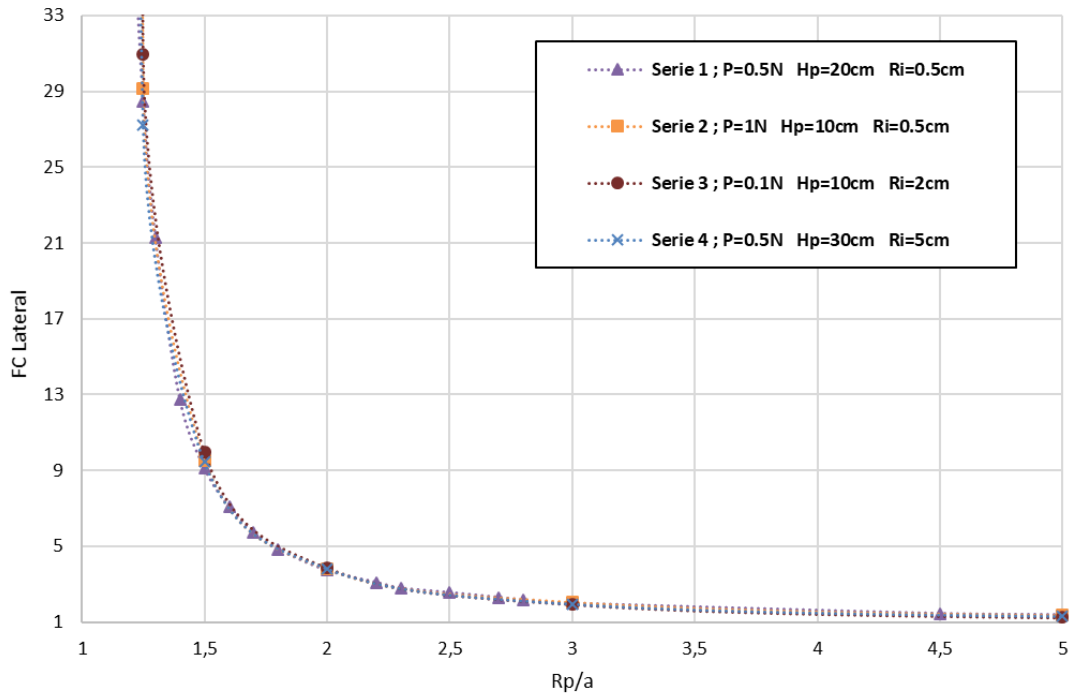


Figura 3-21: Gráfico del factor de corrección lateral obtenido para simulaciones de indentaciones de distintas dimensiones en el software ANSYS

Capítulo 4. Ensayo de Indentación

4.1 Parámetros utilizados en los ensayos de indentación

4.1.1 Geometría del indentador

En este trabajo se han expuesto tres geometrías para el desarrollo de ensayos de indentación sobre medios viscoelásticos. Sin embargo, en esta investigación, se han realizado modelos resueltos por MEF para indentadores cilíndricos debido a que presenta un menor costo computacional ya que mantiene un radio de contacto constante en el tiempo, lo que facilita la convergencia de los resultados. Por consiguiente, los ensayos de indentación en laboratorio son realizados utilizando una geometría de indentación cilíndrica.

Para un indentador de esta geometría es fundamental que su eje de simetría se encuentre perfectamente perpendicular al plano de superficie de la probeta, de lo contrario se generarían errores al momento de calcular la flexibilidad en fluencia en corte.

Debido a su practicidad y a los tamaños de recipientes en posesión para la confección de las probetas, se consideró para este estudio un indentador cilíndrico de 10 mm de diámetro con una carga de indentación constante de 50 g.

4.1.2 Valor del módulo de Poisson

Dado que la función de flexibilidad en fluencia en corte $J(t)$ obtenida de la solución analítica es sensible al módulo de Poisson del material viscoelástico, se requiere asignar un valor representativo para las condiciones del ensayo. Estudios [Benedetto et al., 2007] han determinado que, para temperaturas de ensayo cercanas a 25°C y baja frecuencia de carga, el módulo de Poisson (ν) tiene un valor de 0,5 durante prácticamente todo el rango de tiempo de carga de las mediciones.

4.1.3 Temperatura de ensayo

Las propiedades del ligante asfáltico varían con el aumento o disminución de la temperatura, afectando su capacidad para deformarse. Con respecto a esto, un aumento de la temperatura implica una disminución logarítmica en el tiempo requerido para lograr una misma deformación bajo un esfuerzo constante.

Es importante agregar que la flexibilidad en fluencia de un ligante es altamente sensible a las variaciones de temperatura por lo que es sumamente importante durante los ensayos el mantener un control de ésta.

Para los ensayos de indentación se ha utilizado una temperatura intermedia de 20 °C, dado que es un valor práctico, dentro del rango de temperaturas alcanzadas en el sector donde se realizan los ensayos. Los ensayos se han realizado en horarios donde esta temperatura se mantiene relativamente constante, dificultando la variación de temperatura de la probeta durante los mismos.

4.1.4 Tamaño de las probetas

Al momento de determinar el tamaño de las probetas, se han seleccionado medidas tales que permitan apreciar claramente los efectos de sus dimensiones finitas (borde lateral y basal) sobre los ensayos de indentación. Con el apoyo de las curvas de factores de corrección obtenidas computacionalmente por medio del método de elementos finitos (MEF) se han seleccionado las siguientes configuraciones para nueve distintos tamaños de probetas. La Tabla 4-1 muestra las dimensiones de las probetas que se utilizan en los ensayos de laboratorio de este trabajo.

Tabla 4-1: Dimensiones de las probetas

Probeta N°	Radio Rp [mm]	Altura Hp [mm]
1	24	60
2	24	20
3	24	10
4	15	60
5	15	20
6	15	10
7	50	60
8	50	20
9	50	10

Con estas configuraciones de tamaño de las probetas, junto con un radio de indentador cilíndrico de 5 mm, se obtienen factores de corrección razonablemente diferentes para una futura comparación de los resultados. A continuación, las Tablas 4-2 y 4-3 muestran un valor aproximado de los factores de corrección basales y laterales, respectivamente, obtenidos de los resultados utilizando el software ANSYS.

Tabla 4-2: Factor de corrección basal asociado a las distintas alturas de las probetas

Hp [mm]	Hp/a	FC Basal
10,0	2,0	1,9
20,0	4,0	1,3
60,0	12,0	1,1

Tabla 4-3: Factor de corrección lateral asociado a los distintos radios de las probetas

Rp [mm]	Rp/a	FC Lateral
15,0	3,0	2,2
24,0	4,8	1,5
50,0	10,0	1,1

4.2 Descripción del ensayo de indentación

El ensayo de indentación consiste en el uso de un equipo penetrómetro modificado con una geometría cilíndrica, en donde se busca obtener el desplazamiento vertical del indentador durante el tiempo de ensayo bajo una carga y temperatura constante. A continuación, se detallan los pasos llevados a cabo para efectuar el ensayo de indentación.

4.2.1 Preparación de las muestras

Para los ensayos de indentación realizados, se han utilizado muestras de material de ligante asfáltico del tipo CA-24 vertidas en caliente dentro de contenedores cilíndricos de distintas dimensiones.

El proceso llevado a cabo para la preparación de las probetas es explicado a continuación:

1. Distintos recipientes contenedores de ligante asfáltico CA-24 son calentados en un horno convencional a una temperatura de 160 °C durante 30 minutos.
2. A continuación, para asegurar una adecuada homogeneidad del material, el ligante asfáltico contenido en estos recipientes individuales es vertido en un recipiente en común y revueltos con una varilla.
3. Inmediatamente después, este recipiente en común es reincorporado dentro del horno convencional a 160° C durante 30 minutos.
4. Pasado este tiempo, con el objetivo de mejorar la homogeneidad, el ligante asfáltico dentro del recipiente es revuelto con una varilla una última vez.
5. El ligante asfáltico se vierte a altas temperaturas en recipientes cilíndricos de radios distintos. Para alcanzar la altura de probeta deseada se pesa la probeta y utilizando la Ecuación 4.1 es posible conocer la masa necesaria de material vertido para alcanzar la altura deseada.

$$m_a = \pi * R_p^2 * H_p * \rho_a \quad (\text{Ec. 4.1})$$

En donde m_a representa la masa de ligante asfáltico requerido para lograr la altura deseada, R_p es el radio interno del recipiente cilíndrico, H_p es la altura deseada para la probeta y ρ_a corresponde a la densidad del ligante asfáltico.

6. Las probetas son niveladas para asegurar la horizontalidad de su superficie y son tapadas para evitar que se impregnen partículas del ambiente. Luego se dejan enfriar durante un día a temperatura ambiente.
7. Pasado este tiempo, las probetas son sumergidas dentro de una canasta con agua, la cual es introducida dentro de una máquina de prueba universal que posee una cámara termostaticada, capaz de mantenerse estable y homogénea a una temperatura de 20 °C. Se mantiene dentro de esta máquina durante cuatro horas para que el sistema dentro de la canasta alcance dicha temperatura. La Figura 4-1 muestra la máquina de prueba universal de la cual se utiliza su cámara termostaticada.



Figura 4-1: Máquina de prueba universal utilizada para el control de temperatura

4.2.2 Equipo del ensayo de indentación

El equipo utilizado para los ensayos de indentación corresponde al mismo aparato empleado para el ensayo de penetración del ligante asfáltico, esto gracias a que el ensayo de penetración es análogo al ensayo de indentación utilizando una aguja como geometría de indentación. Este equipo consta de un penetrómetro que permite el movimiento vertical sin fricción de un vástago que sostiene la aguja, junto a esto, es capaz de medir la distancia vertical recorrida por el vástago a lo largo del ensayo.

Debido a que se está trabajando con soluciones para una geometría de indentación cilíndrica, se modifica este equipo reemplazando la aguja por un indentador de forma cilíndrica. Para controlar la carga de ensayo, se ha confeccionado un vástago que posee un cuello de diámetro superior en donde es posible colocar sobrepesos. En la Figura 4-2 se aprecian tres elementos: el vástago, el cual posee un punto de contraste en su parte superior, junto con una ranura sobresaliente utilizada para colocar las golillas; el indentador de geometría cilíndrica, que se puede unir al vástago mediante un tornillo; las golillas utilizadas para modificar y controlar el peso del conjunto.

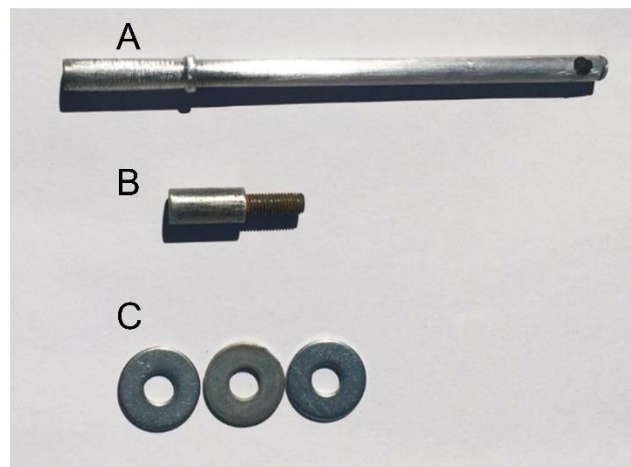


Figura 4-2: Conjunto Vástago-Indentador utilizado para los ensayos, A) Vástago, B) Indentador de geometría cilíndrica, C) Golillas

Junto a esto, se utiliza una cámara digital apoyada sobre un trípode para filmar el movimiento vertical del vástago a lo largo del ensayo. Utilizando un punto de contraste en la cabeza del vástago, y por medio de un proceso computacional de correlación de imágenes digitales, es posible adquirir el desplazamiento en pixeles del punto de contraste. Con el penetrómetro se mide el desplazamiento total del vástago en unidades métricas, lo que permite transformar las unidades de pixeles en unidades métricas.

4.2.3 Ejecución del ensayo de indentación con geometría cilíndrica

A continuación, se indican los pasos seguidos para ejecutar el ensayo de indentación.

4.2.3.a Preparación del equipo de indentación y colocación de la probeta

La superficie del indentador que estará en contacto con el ligante asfáltico es revestida con láminas de teflón con el objetivo de mitigar los efectos de roce entre ambas superficies durante el ensayo y de esta manera hacer válida la teoría de contacto aplicada al problema de indentación con el supuesto de sin fricción entre ambas superficies. Sin embargo, de los modelos computacionales expuestos en los capítulos anteriores, se ha observado que el efecto de la fricción es leve.

A continuación, se ensambla la geometría de indentación en el vástago a través de un tornillo agregando golillas hasta obtener la carga deseada para el experimento. Una vez esto, se inserta el vástago en el penetrómetro.

La canasta llena de agua que contiene la probeta con ligante asfáltico a la temperatura de ensayo (20 °C) es colocada en el penetrómetro bajo el indentador cilíndrico como se muestra en la siguiente imagen (Figura 4-3).

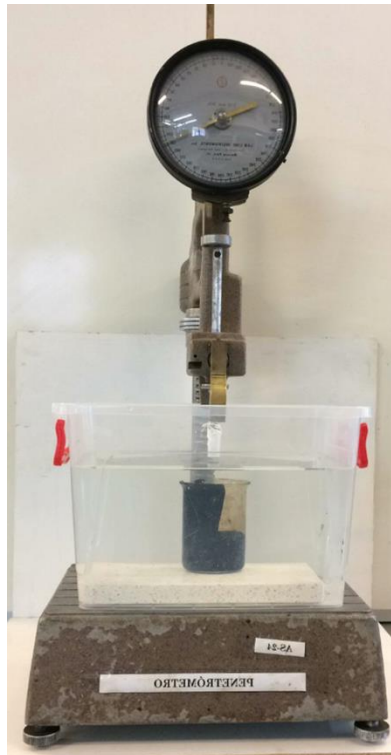


Figura 4-3: Equipo de indentación conformado por un penetrómetro, vástago, indentador y probeta.

Después se posiciona la superficie del indentador lo más cercano a la superficie de la probeta, debido a las limitaciones técnicas, esto se ha realizado de forma visual ayudado por el reflejo del indentador sobre la superficie del ligante asfáltico como se puede apreciar en la Figura 4-4.



Figura 4-4: Posicionamiento de la superficie del indentador sobre la superficie del ligante asfáltico

Finalmente se instala una cámara digital con un trípode apuntando hacia un punto de contraste ubicado en la cabeza del vástago, que permita medir su desplazamiento durante todo el ensayo, para luego obtener mediante correlación de imágenes digitales, su desplazamiento (en píxeles) en el tiempo.

4.2.3.b Realización del ensayo de indentación

El ensayo de indentación consiste en aplicar una carga constante de geometría cilíndrica sobre la probeta de ligante asfáltico durante un tiempo de 120 segundos. Para esto se libera el vástago dejando caer libremente si rozar con el penetrómetro durante el tiempo del ensayo. En paralelo, con la cámara digital se graba el punto de contraste circular ubicado en la parte superior del vástago. En cada ensayo se registran los siguientes datos:

- Indentación medida por el penetrómetro al inicio del ensayo (D_0).
- Indentación medida por el penetrómetro al final del ensayo (D_f).
- Temperatura inicial y final del ensayo.
- Peso del indentador.
- Peso del recipiente vacío.
- Peso del recipiente con ligante asfáltico.
- Diámetro interno de la probeta.
- Diámetro del indentador.
- Video del movimiento vertical del punto de contraste circular ubicado en el vástago.

4.2.3.c Cálculos

Una vez completado el ensayo de indentación, con los datos obtenidos se realiza el cálculo de los siguientes valores:

- Desplazamiento vertical total del indentador (D_v): Este valor resulta de la diferencia entre las medidas marcadas por el penetrómetro antes y después del ensayo y corresponde al desplazamiento vertical total que ha realizado el indentador, lo que implica la suma entre profundidad indentada más el error por la separación inicial entre las superficies del ligante y del indentador.

$$D_v = D_f - D_0 \quad (\text{Ec. 4.2})$$

- Altura de la probeta (H_p): Es la altura que ha alcanzado el ligante asfáltico dentro del recipiente de vidrio y se calcula de la siguiente forma:

$$H_p = \frac{P_p - P_v}{\rho_a * \pi * R_p^2} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

En donde:

- H_p = Altura de la probeta.
- P_p = Masa de la probeta.
- P_v = Masa del recipiente de vidrio vacío.
- ρ_a = Densidad volumétrica del ligante asfáltico.
- R_p = Radio interno del recipiente de vidrio.

Capítulo 5. Resultados de los ensayos de indentación

A continuación, se presenta la metodología seguida para el análisis de los datos obtenidos de los ensayos de indentación para la confección de los resultados finales.

5.1 Matriz de ensayos

En este trabajo, han sido confeccionado y ensayado 3 lotes de probetas, utilizando muestras de ligante asfáltico CA-24 sin modificar. Estas muestras de ligante asfáltico han sido obtenidas de distintos contenedores, asociados a distintos grados de envejecimiento, razón por la cual los resultados pueden variar de un lote a otro.

Cada lote cuenta con un mismo número de probetas y dimensiones de las mismas, y se diferencian entre sí por los contenedores de donde se ha obtenido el material de ligante asfáltico. Para cada lote se han utilizado probetas compuestas por una combinación de 3 radios (R_p) y 3 alturas (H_p) distintas, resultando en 9 probetas distintas. La Tabla 5-1 mostrada a continuación indica a modo de resumen los tamaños de cada probeta junto a los factores de corrección, obtenidos por medio del software ANSYS, asociados para una indentación con una geometría cilíndrica de 10 mm de diámetro.

Tabla 5-1: Matriz de probetas ensayadas para cada lote junto a sus factores de corrección asociados a una indentación cilíndrica de 10 mm de diámetro

N° de Probeta	Radio R_p [mm]	Altura H_p [mm]	R_p/a	FC Lateral	H_p/a	FC Basal	FC Total
1	24,0	60,0	4,8	1,5	12,0	1,1	1,6
2		20,0			4,0	1,3	1,8
3		10,0			2,0	1,9	2,4
4	15,0	60,0	3,0	2,2	12,0	1,1	2,3
5		20,0			4,0	1,3	2,5
6		10,0			2,0	1,9	3,1
7	50,0	60,0	10,0	1,1	12,0	1,1	1,2
8		20,0			4,0	1,3	1,4
9		10,0			2,0	1,9	2,0

5.2 Correlación de imágenes digitales (DIC)

La correlación de imágenes digitales es una técnica que permite analizar un conjunto de imágenes digitales para calcular desplazamientos verticales, horizontales, y deformaciones. Consiste en el seguimiento de la intensidad de colores (contraste) entre varias imágenes sucesivas permitiendo construir una función de mapeo de deformaciones y desplazamientos.

Para hacer efectiva la correlación de imágenes digitales, se utiliza una herramienta gratuita diseñada para Matlab desarrollada en la Universidad de Illinois por **Elizabeth Jones [2013]**. Las imágenes son obtenidas de un video grabado por una cámara digital de alta resolución durante el ensayo, las cuales han sido capturadas a una razón de 30 imágenes por segundo.

Los pasos que se deben seguir para utilizar esta herramienta se describen a continuación:

1. Preparar las imágenes a correlacionar: Se sitúan las imágenes a procesar en la carpeta del directorio del software Matlab. En este paso, para disminuir los costos de memoria, del video se extraen 30 imágenes por segundo durante los primeros 2 segundos de indentación, y para el tiempo restante solo 1 imagen por segundo. Luego, para preparar las imágenes, se inicia el comando *image_setup_GUI*, del cual emerge la ventana mostrada en la Figura 5-1, en donde se indica la extensión de las imágenes y el intervalo de imágenes a trabajar.

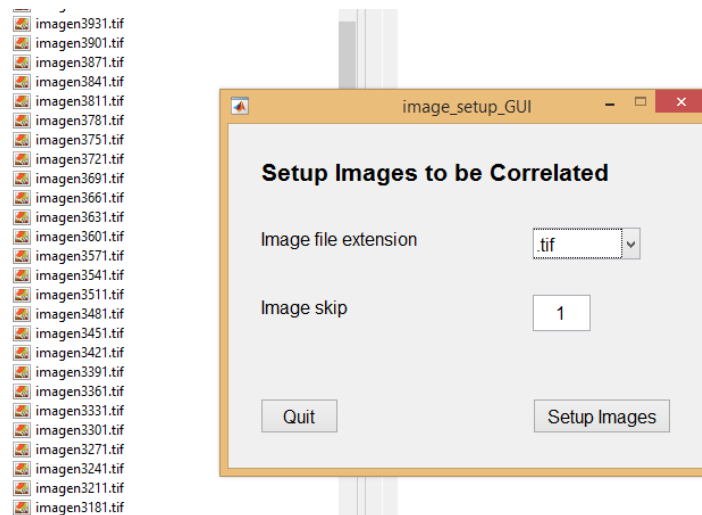


Figura 5-1: Correlación de imágenes digitales, interfaz para preparar las imágenes

2. Realizar la correlación: Se ejecuta el comando *correlate_images_GUI* en donde aparece una interfaz (Figura 5-2) para definir los parámetros de la correlación y establecer el enmallado de la misma.

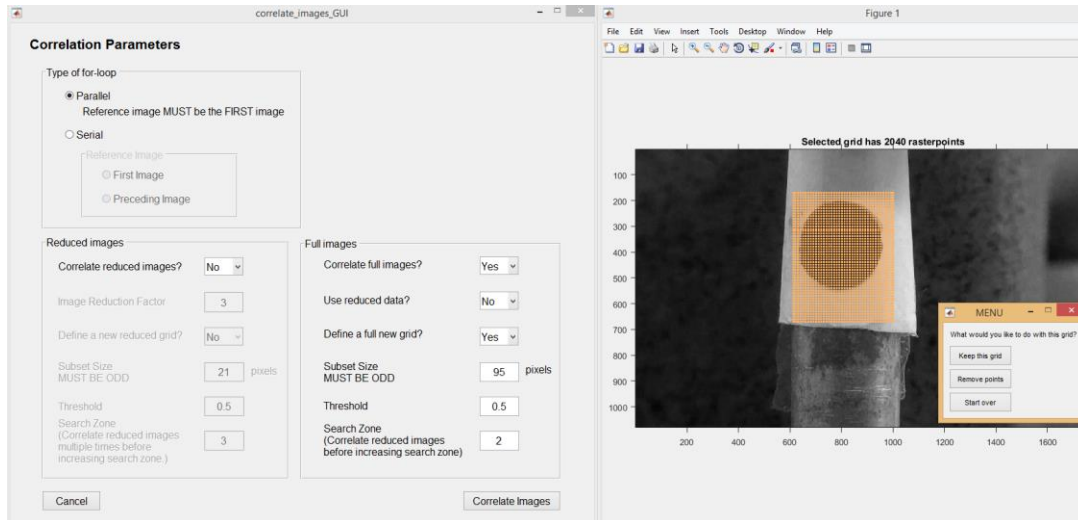


Figura 5-2: Correlación de imágenes digitales, interfaz con valores y enmallado de la correlación

3. Revisión de los resultados de la correlación: Para observar los resultados obtenidos de la correlación, se debe ejecutar el comando *visualize_data_GUI* en donde se entrega una interfaz de usuario (Figura 5-3) que permite seleccionar en detalle la información que se quiere obtener, en este caso el desplazamiento vertical del punto de contraste circular ubicado en el vástago. Así se obtiene un gráfico del desplazamiento vertical del vástago en píxeles. En caso de que el gráfico obtenido presente puntos faltantes o anómalos, se repite el paso anterior mejorando la calidad del enmallado para obtener una correlación más precisa.

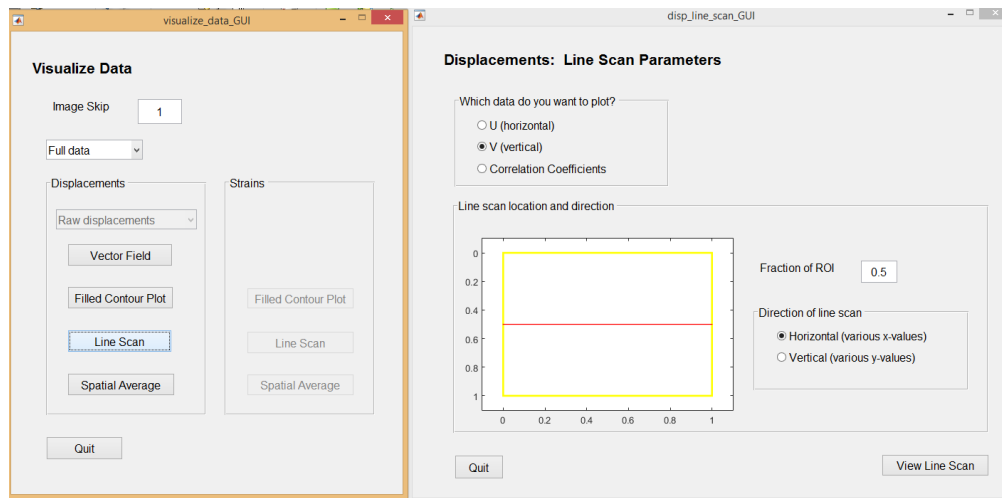


Figura 5-3: Correlación de imágenes digitales, interfaz asociado a la visualización de los resultados.

5.3 Confección de gráficos de indentación en el tiempo

A continuación, se detallan las acciones realizadas para producir los gráficos de indentación en el tiempo a partir de los datos obtenidos de los ensayos de indentación y de los resultados adquiridos de las correlaciones de imágenes digitales.

5.3.1 Conversión de pixeles a unidades métricas

El primer paso es convertir los datos obtenidos a través de la correlación de imágenes digitales a unidades métricas. Gracias a tener el valor del desplazamiento vertical total del indentador proporcionado por las medidas del penetrómetro, se puede por regla de proporción determinar cuántas unidades métricas representa un pixel.

$$d_p = D_v/D_{mp} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

En donde:

- d_p = Desplazamiento en milímetros equivalente a un pixel de desplazamiento.
- D_v = Desplazamiento vertical del indentador en milímetros.
- D_{mp} = Desplazamiento máximo en pixeles del punto de contraste ubicado en el vástago.

Amplificando por el valor de d_p cada punto de la curva obtenida por el método de correlación de imágenes digitales, se consigue transformar dicha curva, de unidades de pixeles por unidad de tiempo, a una curva en unidades de milímetros por unidad de tiempo.

5.3.2 Corrección por contacto inicial

Al momento de realizar los ensayos de indentación, el contacto inicial entre las superficies indentador-probeta no es completamente perfecto existiendo un pequeño espacio entre ambas superficies, lo que implica que la medición inicial del ensayo representa la caída libre del indentador. Con el objetivo de eliminar este efecto, se construyen distintos gráficos de indentación a partir de la curva original, cada uno desfasado temporalmente e imponiendo como punto inicial de indentación al segundo cero respectivo. Posteriormente, se ajusta una función potencial dado que es la forma que ha de tener la curva de flexibilidad en fluencia. Finalmente, se selecciona la curva de la cual se obtiene el coeficiente de determinación (R^2) más cercano a valor 1. La Figura 5-4 muestra un gráfico de indentación, en pixeles, obtenido directamente de una correlación de imágenes digitales.

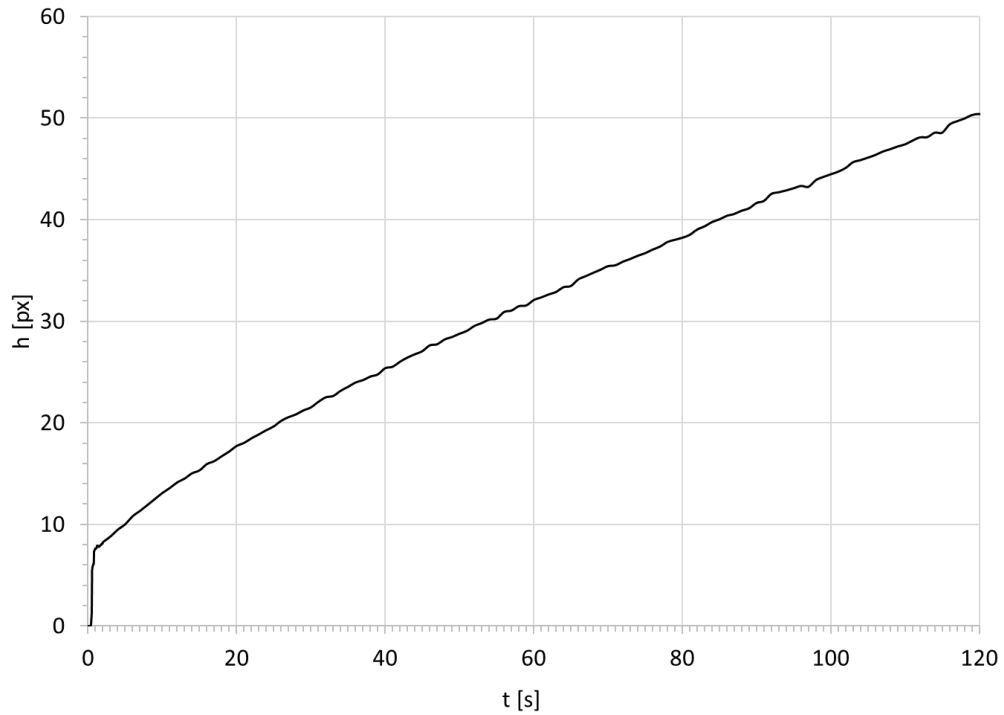


Figura 5-4: Gráfico de indentación obtenidos por correlación de imágenes digitales en píxeles por segundo, sin modificar

Es posible observar de la Figura 5-4 que inicialmente existe un segmento asociado a la caída libre del indentador seguido por una curva cuya forma se asemeja a la de una función potencial. A continuación, la Figura 5-5 engloba un conjunto de gráficos asociados a la figura anterior con puntos iniciales de indentación desfasados temporalmente con sus respectivos ajustes de curva potencial y coeficientes de determinación.

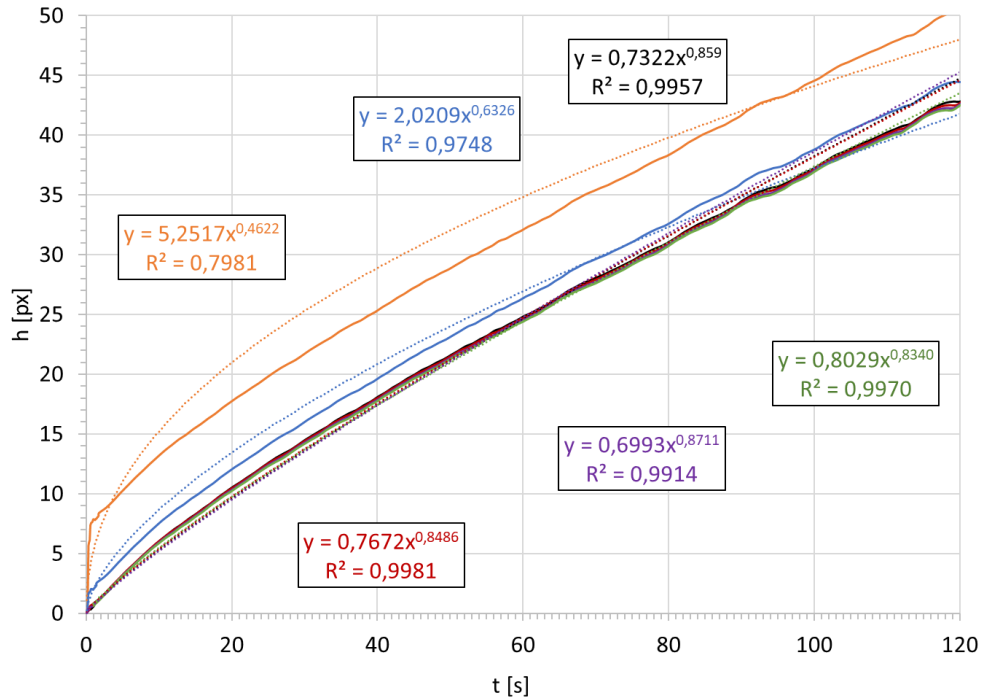


Figura 5-5: Gráficos de indentación obtenidos por correlación de imágenes digitales sin modificación a partir de distintos tiempos iniciales

5.3.3 Suavización de las curvas

Dado a que se trabaja con desplazamientos pequeños, del orden de las décimas de milímetros, las mediciones son muy sensibles al efecto del ruido provocado por vibraciones externas al ensayo por lo que se ha decidido aplicar una técnica de suavizado a las curvas.

Se utiliza el método de la media móvil central de orden 5 con el propósito de suavizar las curvas y amortiguar el ruido en las mediciones. La media móvil consiste en el cálculo de un grupo de datos para generar una serie de promedios, es decir, generar un subconjunto de datos a partir del promedio de los datos originales. Una media móvil central de orden 5 crea esta nueva serie de promedios a partir de los datos anteriores y posteriores del valor original de la forma que indica a continuación:

$$x_j^* = \frac{x_{j-2} + x_{j-1} + x_j + x_{j+1} + x_{j+2}}{5} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

Donde:

- x_j = Valor del dato original ubicado en la posición j .
- x_j^* = Nuevo valor para x_j .

5.4 Gráficos resultantes de indentación

Para este estudio se han realizado 3 grupos de ensayos cada uno con 9 probetas de distintas dimensiones, utilizando un ligante asfáltico del tipo CA-24 sin modificar, a una temperatura de 20 °C, bajo una carga de indentación de 50 g y con un indentador de 10 mm de diámetro. En este apartado las Figuras 5-6 a 5-32 presentan los gráficos resultantes de estas 27 mediciones realizadas con las características anteriormente señaladas.

5.4.1 Gráficos de indentación lote N°1

Los gráficos mostrados en esta sección corresponden a la indentación en el tiempo obtenidos de los ensayos, hasta el segundo 60 de indentación, para el primer grupo de nueve probetas distintas confeccionadas con un ligante asfáltico CA-24.

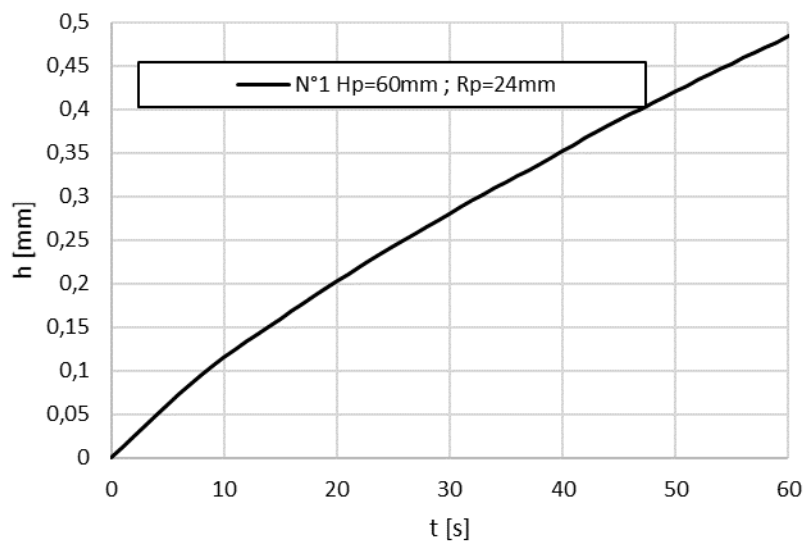


Figura 5-6: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°1 del Lote N°1

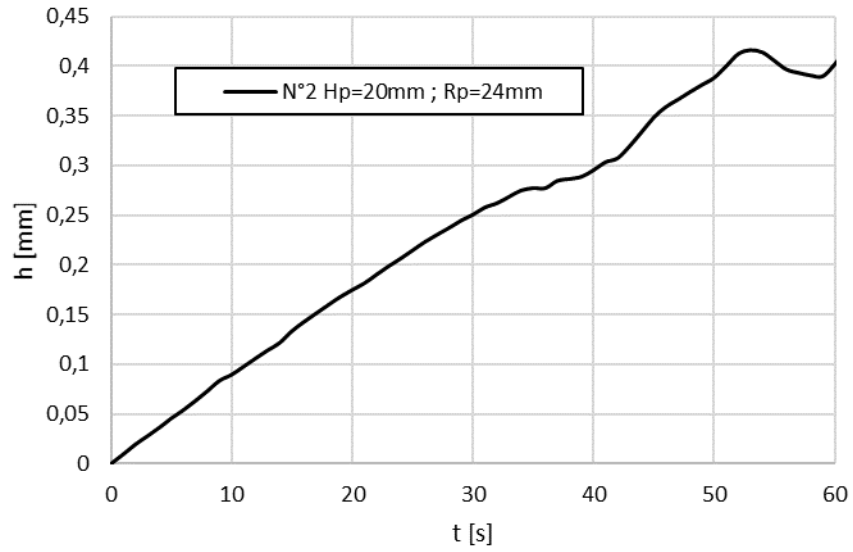


Figura 5-7: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°2 del Lote N°1

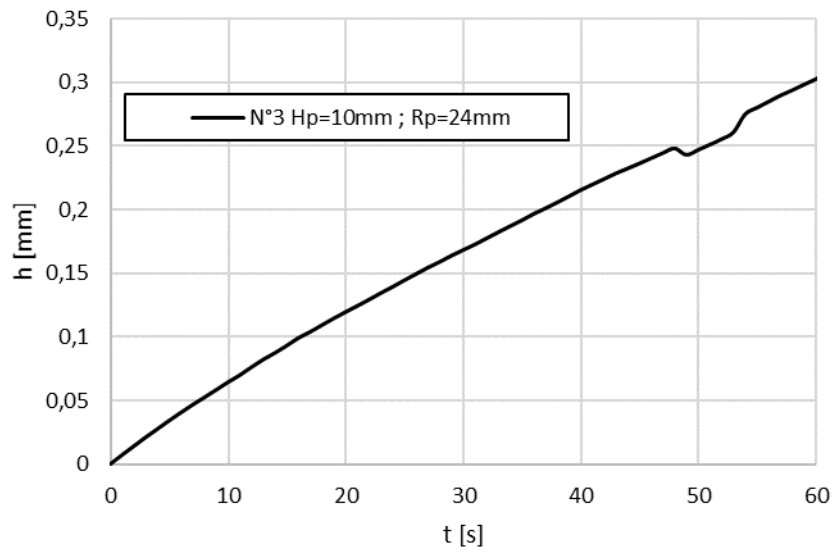


Figura 5-8: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°3 del Lote N°1

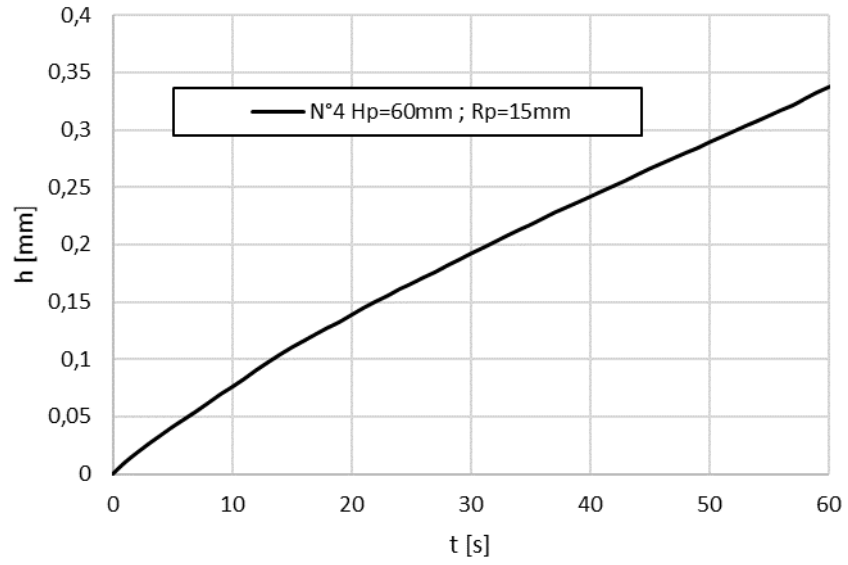


Figura 5-9: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°4 del Lote N°1

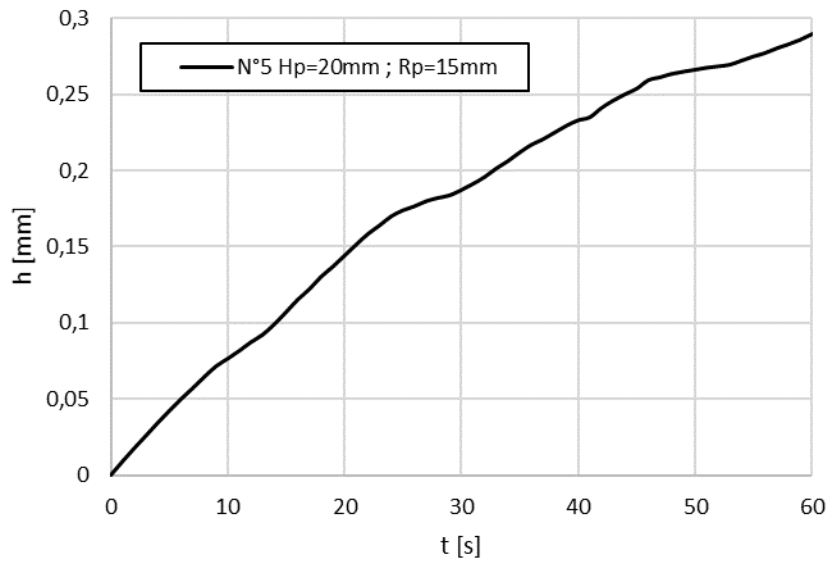


Figura 5-10: Gráfico de Indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°5 del Lote N°1

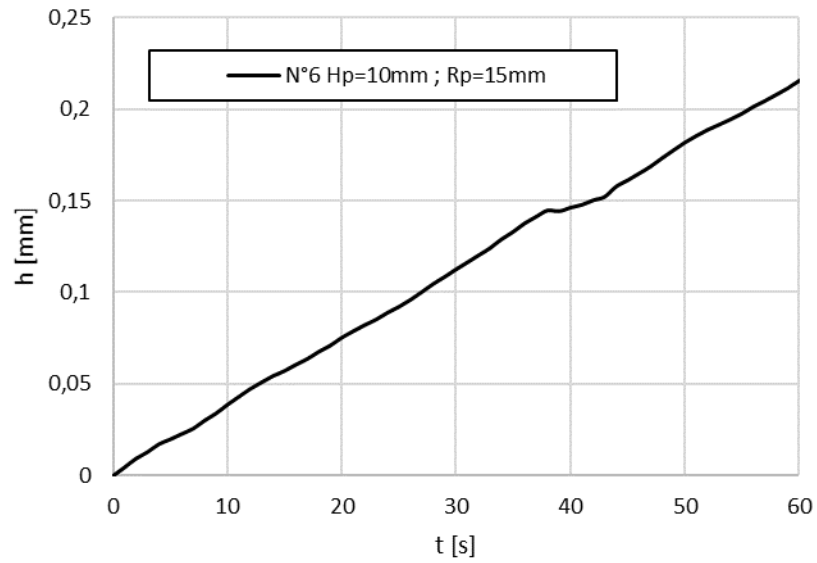


Figura 5-11: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°6 del Lote N°1

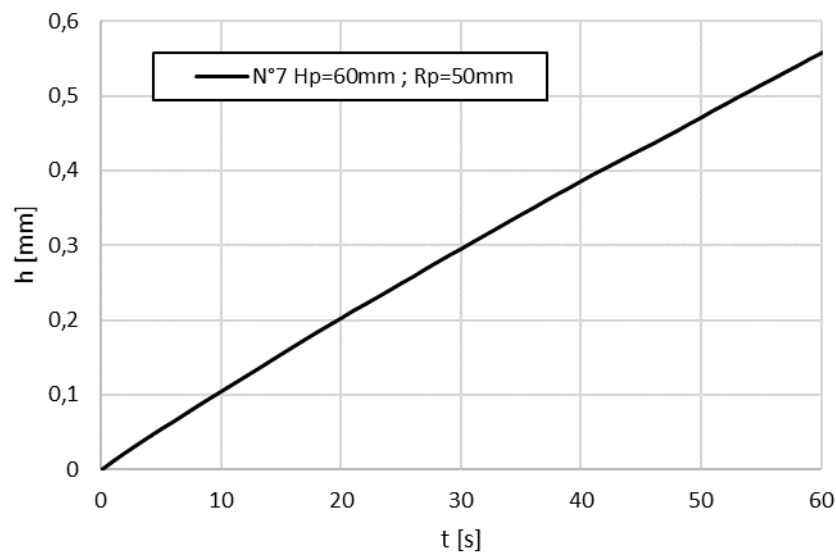


Figura 5-12: Gráfico de Indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°7 del Lote N°1

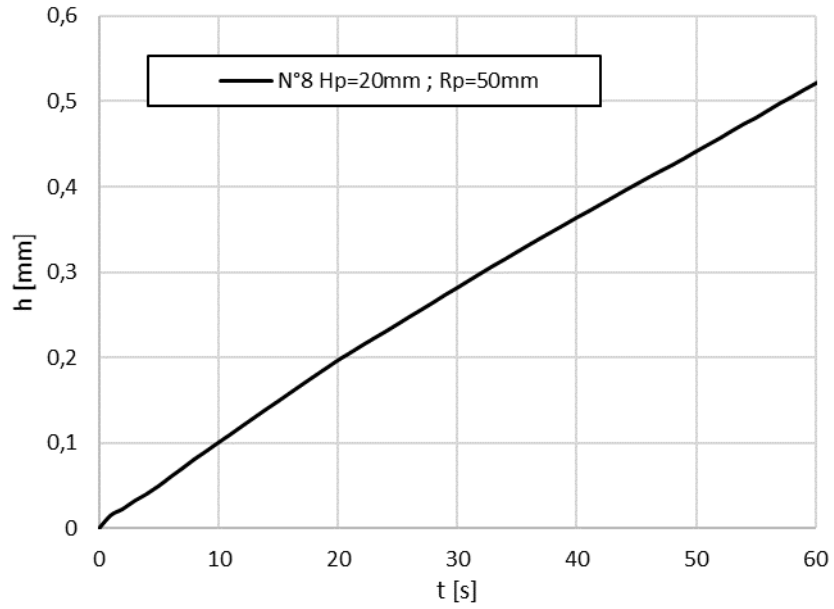


Figura 5-13: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°8 del Lote N°1

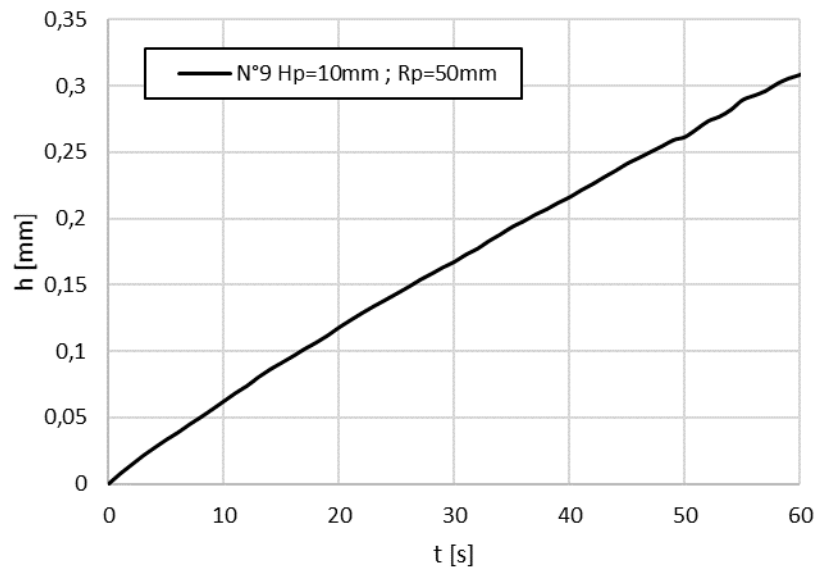


Figura 5-14: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°9 del Lote N°1

5.4.2 Gráficos de indentación lote N°2

Los gráficos mostrados en esta sección corresponden a la indentación en el tiempo obtenidos de los ensayos, hasta el segundo 60 de indentación, para el segundo grupo de nueve probetas distintas confeccionadas con un ligante asfáltico CA-24.

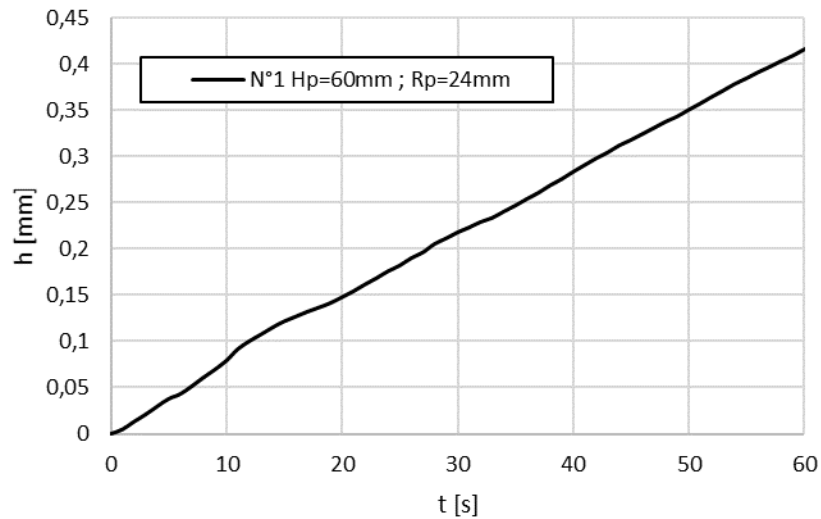


Figura 5-15: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°1 del Lote N°2

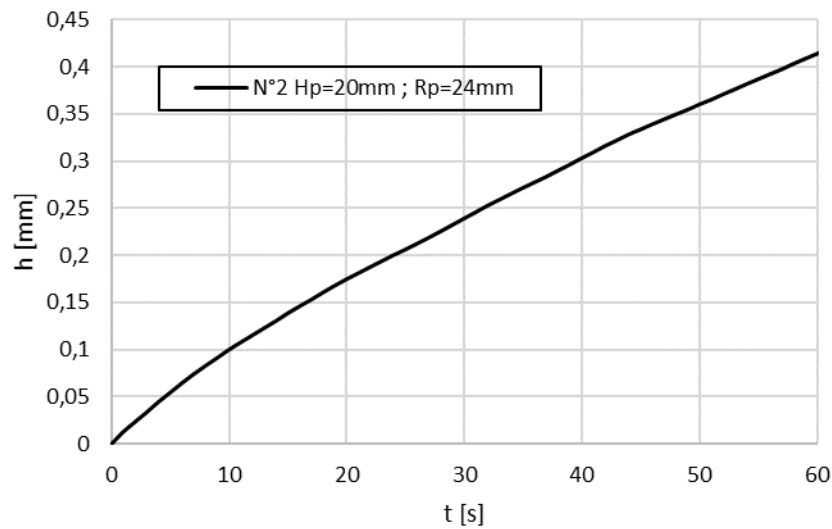


Figura 5-16: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°2 del Lote N°2

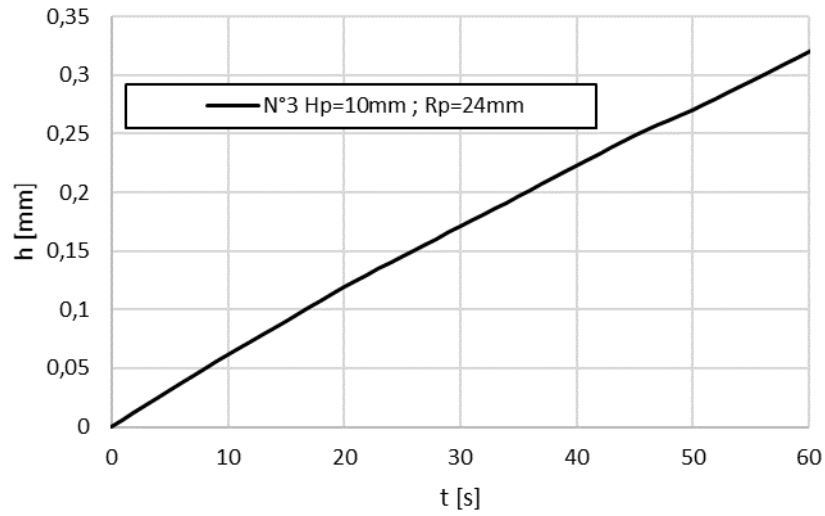


Figura 5-17: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°3 del Lote N°2

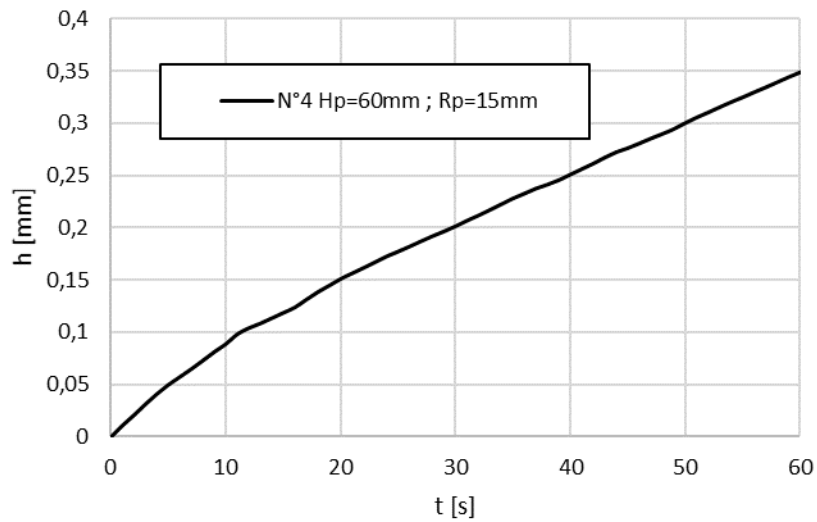


Figura 5-18: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°4 del Lote N°2

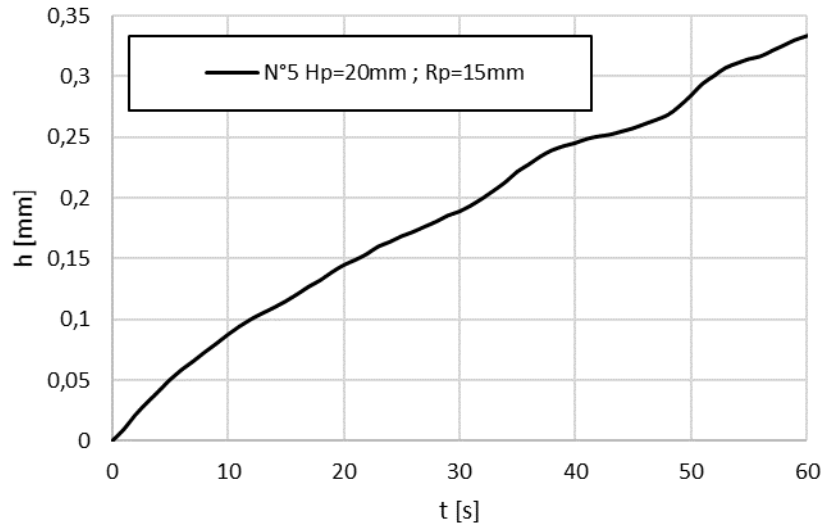


Figura 5-19: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°5 del Lote N°2

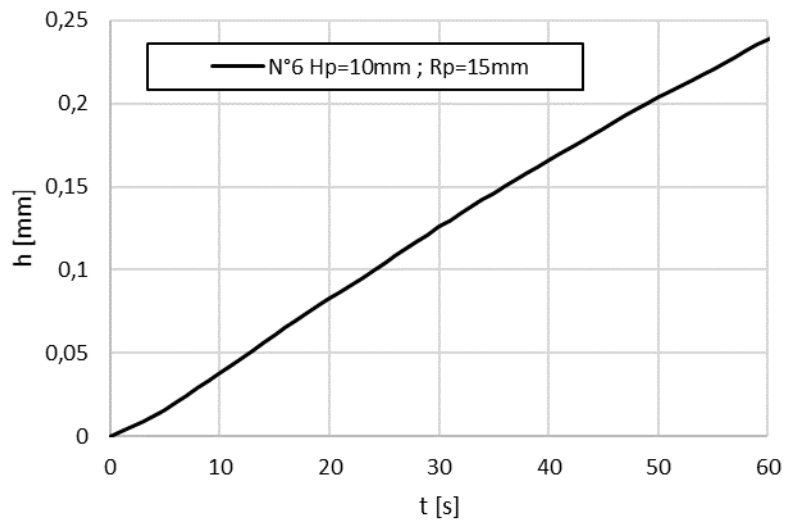


Figura 5-20: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°6 del Lote N°2

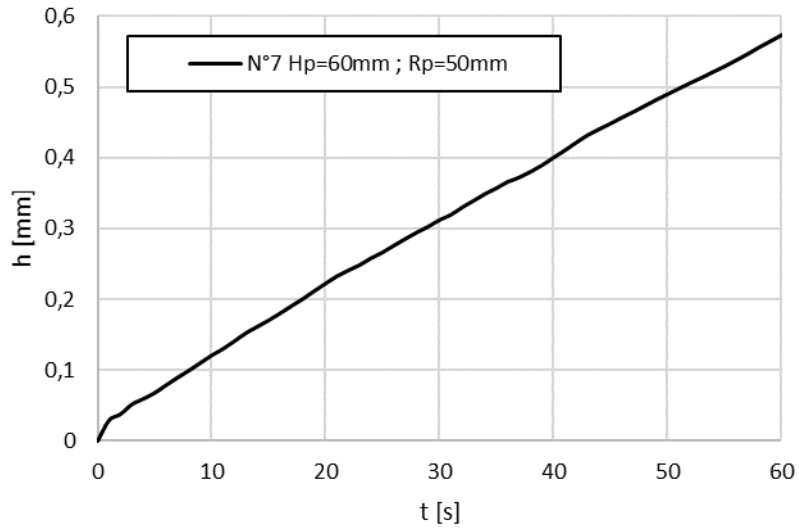


Figura 5-21: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°7 del Lote N°2

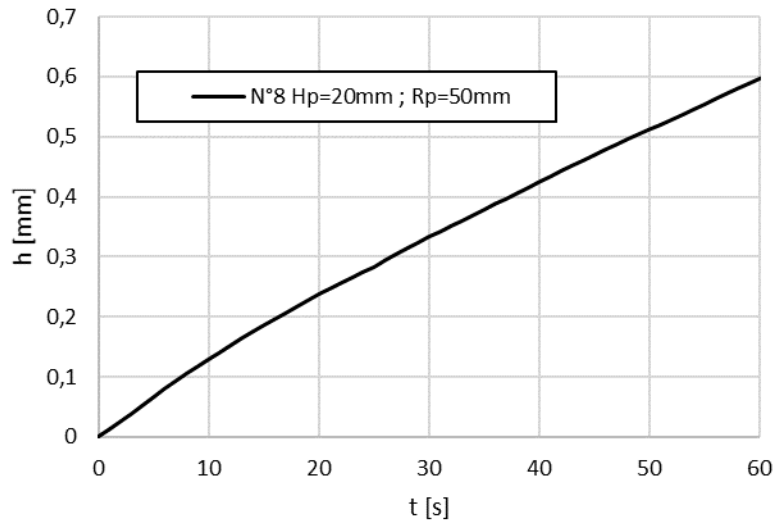


Figura 5-22: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°8 del Lote N°2

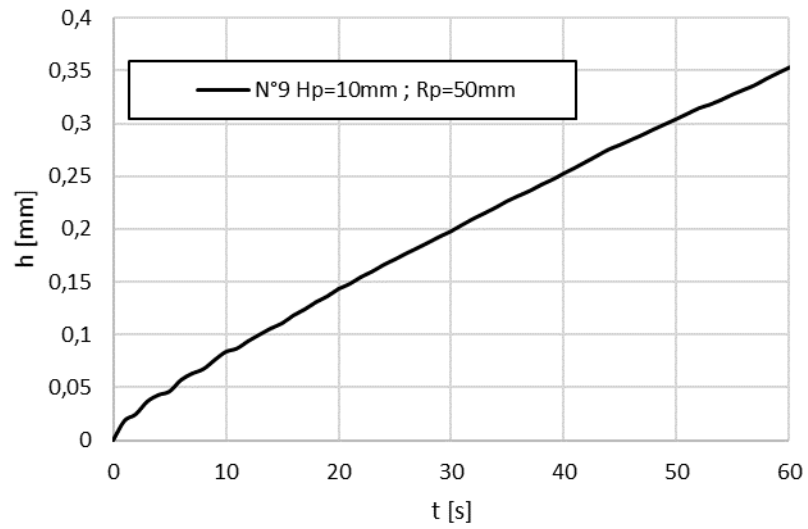


Figura 5-23: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°9 del Lote N°2

5.4.3 Gráficos de indentación lote N°3

Los gráficos mostrados en esta sección corresponden a la indentación en el tiempo obtenidos de los ensayos, hasta el segundo 60 de indentación, para el tercer grupo de nueve probetas distintas confeccionadas con un ligante asfáltico CA-24.

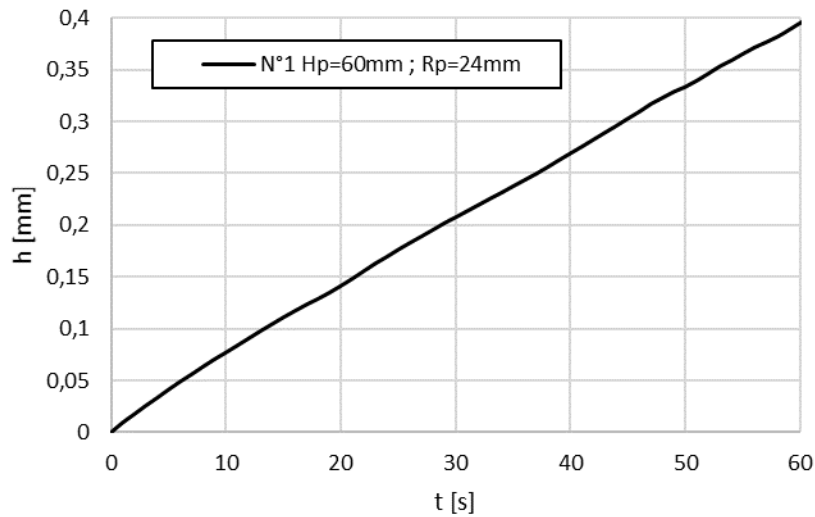


Figura 5-24: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°1 del Lote N°3

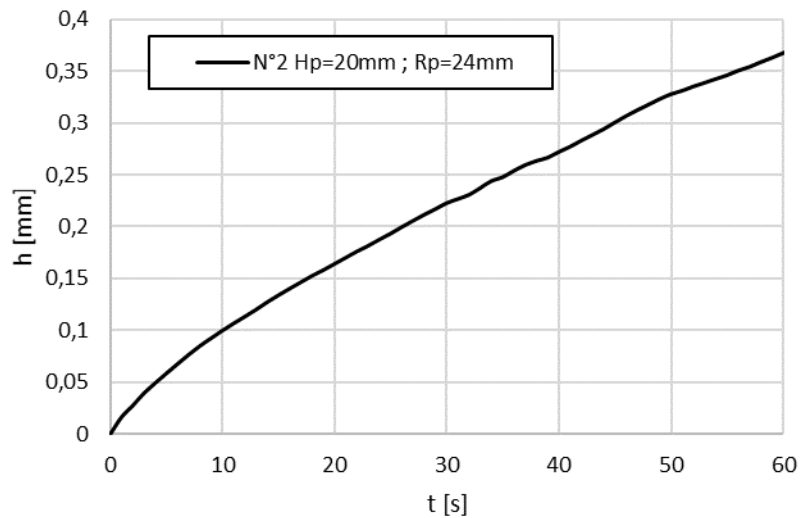


Figura 5-25: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°2 del Lote N°3

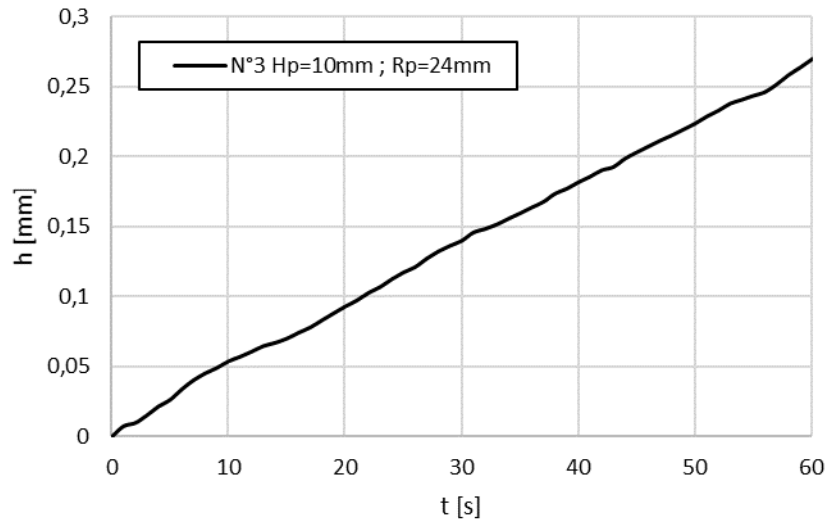


Figura 5-26: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°3 del Lote N°3

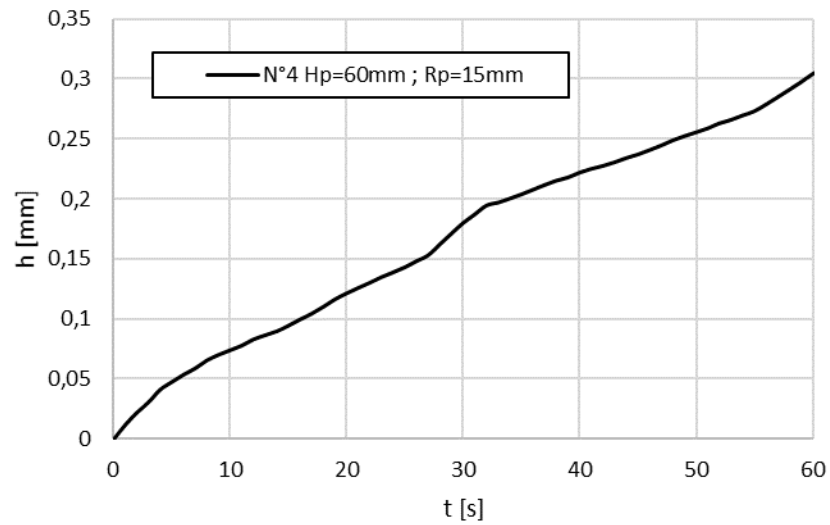


Figura 5-27: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°4 del Lote N°3

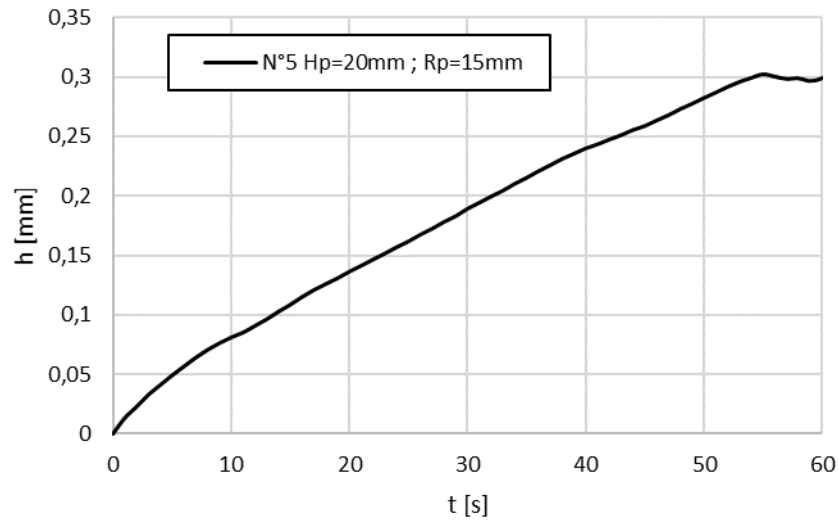


Figura 5-28: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°5 del Lote N°3

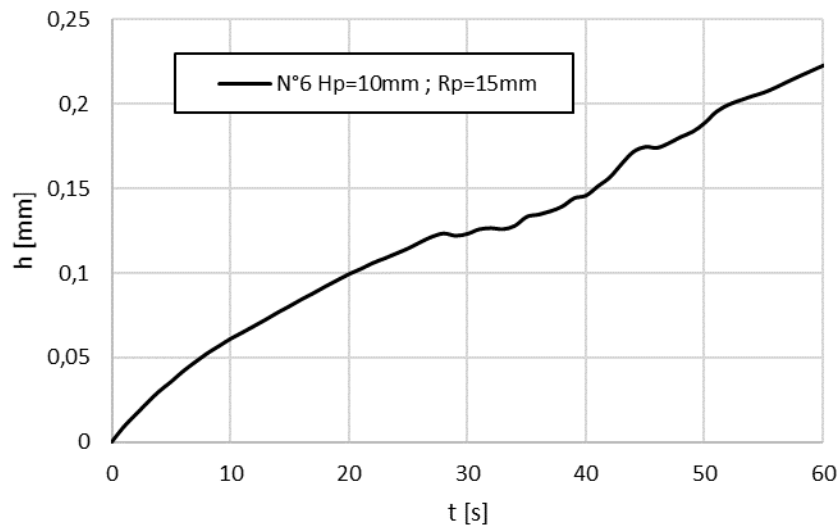


Figura 5-29: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°6 del Lote N°3

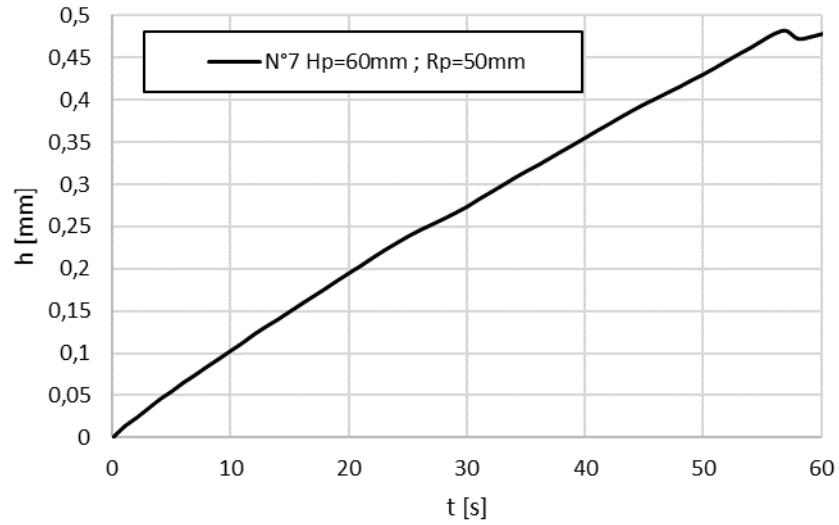


Figura 5-30: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°7 del Lote N°3

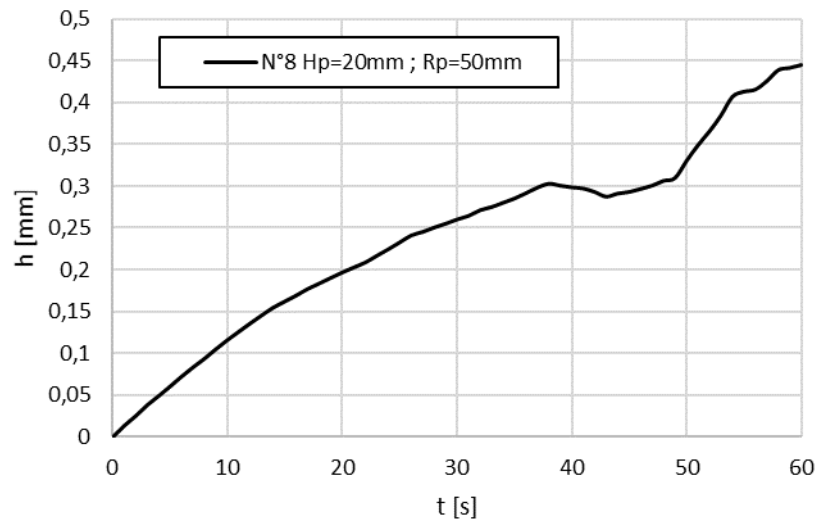


Figura 5-31: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°8 del Lote N°3

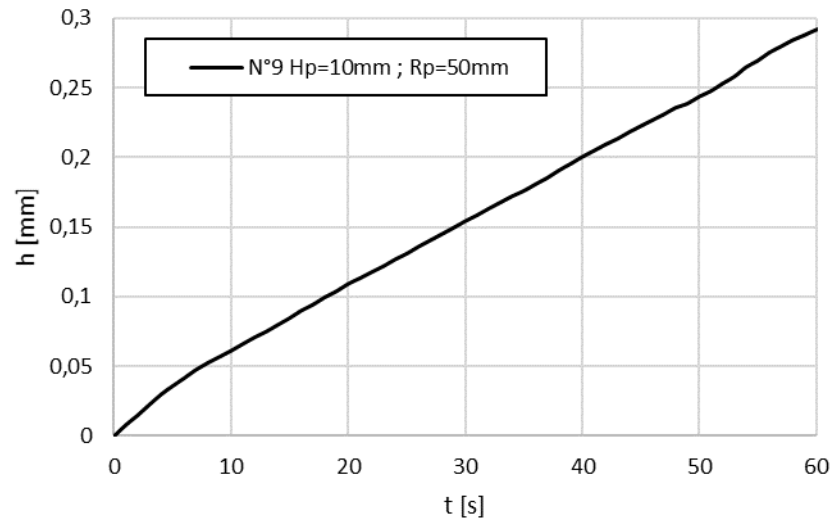


Figura 5-32: Gráfico de indentación corregido por contacto inicial y suavizado para la probeta N°9 del Lote N°3

Capítulo 6. Ensayo de “Creep” en el Reómetro de Corte Dinámico (DSR)

Mediante el uso de un equipo reómetro de corte dinámico (DSR) se realizaron mediciones de la curva de flexibilidad en fluencia en corte para los tres distintos lotes de probetas trabajadas en los ensayos de indentación. Los ensayos en este equipo se llevaron a cabo en paralelo a los ensayos de indentación, de los cuales se preparaba una muestra de material apartado para ser utilizado en el ensayo de flexibilidad en fluencia en el DSR.

6.1 Equipo reómetro de corte dinámico (DSR)

El reómetro de corte dinámico es un equipo de medición empleado para caracterizar el comportamiento reológico de materiales viscoelásticos. En este equipo el ligante asfáltico es sometido a un torque oscilante entre dos platos paralelos y mide su módulo complejo en corte (G^*) y su ángulo de fase (δ). El equipo calcula estos valores midiendo la respuesta de la deformación específica de corte del ligante, la cual se encuentra desfasada cierto intervalo de tiempo con respecto a la oscilación aplicada. Este intervalo de tiempo de desfase representa un retraso en la respuesta de deformación, en donde para materiales totalmente elásticos el retraso es nulo, mientras que para materiales totalmente viscosos la respuesta se encuentra totalmente desfasada. Esto quiere decir que para un caso totalmente elástico el ángulo de fase posee un valor de cero, contrario al caso de un material totalmente viscoso donde el ángulo de fase adquiere un valor de 90° . Dado esto, los materiales viscoelásticos tienen un ángulo de fase que varía entre los 0 y 90° , y dicho valor dependerá de la temperatura del ensayo y frecuencia de carga aplicada.

El reómetro de corte dinámico utilizado para este trabajo pertenece a la marca Paar Physica, modelo MCR 301. En este equipo los ligantes CA-24 utilizados para los ensayos de indentación son sometidos a un esfuerzo cortante de torsión entre placas paralelas de 25 mm de diámetro. Se utiliza una muestra de 1 mm de espesor colocada entre ambos platos circulares. Utilizando este equipo se obtienen las funciones de flexibilidad en fluencia en corte a 20°C de los ligantes asfálticos aplicando ensayos de “creep” a un nivel de esfuerzo constante de 100 Pa. La Figura 6-1 muestra el equipo DSR utilizado.

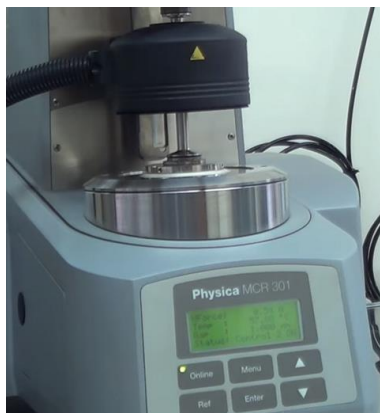


Figura 6-1: Reómetro de corte dinámico (DSR) marca Physica, modelo MCR 301

6.2 Ensayo de “creep” en el DSR

El equipo reómetro de corte dinámico es utilizado para obtener las curvas de flexibilidad en fluencia en corte de los ligantes asfálticos utilizados para los ensayos de indentación. El procedimiento de medición consiste en la colocación de una muestra de ligante asfáltico entre dos platos paralelos de cierto diámetro para luego aplicar un movimiento oscilatorio a una frecuencia y temperatura adecuada para producir esfuerzos de corte en la muestra. Las mediciones del equipo son controladas por un software denominado RheoPlus (Versión 3.40) que permite controlar las velocidades de giro, tensiones, nivel de deformaciones, temperatura, y otros parámetros.

Con el fin de conseguir la curva de flexibilidad en fluencia en corte del ligante asfáltico se siguen los pasos detallados a continuación.

6.2.1 Preparación de la muestra

Los dos métodos más comunes para preparar las muestras de ligante son la preparación en caliente y la preparación en frío. En este estudio las muestras han sido preparadas en frío, lo cual consiste en retirar la cantidad de ligante asfáltico necesaria de la muestra sin necesidad de recalentarlo. Para esto se utiliza un molde de silicona antiadherente, se pesa con el fin de tarar la pesa de tal manera que no se considere el peso del molde. Utilizando una espátula de metal se retira el ligante asfáltico a ensayar hasta lograr un peso de ligante necesario para cubrir los platos paralelos con un espesor de 1 mm.

6.2.2 Preparar el equipo DSR

Una vez encendido el equipo, éste debe ser inicializado para activar el cabezal de medición del reómetro de corte dinámico. Esto se logra iniciando el software RheoPlus y dentro del panel de control seleccionar la opción “Initialize”.

Luego se instalan cuidadosamente los platos paralelos, el plato superior se introduce en el cabezal del equipo mientras que el plato inferior se introduce en la base del equipo y es apretado utilizando la herramienta correspondiente al tamaño del plato.

Una vez instalado los instrumentos de medición y para que la posición de medición sea más precisa, se debe fijar el punto inicial del eje vertical de coordenadas y se debe considerar el efecto dilatador térmico que sufren los platos paralelos. Para esto, en el software RheoPlus se abre el panel de control y se selecciona la opción “Zero Gap”. Luego, en la sección de temperatura del software se introduce la temperatura de ensayo deseada de 20 °C y se espera el tiempo necesario para que los elementos alcancen dicha temperatura. Una vez transcurrido este tiempo se selecciona nuevamente la opción “Zero Gap”.

6.2.3 Colocación de la muestra

La muestra es colocada en el centro del plato inferior y en el software RheoPlus se introduce una temperatura de 60 °C y se espera el tiempo necesario para que la muestra de ligante asfáltico ocupe toda la superficie del plato inferior. Una vez ocupada totalmente la superficie del plato, utilizando el software RheoPlus con la opción de “Meas. Position” se baja el cabezal del reómetro hasta que la separación entre los platos sea de 1 mm. Finalmente se baja el cabezal del Peltier a fin de cubrir la muestra la que se encuentra lista para iniciar el ensayo.

6.2.4 Ensayo de flexibilidad en fluencia

En el software RheoPlus existe la opción de realizar un ensayo de “*creep and recovery*”, el cual consiste en medir el porcentaje de recuperación elástica del ligante sometidos a ciclos de carga y de relajación. En el caso de este trabajo solo interesa la primera parte de este ensayo, por lo que se modifican sus configuraciones para crear un nuevo método que permita obtener solo la curva de flexibilidad en fluencia.

Para tal propósito se siguen los siguientes pasos:

1. En la barra de herramientas del software se selecciona la opción “New” para iniciar un nuevo archivo de trabajo, luego en la pestaña “Asphalt” se selecciona “Creep and Recovery Test: Step Stress”.
2. En el panel de control del software se introduce la temperatura del ensayo que para este caso es de 20 °C y luego se abre la ventana con el nombre de “Measurement 1: Creep Test

/CSS". En esta ventana aparecen las configuraciones para los ciclos de "creep" y "recovery" a los cuales se verá sometida la muestra. Por defecto el software se encuentra configurado para dos ciclos de "creep" y dos ciclos de "recovery", los cuales son configurados para que tengan una duración de cero segundos a excepción del primer ciclo de "creep", y de esta forma someter la muestra solo al primer ciclo de cargas.

3. Finalmente se modifican las opciones del primer ciclo de cargas para que el valor de la carga sea un esfuerzo constante de 100 Pa y su duración de 60 segundos.

6.3 Curvas de flexibilidad en fluencia obtenidas del equipo DSR

Para este estudio se han ensayado tres grupos de ligante asfáltico CA-24, a una temperatura de 20 °C bajo una carga de esfuerzo de torsión constante de 100 Pa. Las muestras utilizadas han sido obtenidas del mismo ligante utilizado para los ensayos de indentación. Los gráficos siguientes muestran las curvas de flexibilidad en fluencia en 60 segundos obtenidas por medio del equipo reómetro de corte Dinámico para los tres distintos lotes estudiados. En las Figuras 6-2, 6-3 y 6-4 se muestran las curvas obtenidas por el equipo reómetro de corte dinámico para los tres distintos conjuntos de 9 probetas.

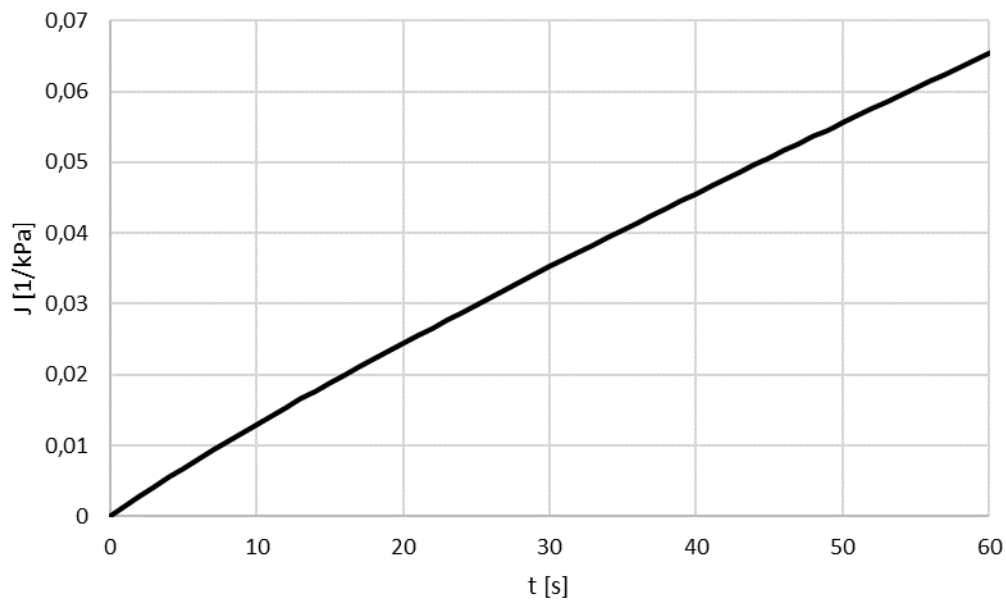


Figura 6-2: Curva de flexibilidad en fluencia obtenida por el equipo DSR para una muestra del Lote N°1 de ligante asfáltico

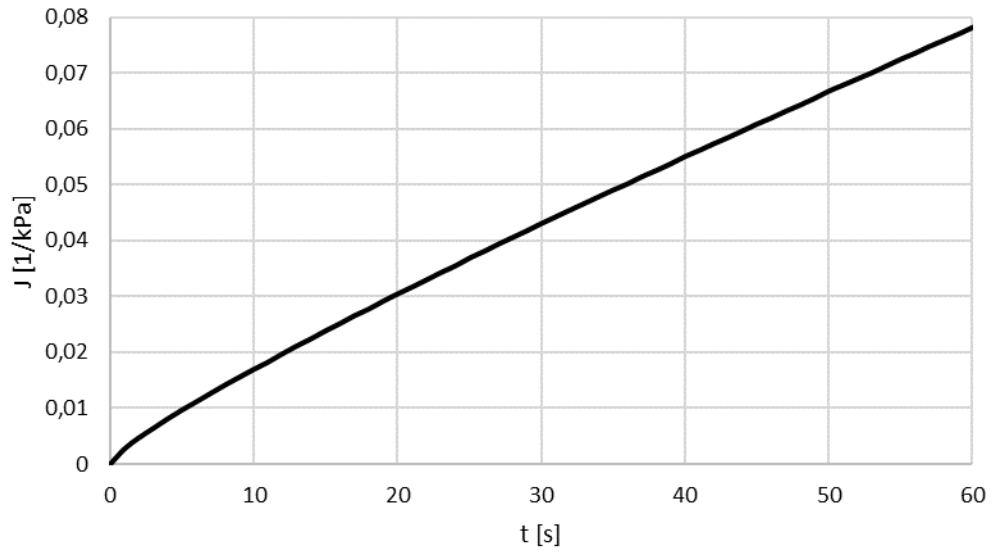


Figura 6-3: Curva de flexibilidad en fluencia obtenida por el equipo DSR para una muestra del Lote N°2 de ligante asfáltico

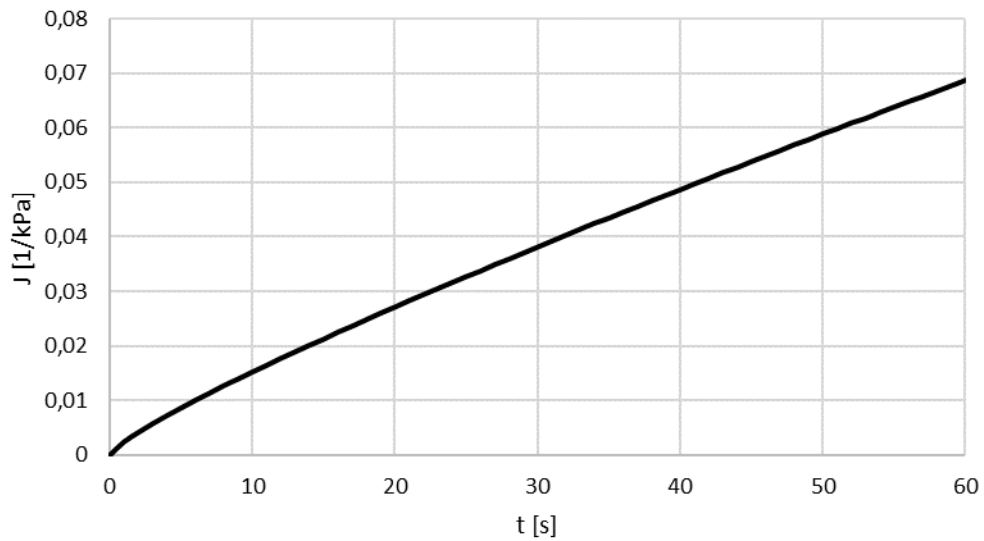


Figura 6-4: Curva de flexibilidad en fluencia obtenida por el equipo DSR para una muestra del Lote N°3 de ligante asfáltico

Capítulo 7. Análisis de los Resultados Obtenidos

En esta sección se estudian y analizan los resultados obtenidos tanto por ensayos experimentales de indentación como por los entregados por el equipo reómetro de corte dinámico. Una vez adquiridas las curvas de flexibilidad en fluencia de los ensayos de indentación y las curvas obtenidas por medio del equipo reómetro de corte dinámico, se pueden comparar los resultados y verificar si los factores de corrección obtenidos por medio del método de elementos finitos son aplicables para lograr un mismo resultado.

7.1 Efecto del tamaño finito de las probetas en los ensayos de indentación

En este apartado se comparan las curvas de indentación para las distintas probetas ensayadas para mostrar el efecto que implica trabajar con probetas de dimensiones finitas. Luego a estas curvas se les aplicarán los factores de corrección obtenidos computacionalmente por medio del método de elementos finitos para revisar si estos factores consiguen mitigar los efectos de los bordes (basal y lateral) finitos de las probetas.

7.1.1 Efecto del borde basal

Se han separado las curvas de indentación según el lote del ligante asfáltico con el cual fueron confeccionadas y para probetas de mismos diámetros, de esta forma el efecto lateral influye por igual para todas las probetas en un mismo grupo de comparación, siendo el efecto del borde basal el responsable de obtener distintos niveles de indentación.

Las Figuras 7-1 a 7-9 presentan la comparación de curvas para los diferentes lotes, en donde las probetas N°1-2-3 poseen un radio de 24 mm, las probetas N°4-5-6 un radio de 15 mm y las probetas N°7-8-9 un radio de 50 mm. Es posible observar en estos gráficos el efecto de la altura de la probeta en los ensayos, en general a menor altura de la probeta, mayor será el efecto del borde basal y por lo tanto menores serán los niveles de indentación.

a) Curvas Lote N°1

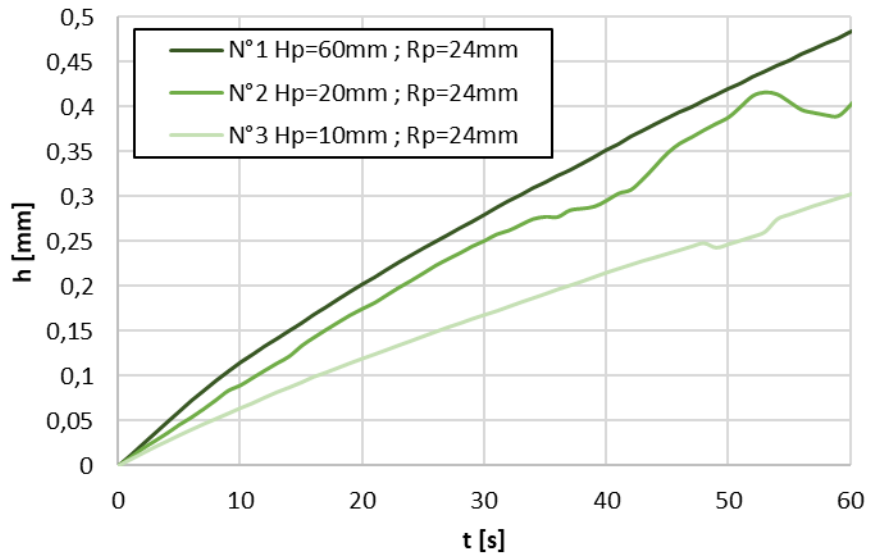


Figura 7-1: Curvas de indentación para distintas alturas de probeta con un R_p constante de 24 mm Lote N°1

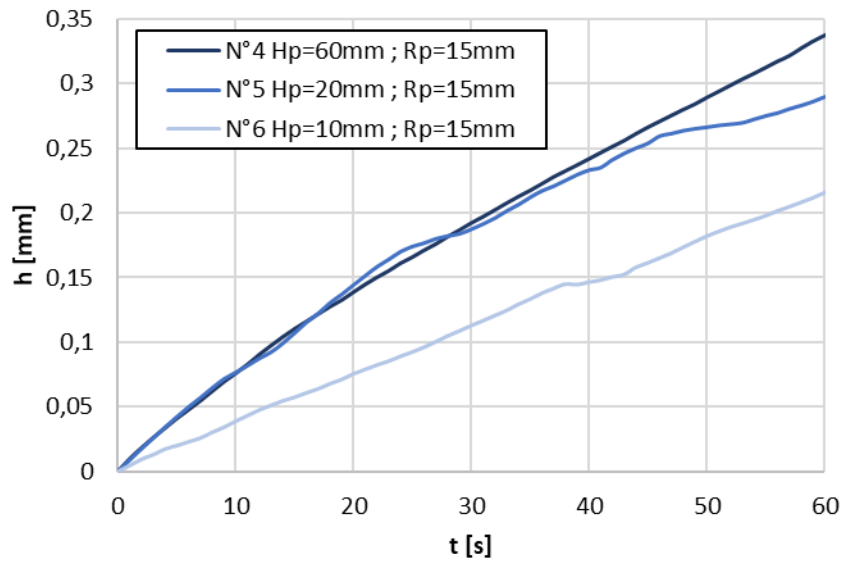


Figura 7-2: Curvas de indentación para distintas alturas de probeta con un R_p constante de 15 mm Lote N°1

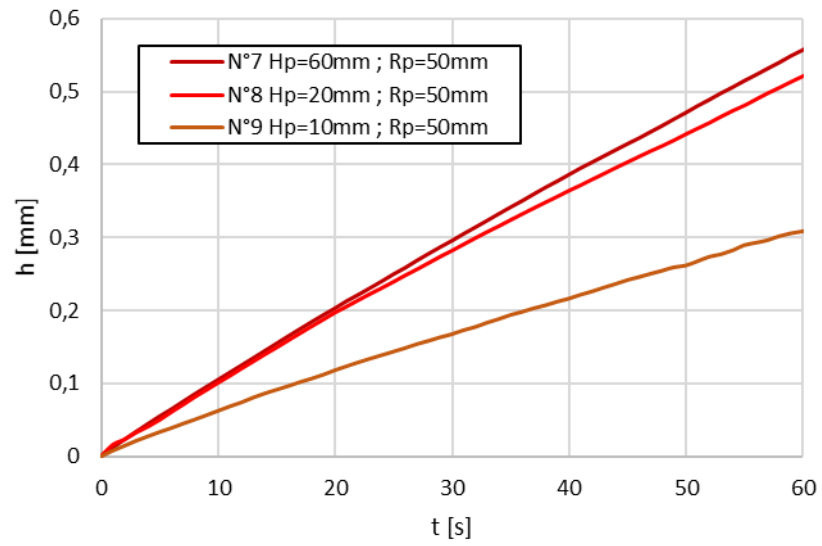


Figura 7-3: Curvas de indentación para distintas alturas de probeta con un R_p constante de 50 mm
Lote N°1

b) Curvas Lote N°2

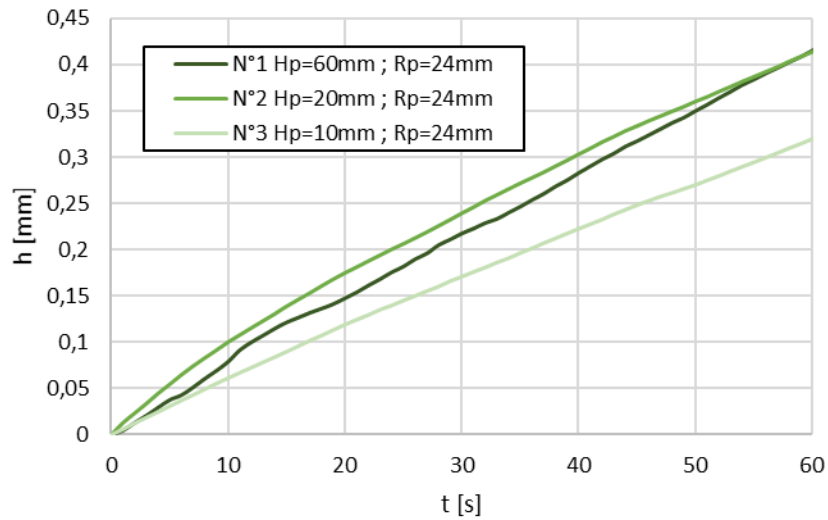


Figura 7-4: Curvas de indentación para distintas alturas de probeta con un Rp constante de 24 mm Lote N°2

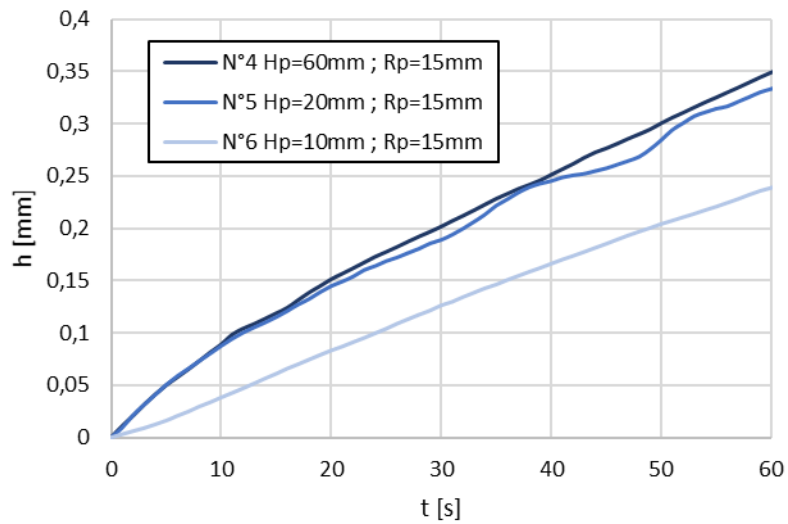


Figura 7-5: Curvas de indentación para distintas alturas de probeta con un Rp constante de 15 mm Lote N°2

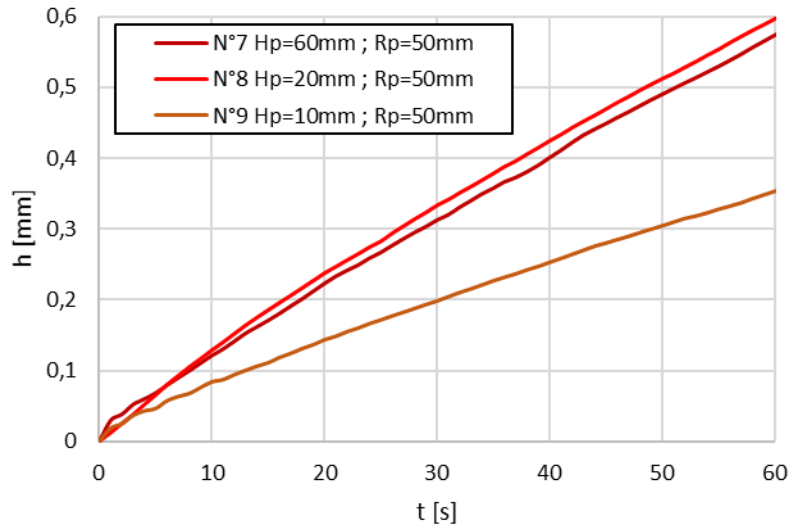


Figura 7-6: Curvas de indentación para distintas alturas de probeta con un R_p constante de 50 mm
Lote N°2

c) Curvas Lote N°3

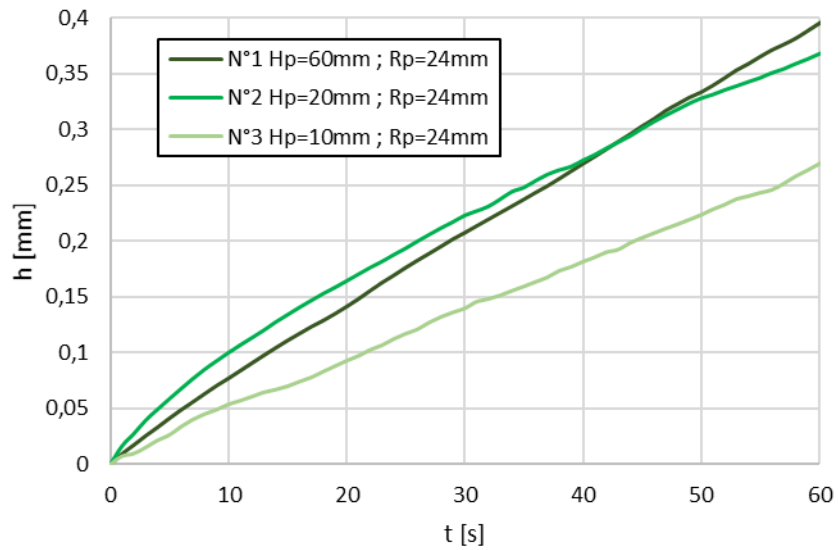


Figura 7-7: Curvas de indentación para distintas alturas de probeta con un R_p constante de 24 mm Lote N°3

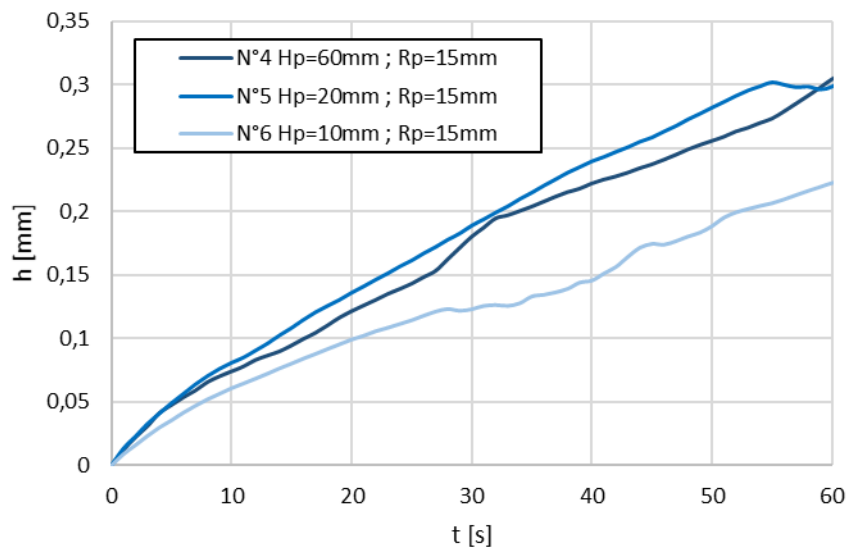


Figura 7-8: Curvas de indentación para distintas alturas de probeta con un R_p constante de 15 mm Lote N°3

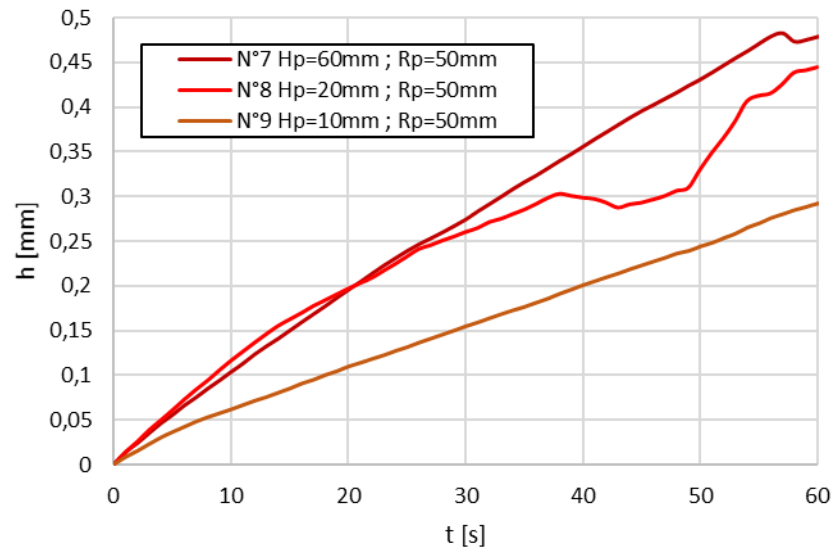


Figura 7-9: Curvas de indentación para distintas alturas de probeta con un R_p constante de 50 mm
Lote N°3

7.1.2 Efecto del borde lateral

De la misma forma que para comparar el efecto del borde basal, se han separado las curvas de indentación según lote de ligante asfáltico con el cual fueron confeccionadas y para probetas de misma altura. De esta forma el efecto basal influye de igual manera para todas las probetas en un mismo grupo de comparación, siendo el efecto del borde lateral el que sea el responsable de obtener distintos niveles de indentación.

Las Figuras 7-10 a 7-18 muestran la comparación de curvas para los diferentes lotes, en donde las probetas N°1-2-3 poseen un radio de 24 mm, las probetas N°4-5-6 un radio de 15 mm y las probetas N°7-8-9 un radio de 50 mm. Es posible observar en estos gráficos el efecto del contorno lateral de la probeta en los ensayos, en donde en general a menor radio, mayor será el efecto del borde lateral y por lo tanto menores serán los niveles de indentación.

a) Curvas Lote N°1

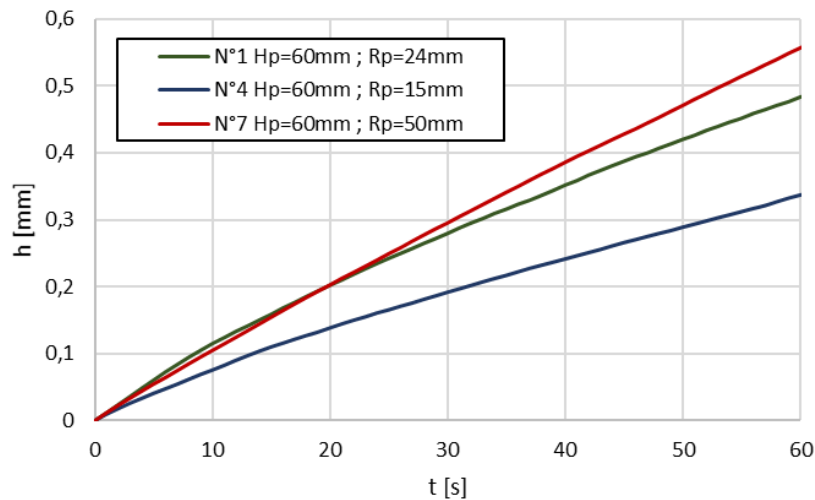


Figura 7-10: Curvas de indentación para distintos R_p de probeta con un H_p constante de 6 cm Lote N°1

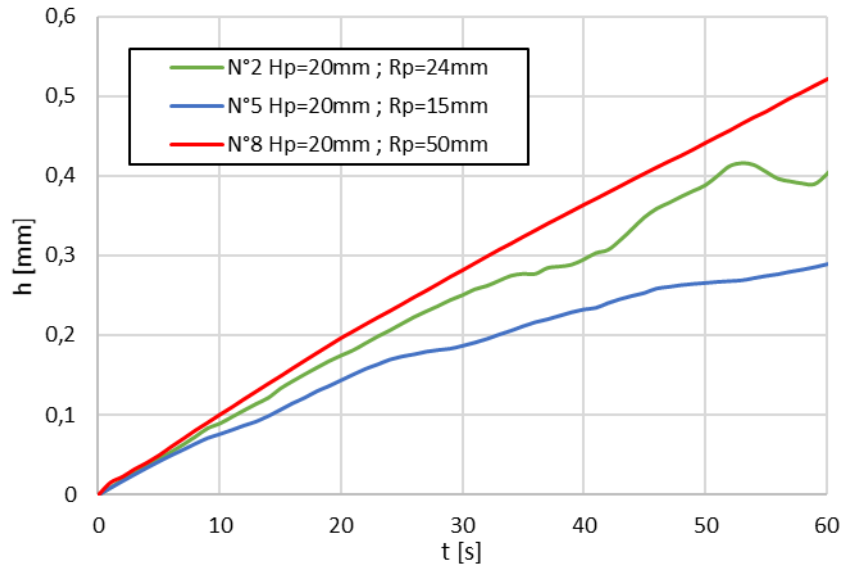


Figura 7-11: Curvas de indentación para distintos R_p de probeta con un H_p constante de 2 cm Lote N°1

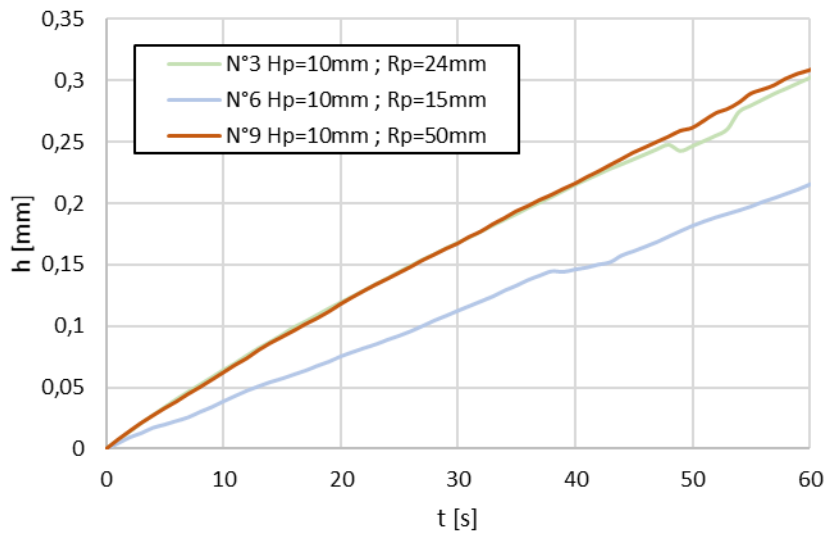


Figura 7-12: Curvas de indentación para distintos R_p de probeta con un H_p constante de 1 cm Lote N°1

b) Curvas Lote N°2

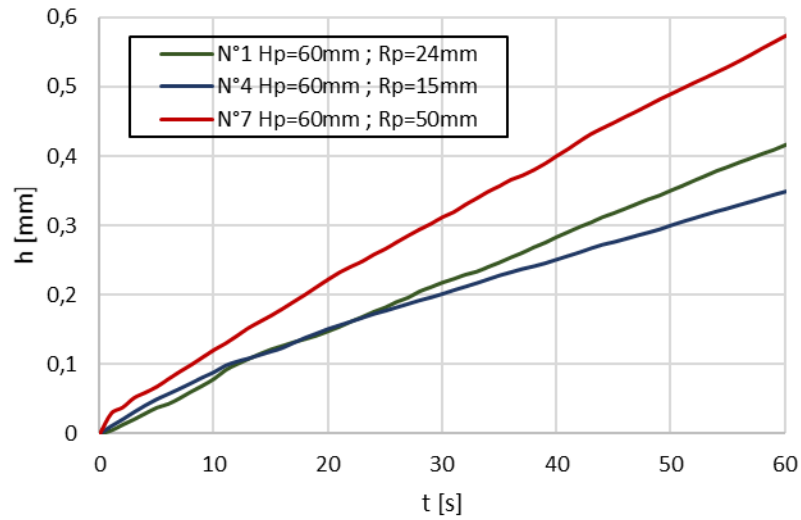


Figura 7-13: Curvas de indentación para distintos R_p de probeta con un H_p constante de 6 cm Lote N°2

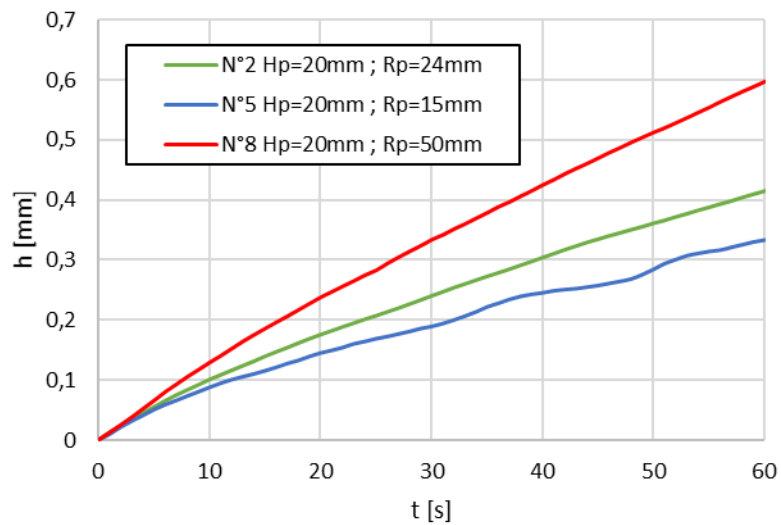


Figura 7-14: Curvas de indentación para distintos R_p de probeta con un H_p constante de 2 cm Lote N°2

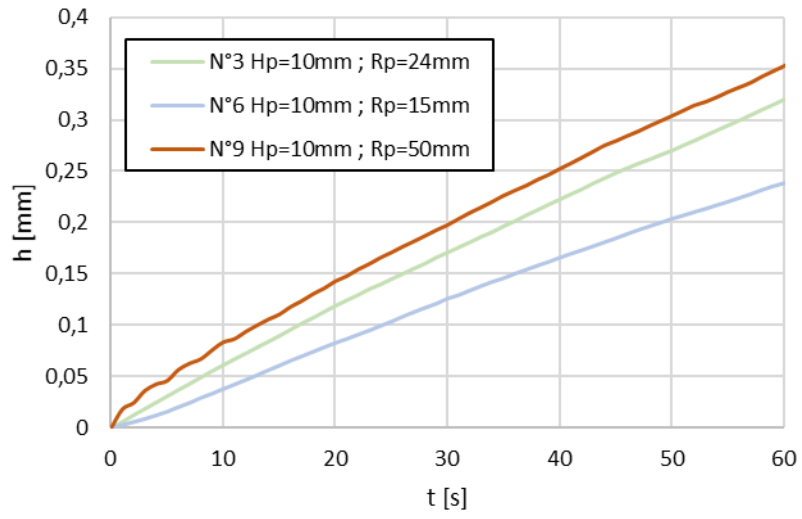


Figura 7-15: Curvas de indentación para distintos R_p de probeta con un H_p constante de 1 cm Lote N°2

c) Curvas Lote N°3

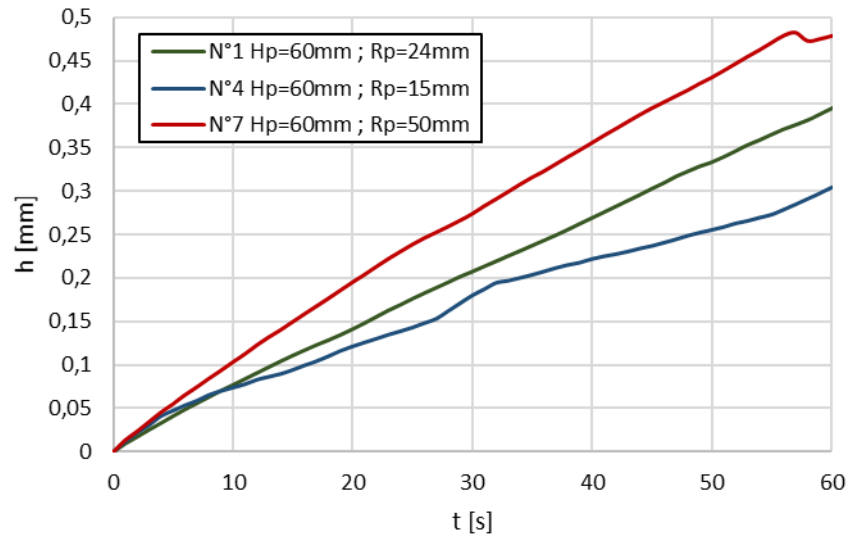


Figura 7-16: Curvas de indentación para distintos Rp de probeta con un Hp constante de 6 cm Lote N°3

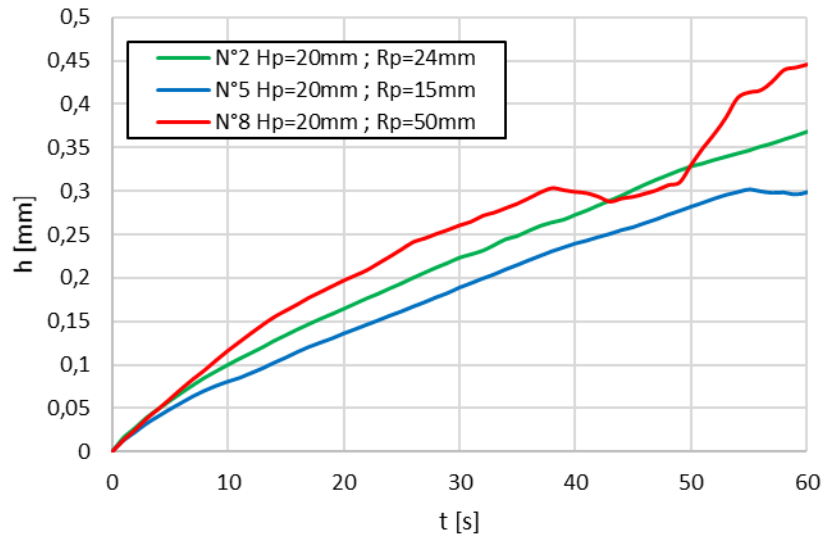


Figura 7-17: Curvas de indentación para distintos Rp de probeta con un Hp constante de 2 cm Lote N°3

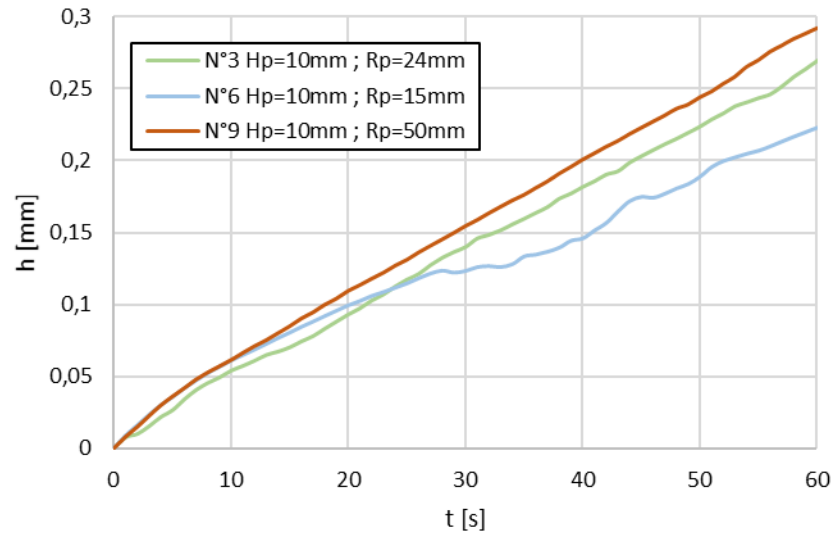


Figura 7-18: Curvas de indentación para distintos R_p de probeta con un H_p constante de 1 cm Lote N°3

7.2 Aplicación de los factores de corrección a las curvas

Con el objetivo de observar el efecto de los factores de corrección obtenidos computacionalmente por medio del método de elementos finitos, se presenta en las Figuras 7-19 a 7-24 el conjunto de todas las curvas de indentación separadas por lote, aplicando los factores correspondientes. La Tabla 7-1 muestra los factores de corrección aplicados para las distintas configuraciones de tamaño de las probetas.

Tabla 7-1: Factores de corrección basal y lateral aplicados según dimensión radial o basal de la probeta

Hp [mm]	FC Basal
10,0	1,9
20,0	1,3
60,0	1,1
Rp [mm]	FC Lateral
15,0	2,2
24,0	1,5
50,0	1,1

El factor de corrección total utilizado para corregir las mediciones de indentación en un medio de dimensiones finitas considerando simultáneamente los efectos del borde lateral y del borde basal se calcula de la siguiente manera:

$$FC_T = \frac{h_h}{h_f} = 1 + (FC_{Lateral} - 1) + (FC_{Basal} - 1) \quad (\text{Ec. 7.1})$$

Donde:

FC_T : Factor de corrección total debido simultáneamente al borde basal y lateral.

h_h : Indentación en un medio homogéneo semi-infinito.

h_f : Indentación en un medio con dimensiones finitas.

$FC_{Lateral}$: Factor de corrección asociado al borde lateral de la probeta.

FC_{Basal} : Factor de corrección asociado al borde basal de la probeta.

Puesto que los factores de corrección buscan eliminar los efectos de borde de la probeta, una vez aplicados lo esperable es que todas las curvas resulten idénticas, ya que se está trabajando con un mismo material para cada una de las 9 probetas de un lote. Este resultado se puede observar

claramente al aplicar los factores de corrección, en donde las curvas nuevas corregidas resultan ser similares entre sí. Lo anterior es mostrado en las Figuras 7-19 a 7-24.

a) Curvas Lote N°1

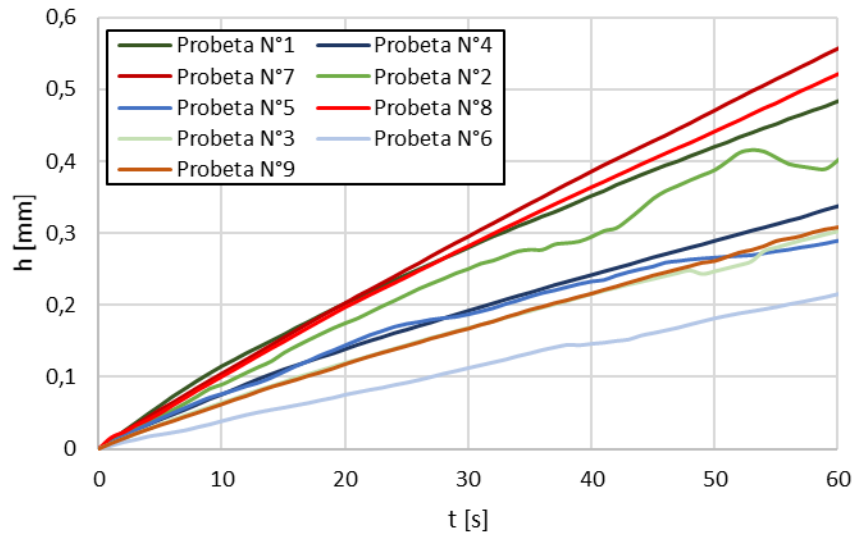


Figura 7-19: Curvas de indentación de todos los ensayos lote N°1 sin aplicar factores de corrección por tamaño finito de las probetas

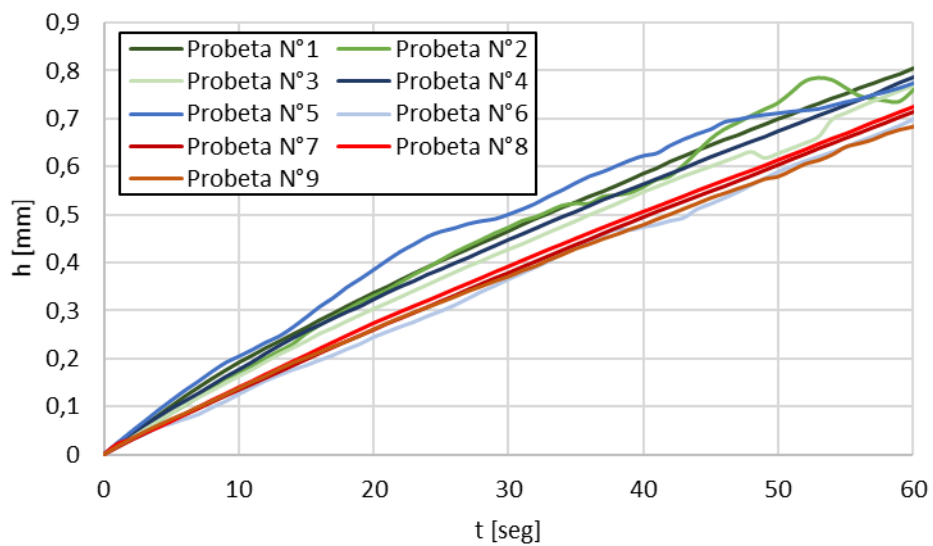


Figura 7-20: Curvas de indentación de todos los ensayos lote N°1 aplicando los factores de corrección por tamaño finito de las probetas

b) Curvas Lote N°2

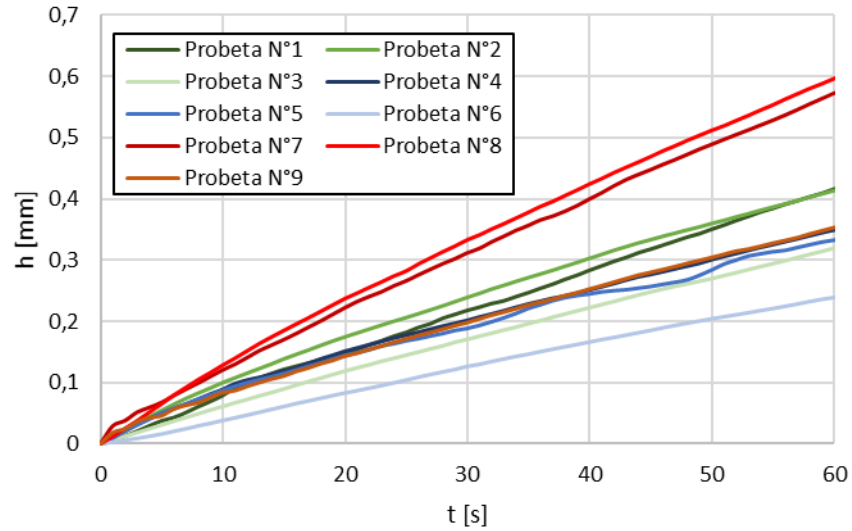


Figura 7-21: Curvas de indentación de todos los ensayos del lote N°2 sin aplicar factores de corrección por tamaño finito de las probetas

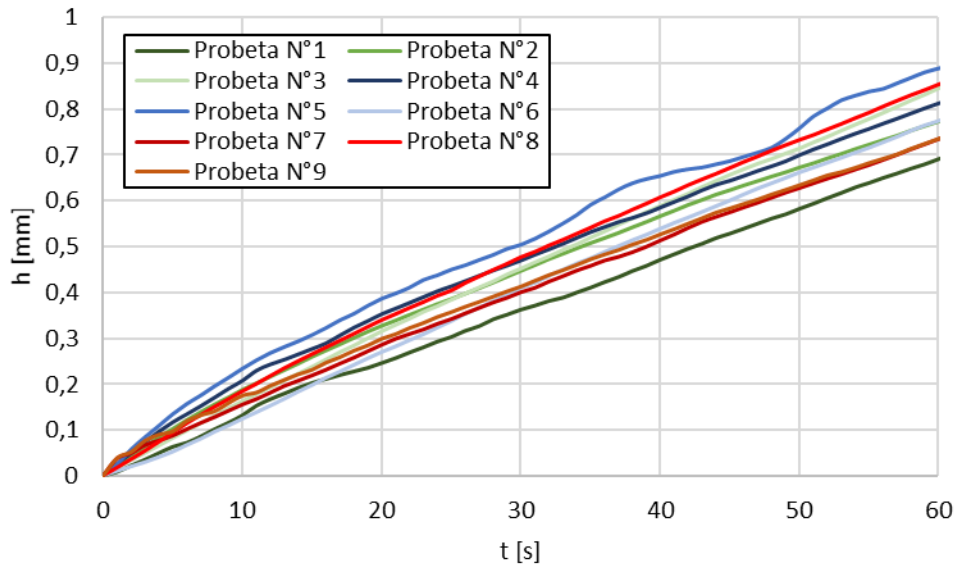


Figura 7-22: Curvas de indentación de todos los ensayos lote N°2 aplicando los factores de corrección por tamaño finito de las probetas

c) Curvas Lote N°3

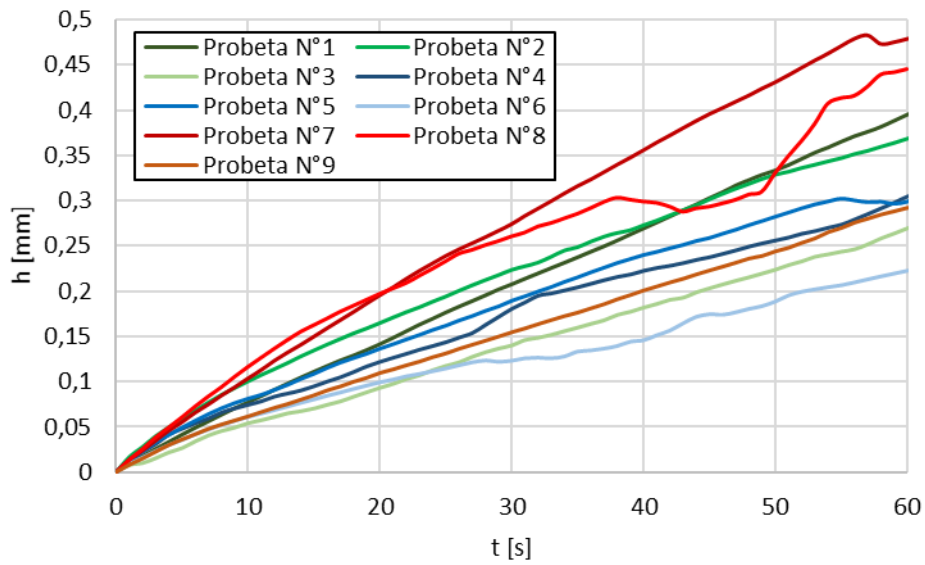


Figura 7-23: Curvas de indentación de todos los ensayos del lote N°3 sin aplicar factores de corrección por tamaño finito de las probetas

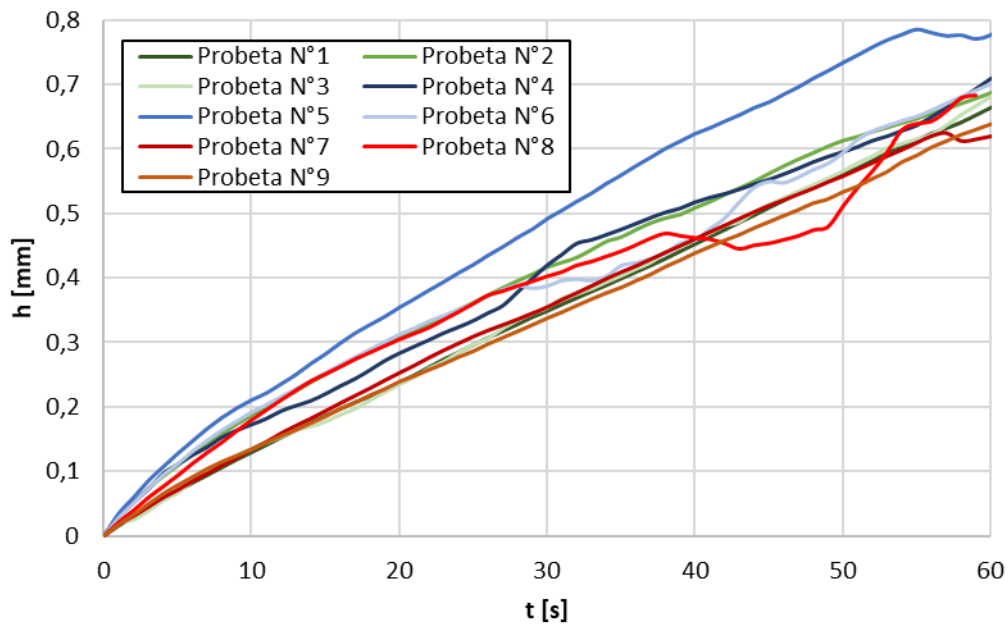


Figura 7-24: Curvas de indentación de todos los ensayos del lote N°3 aplicando los factores de corrección por tamaño finito de las probetas

7.3 Comparación de curvas de flexibilidad en fluencia obtenidas por ensayos de indentación y por el equipo DSR

Uno de los objetivos de este estudio es comprobar la posibilidad de obtener la curva de flexibilidad en fluencia en corte de un ligante asfáltico mediante el uso de ensayos de indentación. Para tal caso interesa revisar y comparar los resultados obtenidos por medio del equipo reómetro de corte dinámico y por medio de ensayos de indentación.

Las curvas de flexibilidad en fluencia asociadas a cada ensayo de indentación se pueden obtener directamente de sus curvas de indentación. Para esto, estas últimas son corregidas utilizando la ecuación 7.1, con los factores de corrección respectivos. Luego, aplicando la ecuación 2.30 a cada punto de las curvas de indentación corregidas, se obtienen finalmente las curvas de flexibilidad en fluencia

Una vez transformadas las curvas de indentación a curvas de flexibilidad en fluencia en corte se comparan con las curvas obtenidas por el equipo reómetro de corte dinámico (DSR) asociado a cada lote de muestras. En las Figuras 7-25 a 7-27 mostradas en esta sección se puede verificar que, si bien las curvas de flexibilidad en fluencia en corte obtenidas por ensayos de indentación difieren de las obtenidas por el equipo DSR, mantienen un mismo orden de magnitud presentado errores en promedio del orden del 10%.

a) Curvas Lote N°1

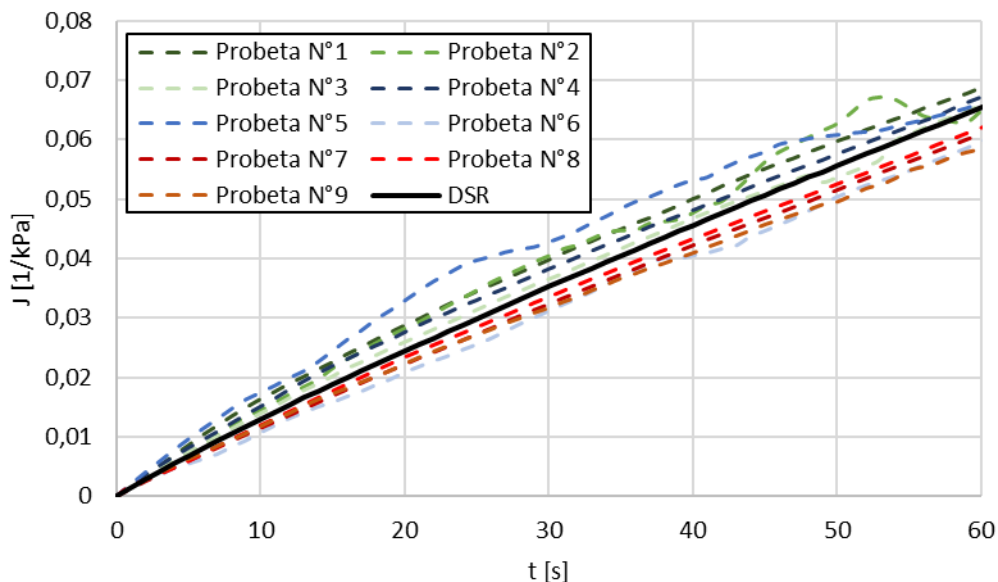


Figura 7-25: Curvas de flexibilidad en fluencia en corte asociados a todos los ensayos de indentación y DSR del ligante asfáltico del Lote N°1

b) Curvas Lote N°2

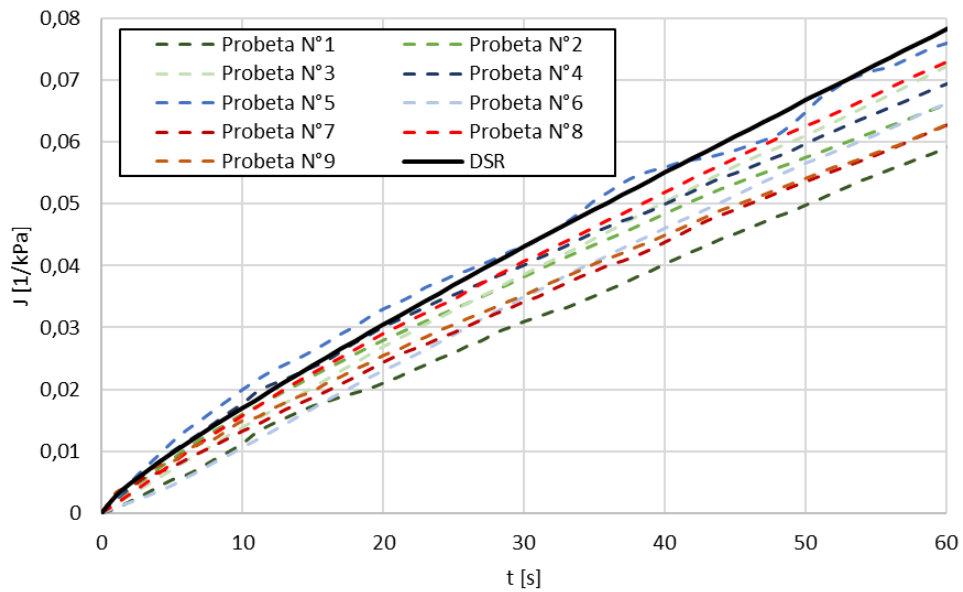


Figura 7-26: Curvas de flexibilidad en fluencia asociados a todos los ensayos de indentación y DSR del material de ligante del Lote N°2

c) Curvas lote N°3

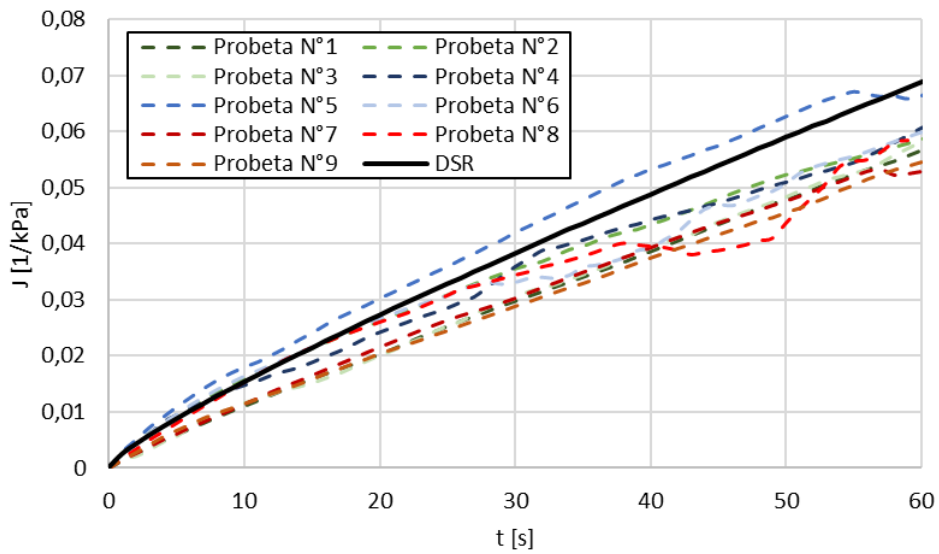


Figura 7-27: Curvas de flexibilidad en fluencia asociados a todos los ensayos de indentación y DSR del material de ligante del Lote N°3

Capítulo 8. Conclusiones

El presente trabajo corresponde a una continuación de la investigación realizada por **Filonzi [2013]** quien desarrolló la modelación e implementó ensayos simples de indentación utilizando un equipo de penetración modificado para obtener propiedades viscoelásticas del ligante asfáltico. En su trabajo analizó un total de tres geometrías de indentadores las cuales poseen soluciones analíticas, estas geometrías son: esférica, cónica, y cilíndrica. Estas soluciones analíticas se encuentran bajo el supuesto de un medio semi-infinito y sin fricción en la interfase, lo cual no siempre se puede cumplir dado el tamaño finito de las probetas reales con las que se trabaja, las cuales están condicionadas por sus bordes basales y laterales. Para este efecto, desarrolló factores de corrección para cada tipo de geometría de indentador estudiada y que dependen de los parámetros adimensionales a/R_p y a/H_p , en donde a corresponde al radio de contacto del indentador con la superficie del medio que se está indentando, R_p al radio de la probeta y H_p a la altura de la probeta. Estos factores de corrección permiten igualar los tamaños de las probetas y así comparar los resultados como si se trataran de indentaciones en medios semi-infinitos.

Los ensayos experimentales de indentación con geometría cilíndrica demostraron que para relaciones de a/R_p cercanas a la unidad, los factores de corrección lateral obtenidos por **Filonzi [2013]** no cumplen con el objetivo de eliminar los efectos de borde lateral de las probetas. Es por esto que en este trabajo se han modelado computacionalmente, utilizando el software ANSYS, ensayos de indentación con indentadores de geometría cilíndrica sobre un material viscoelástico y resuelto el problema de indentación mediante el uso del método de elementos finitos. El objetivo de estos modelos computacionales es obtener factores de corrección tanto para condiciones impuestas por el borde lateral como el borde basal, y comparar estos resultados con los factores de corrección ya determinados anteriormente.

De los resultados obtenidos de varios modelos computacionales de indentación se ha concluido que el factor de corrección debido al borde basal de la probeta es prácticamente idéntico al obtenido anteriormente por **Filonzi [2013]**. Sin embargo, para el factor de corrección asociado al borde lateral, éste se encuentra bastante subestimado, donde el error crece a medida que la relación a/R_p se aproxima al valor de 1. Esto se debe a que el estudio para calcular los factores de corrección lateral realizado por **Filonzi [2013]** no considera el efecto de expansión volumétrica que sufre el material viscoelástico inducidas por la compresión del indentador. A medida que la relación a/R_p se acerca al valor de la unidad, el indentador cubre un mayor porcentaje de la superficie libre del ligante asfáltico, provocando que este efecto de expansión se vuelva más importante debido a que existe una menor área donde se pueden distribuir estas expansiones de volumen.

Utilizando la técnica del método de elementos finitos para resolver una extensa cantidad de modelos de indentaciones cilíndricas, se ha confeccionado una nueva curva de factores de corrección de borde lateral con el fin de utilizarla posteriormente para ensayos experimentales de indentación cilíndrica y revisar si se obtienen resultados adecuados comparándolos con los obtenidos por el equipo reómetro de corte dinámico.

Se realizaron ensayos de indentación en laboratorio para tres grupos de nueve probetas de distintas dimensiones con el objetivo de verificar si es posible obtener curvas de flexibilidad en

fluencia en corte idénticas a las entregadas por el equipo reómetro de corte dinámico (DSR) aplicando los nuevos factores de corrección resultante de los modelos computacionales. Estos tres grupos no han podido compararse entre sí debido a que sus probetas fueron confeccionadas de manera independiente, utilizando para cada grupo distintos contenedores de ligante asfálticos con diferentes tiempos de envejecimiento por almacenamiento.

De estos ensayos, dentro de cada grupo de ligante CA-24 utilizado para confeccionar las nueve probetas, se han obtenido resultados bastante satisfactorios al aplicar los factores de corrección adecuados a los distintos tamaños de las probetas. Una vez corregidas las curvas, estas se acercan bastante entre sí lo cual es esperable ya que los factores de corrección buscan eliminar los efectos de dimensión finita de las probetas, por lo que, al tratarse de una indentación de un mismo material, en las mismas condiciones, deberían resultar curvas idénticas.

Conseguido lo anterior se transforman las curvas de indentación corregidas a curvas de flexibilidad en fluencia para compararlas con las obtenidas utilizando el equipo de reómetro de corte dinámico. De esta comparación resultan curvas bastante similares a las entregadas por el DSR, sin embargo, aún se alcanzan ciertos grados de error (del orden del 10%, alcanzando errores máximos del 25% para los casos más extremos).

Estos resultados ponen en evidencia la capacidad de los ensayos de indentación para caracterizar ligantes asfálticos, más concretamente, para determinar su flexibilidad en fluencia. Las ventajas que presenta este método resulta en un equipo de menor costo, comparado con el reómetro de corte dinámico. Sin embargo, existen algunos aspectos que dificultan los ensayos y probablemente son los causantes de los errores que se pueden observar en algunas curvas. Estas dificultades son explicadas a continuación:

- 1- Los resultados obtenidos durante los ensayos de indentación son muy sensibles en la etapa asociada al contacto inicial, en donde el operario debe ser capaz de realizar los ajustes necesarios para evitar que se produzcan errores notables.
- 2- Previo a la indentación, es necesario un adecuado posicionamiento de la superficie plana del indentador junto a la superficie de la probeta, minimizando la distancia que separa ambas superficies.
- 3- Se debe lograr la perpendicularidad entre el indentador y la superficie del material a indentar, la cual se ve dificultada por varios factores como la nivelación de la superficie de la probeta, el desalineamiento con la vertical provocado por el sistema de sujeción del penetrómetro, entre otras.
- 4- La precisión del aparato utilizado para medir la profundidad de indentación es del orden de la décima de milímetro. Junto a esto, el penetrómetro utilizado no cuenta con un marcador digital, si no con uno análogo, por lo que su medición debe ser tomada visualmente por el operario.

Se deben considerar futuras mejoras para el ensayo que permitieran una mayor automatización y mejora para la aplicación inicial de la indentación, resolviendo los problemas de contacto inicial anteriormente mencionados. De igual forma, debido a los bajos niveles de indentación, se debe considerar una forma automatizada de adquirir las medidas de indentación del penetrómetro.

Capítulo 9. Referencias

ASTM D70 - 18a. "Standard Test Method for Density of Semi-Solid Asphalt Binder (Pycnometer Method)", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

ASTM D5. "Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials".

Bahia, H., Meruva, A., Velasquez, R. "Modification of the Penetration Test to Measure Rheological Properties of Bitumen". *Asfaltos y Pavimentos*, 2011.

Bowden, F., Tabor, D. "The friction and lubrication of solids". Oxford University Press, 2001.

Benedetto, H. Delaporte, B., y Sauzéat, C. "Three-Dimensional Linear Behavior of Bituminous Materials: Experiments and Modeling". *International Journal of Geomechanics*. 2007; 7(2): 149-157, 2007.

Carrión, H., Ochoa, B. "Modelación del hormigón asfáltico y obtención de sus parámetros mediante técnicas de optimización" [Ingeniero civil]. Universidad de Cuenca; 2011.

Choi, S., Lee, S., Earmme, Y. "Measurement of time-dependent adhesion between a polymer film and a flat indenter tip". *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2008; 41(7):074023.

Delgadillo, R., Bahia, H., Lakes, R. "A nonlinear constitutive relationship for asphalt binders". *Materials and Structures*. 2011; 45(3):457-473.

Delgadillo, R., Cho, D., Bahia, H. "Part 1: Bituminous Materials: Nonlinearity of Repeated Creep and Recovery Binder Test and Relationship with Mixture Permanent Deformation". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2006; 1962:3-11.

Delgadillo, R., Filonzi, A., Bahia, H., Roohi Sefidmazgi, N. "Creep compliance of asphalt binders by indentation". *Revista de la construcción*. 2018; 17(1):85-95.

Fadil H., Jelagin D., Larsson P. "On the Measurement of two Independent Viscoelastic Functions with Instrumented Indentation Tests". *Experimental Mechanics*. 2018; 58(2):301-314.

Ferry, J. "Viscoelastic properties of polymers". New York: J. Wiley; 1980.

Filonzi, A. "Modelación de deformaciones por ensayo de indentación en ligantes asfálticos" [Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil]. UTFSM, Departamento de Obras Civiles; 2013.

Filonzi, A., Delgadillo, R. "Sample size correction factors for indentation on asphalt bitumens". *Construction and Building Materials*. 2017; 154:877-883.

Gonzales, A. "Determinación de las Propiedades Viscoelásticas de Betunes Asfálticos Tradicionales y Modificados Mediante la Utilización del Reómetro de Corte Dinámico (DSR)" [Ingeniero Civil]. UTFSM, Departamento de Obras Civiles; 2012.

Han, S., Saha, R., Nix, W. "Determining hardness of thin films in elastically mismatched film-on-substrate systems using nanoindentation". *Acta Materialia*. 2006; 54(6):1571-1581.

Hertz, H. "Ueber die Berührung fester elastischer Körper". *Journal für die reine und angewandte Mathematik (Crelles Journal)*. 1882; 1882(92):156-171.

Hildebrand, F. "Introduction to numerical analysis". 1956.

Johnson, K. "Contact mechanics". Cambridge: Cambridge University Press; 1987.

Johnson, K., Kendall, K., Roberts, A. "Surface Energy and the Contact of Elastic Solids". *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1971; 324(1558):301-313.

Jones, E. "Documentation for Matlab-based DIC code". 2013.

Lakes, R. "Viscoelastic Materials". Cambridge University Press, 2009.

Lee, E. "Stress analysis in visco-elastic bodies". *Quarterly of Applied Mathematics*. 1955; 13(2):183-190.

Lee, E., Radok, J. "The Contact Problem for Viscoelastic Bodies". *Journal of Applied Mechanics*. 1960; 27(3):438-444.

Li, H., Vlassak, J. "Determining the elastic modulus and hardness of an ultra-thin film on a substrate using nanoindentation". *Journal of Materials Research*. 2009; 24(3):1114-1126.

Li, J., Yang, F. "Micro and Nano Mechanical Testing of Materials and Devices". Boston, MA: Springer US; 2008.

Lu, H., Wang, B., Ma, J., Huang, G., Viswanathan, H. "Measurement of Creep Compliance of Solid Polymers by Nanoindentation". *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2003; 7(3/4):189-207.

Manual de Carreteras Volumen N°8. "Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control". Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas de Chile, 2019.

Ossa, E., Deshpande, V., Cebon, D. "Spherical indentation behaviour of bitumen". *Acta Materialia*. 2005; 53(11):3103-3113.

Panchenko, S. "NUMERICAL SIMULATION OF VISCOELASTIC MATERIALS". *Science and Transport Progress Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2014; 0(5(53)):157.

Park S., Kim Y." Interconversion between Relaxation Modulus and Creep Compliance for Viscoelastic Solids". *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1999; 11(1):76-82.

Pérez-Jiménez, F., Botella, R., Miró, R., Martínez, A. "Analysis of the thixotropic behavior and the deterioration process of bitumen in fatigue tests". *Construction and Building Materials*. 2015; 101:277-286.

Sneddon, I. "The relation between load and penetration in the axisymmetric boussinesq problem for a punch of arbitrary profile". *International Journal of Engineering Science*. 1965; 3(1):47-57.

Ting, T. "The Contact Stresses Between a Rigid Indenter and a Viscoelastic Half-Space". *Journal of Applied Mechanics*. 1966; 33(4):845-854.

Tweedie, C., Van Vliet, K. "Contact creep compliance of viscoelastic materials via nanoindentation". *Journal of Materials Research*. 2006; 21(6):1576-1589.

Yu, H., Sanday, S., Rath, B. "The effect of substrate on the elastic properties of films determined by the indentation test — axisymmetric boussinesq problem". *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1990; 38(6):745-764.

Zofka, A., Nener-Plante, D. "Determination of Asphalt Binder Creep Compliance Using Depth-Sensing Indentation". *Experimental Mechanics*. 2011; 51(8):1365-1377.

Capítulo 10. Anexos

ANEXO A – Análisis de los resultados de obtenidos

A.1. Gráficos Brutos

a) Lote N° 1:

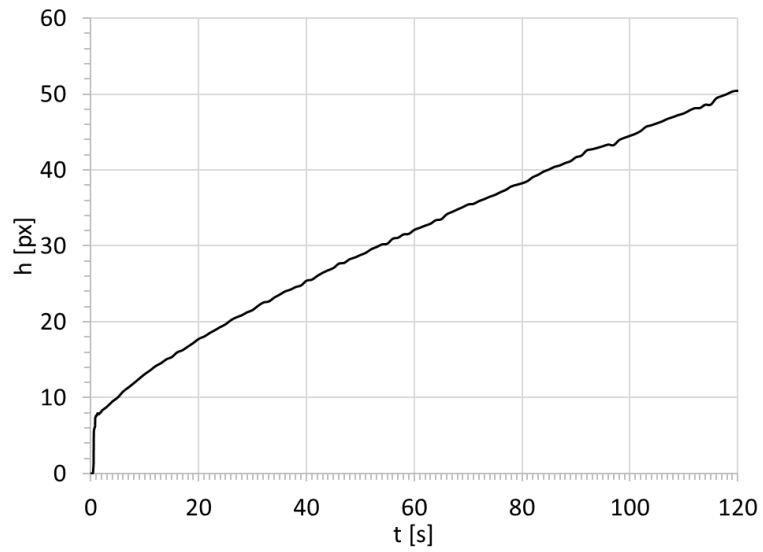


Figura 10-1: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°1 del Lote N°1

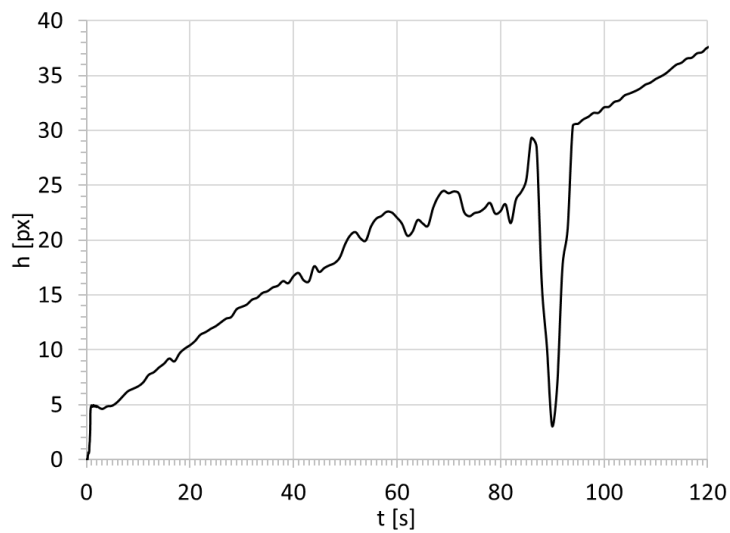


Figura 10-2: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°2 del Lote N°1

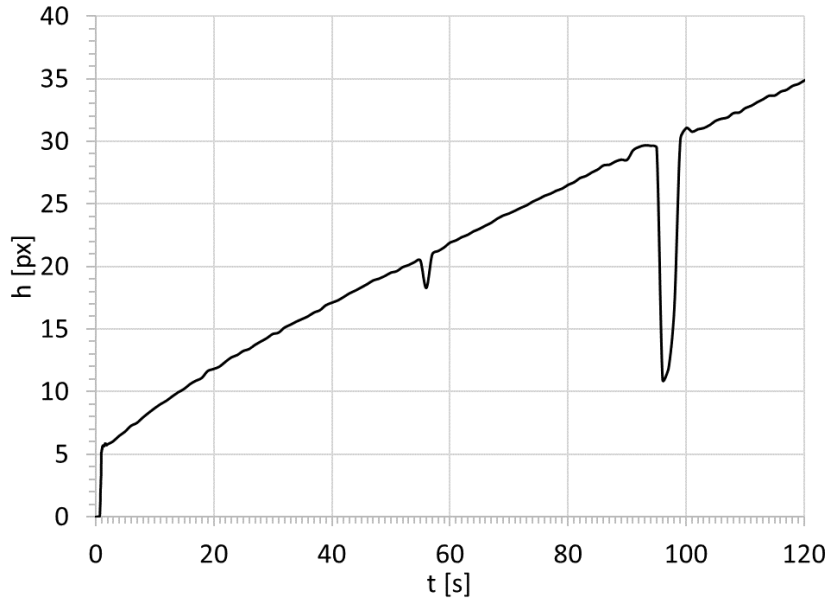


Figura 10-3: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°3 del Lote N°1

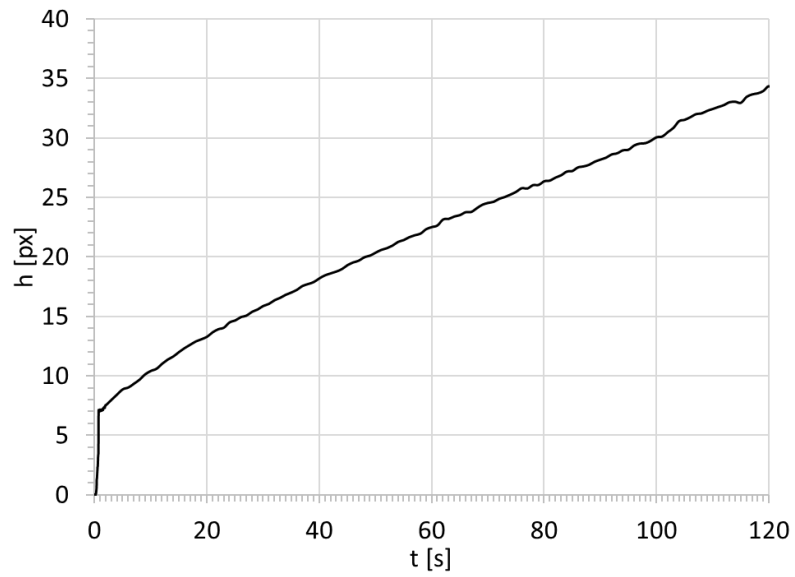


Figura 10-4: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°4 del Lote N°1

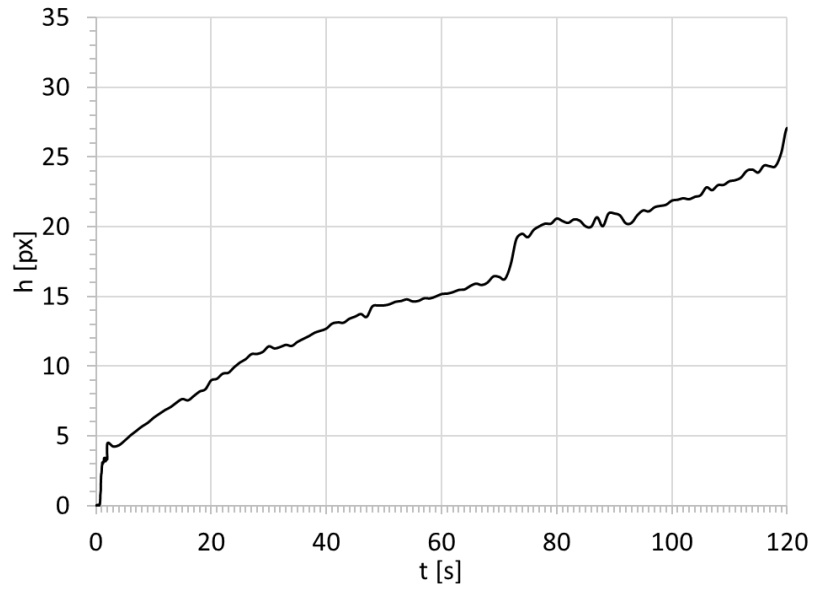


Figura 10-5: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°5 del Lote N°1

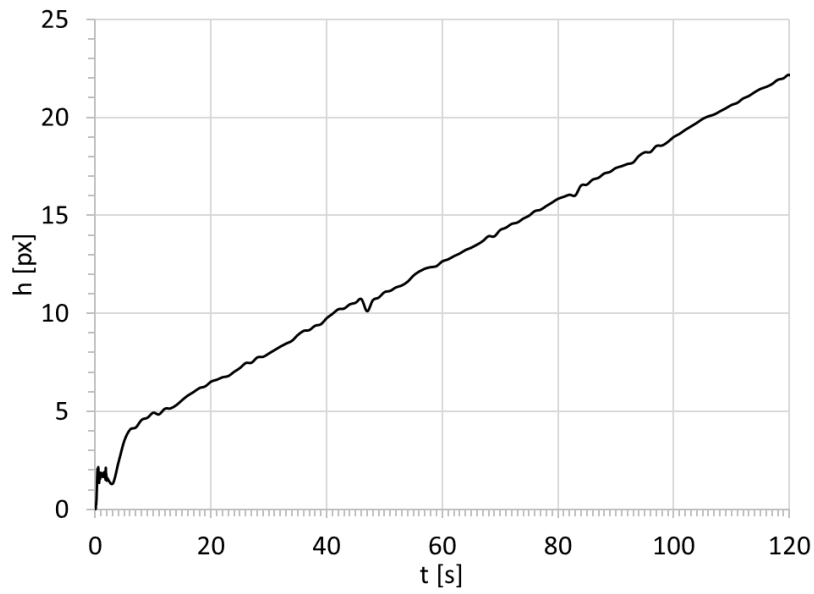


Figura 10-6: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°6 del Lote N°1

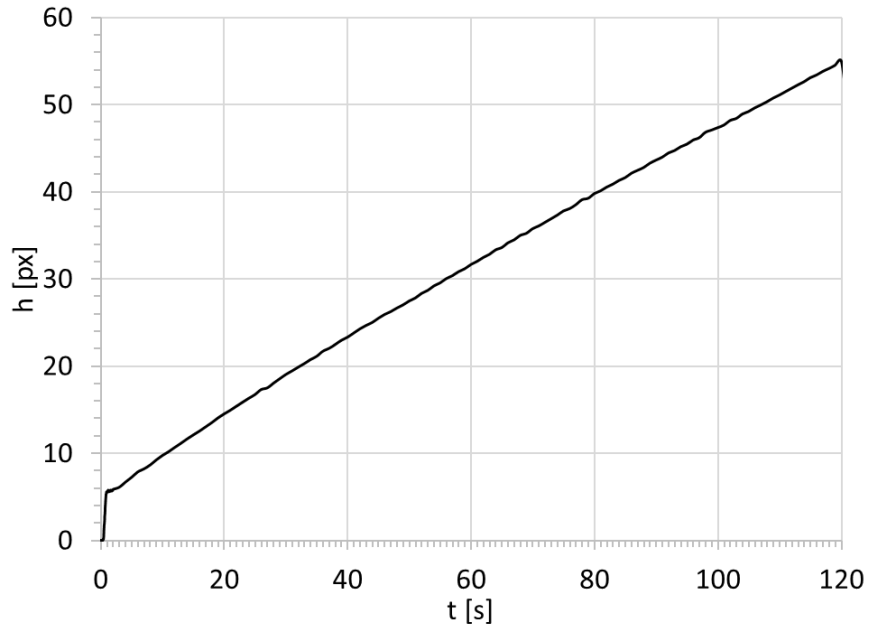


Figura 10-7: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°7 del Lote N°1

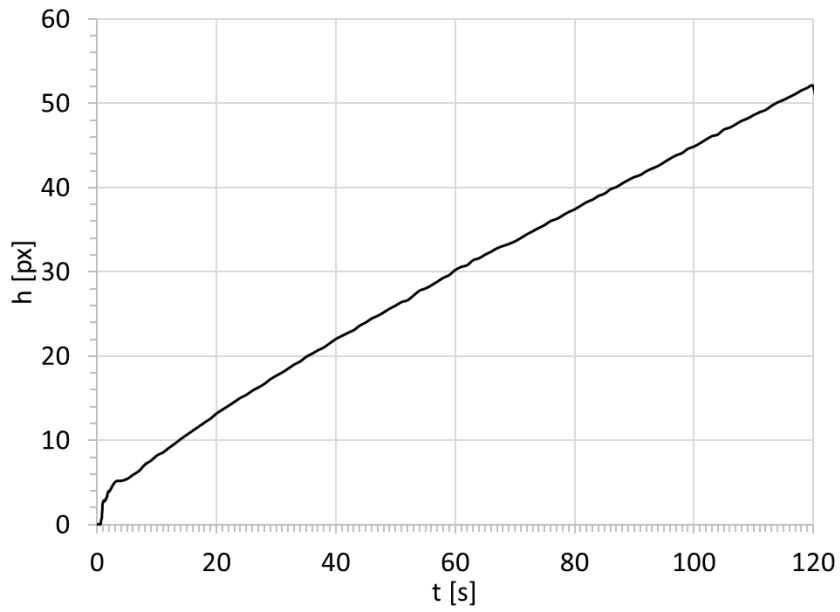


Figura 10-8: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°8 del Lote N°1

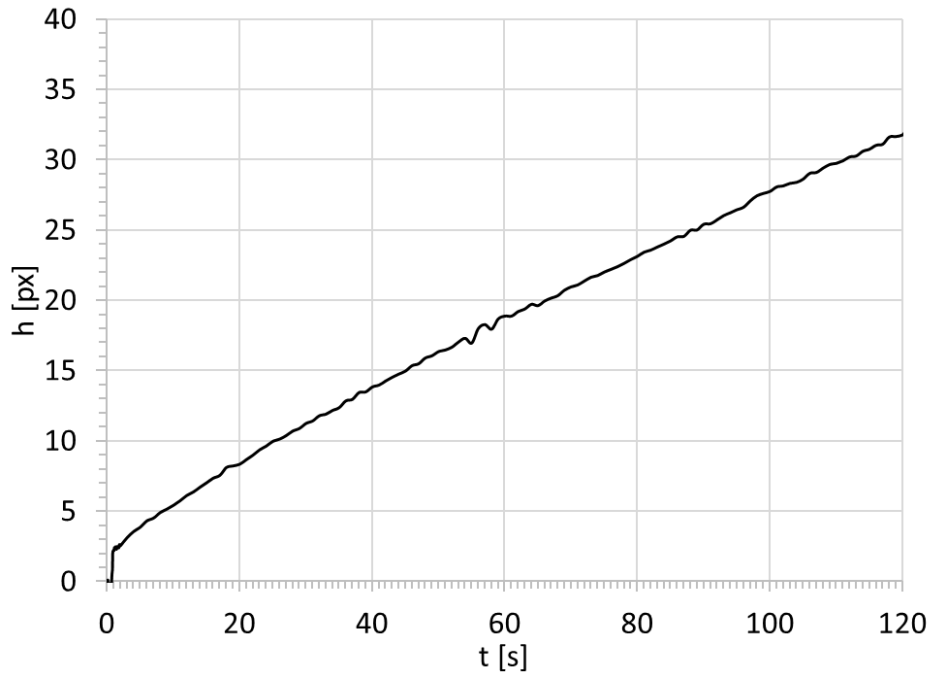


Figura 10-9: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°9 del Lote N°1

b) Lote N° 2:

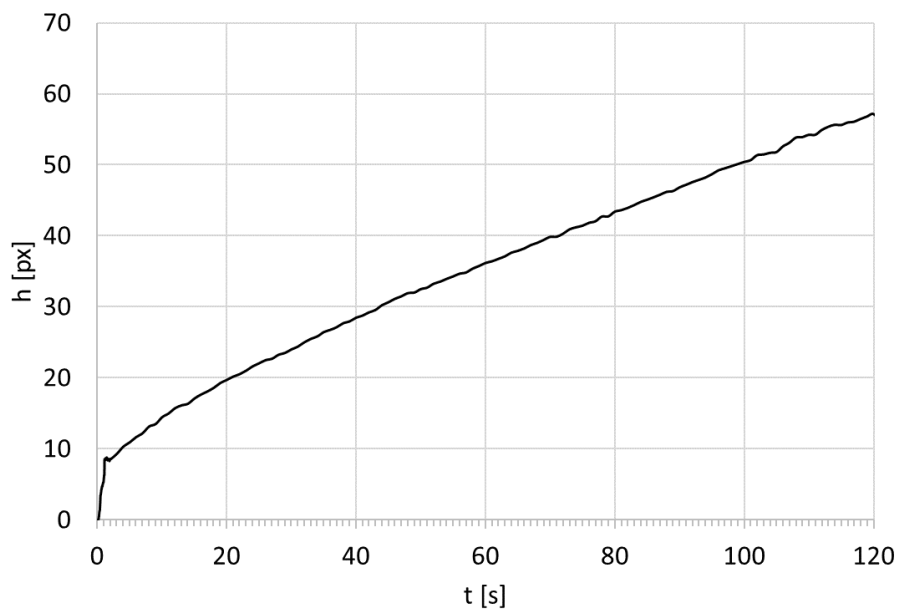


Figura 10-10: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°1 del Lote N°2

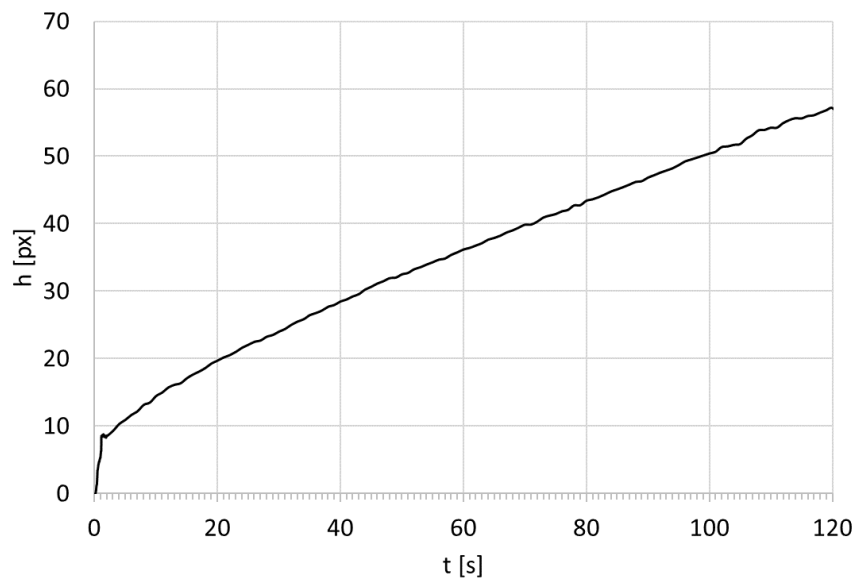


Figura 10-11: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°2 del Lote N°2

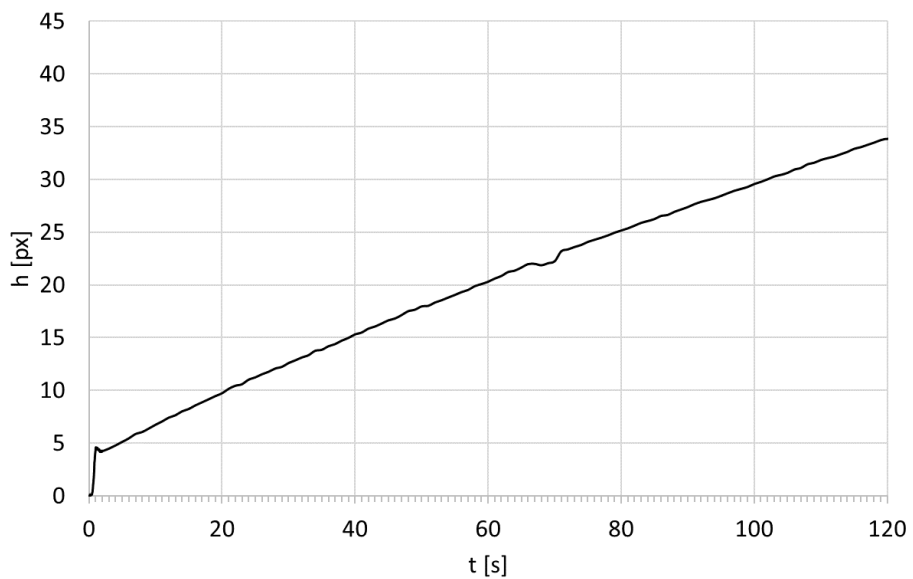


Figura 10-12: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°3 del Lote N°2

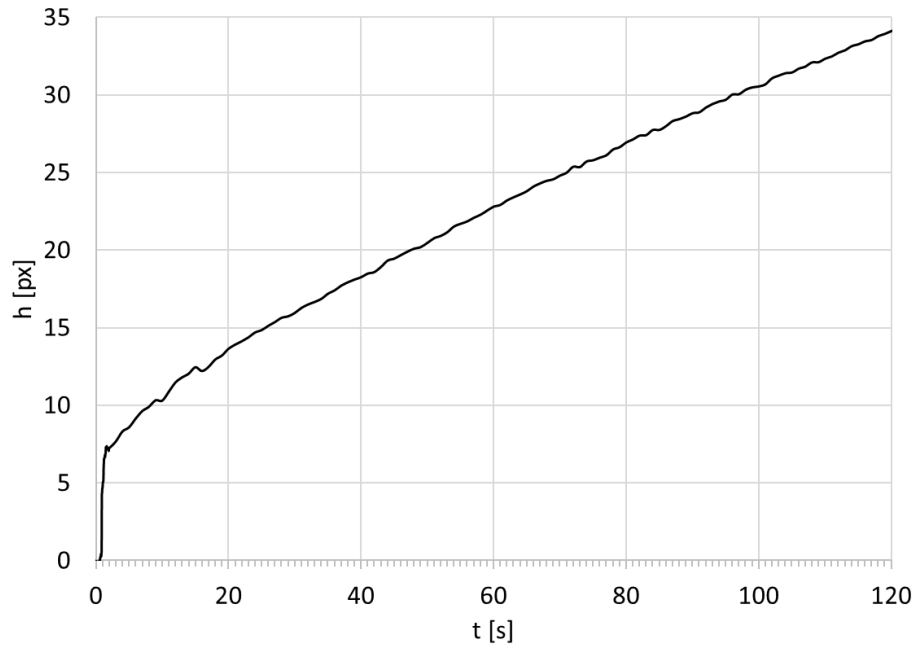


Figura 10-13: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°4 del Lote N°2

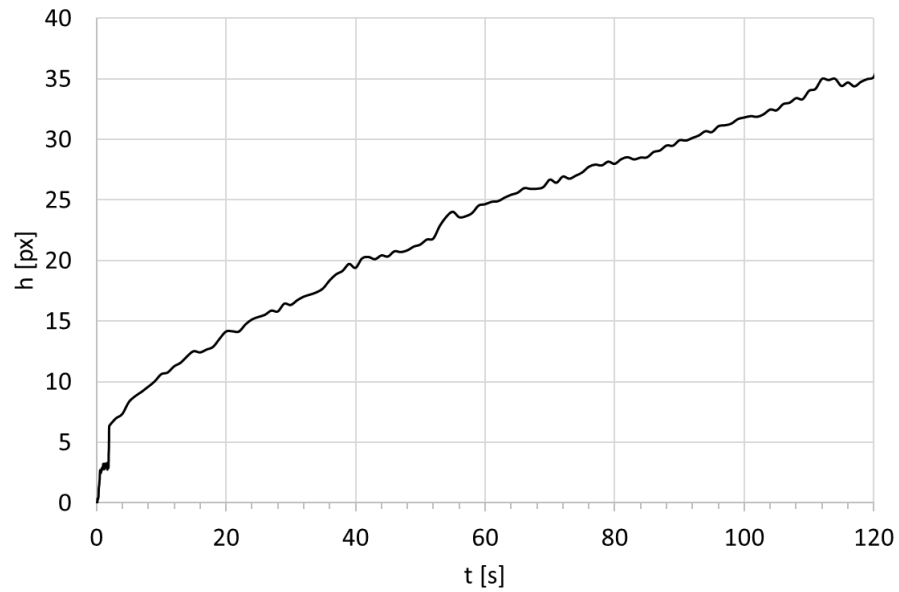


Figura 10-14: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°5 del Lote N°2

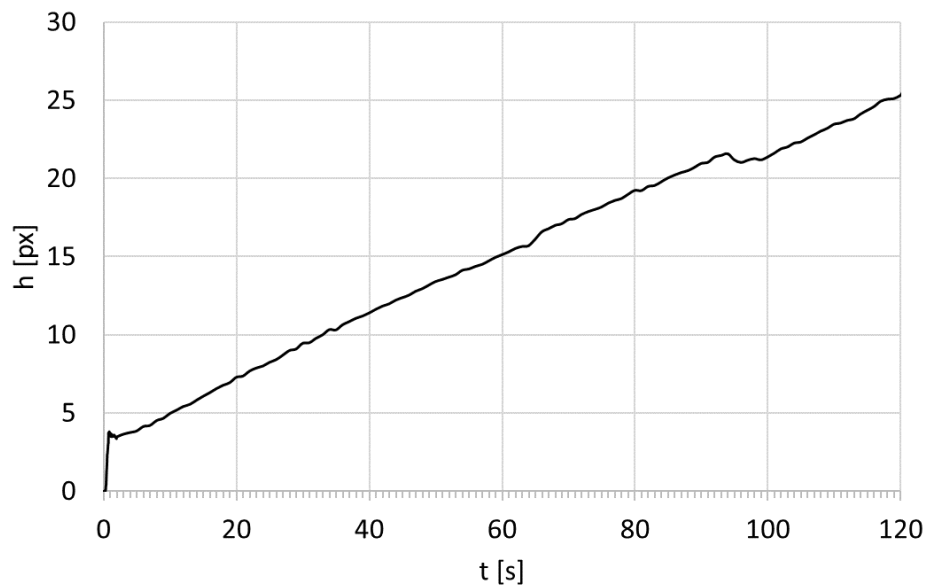


Figura 10-15: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°6 del Lote N°2

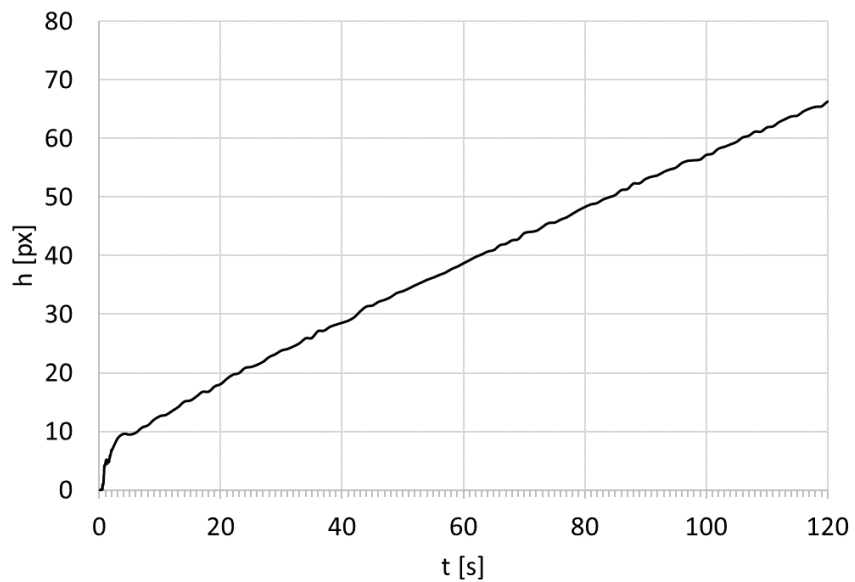


Figura 10-16: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°7 del Lote N°2

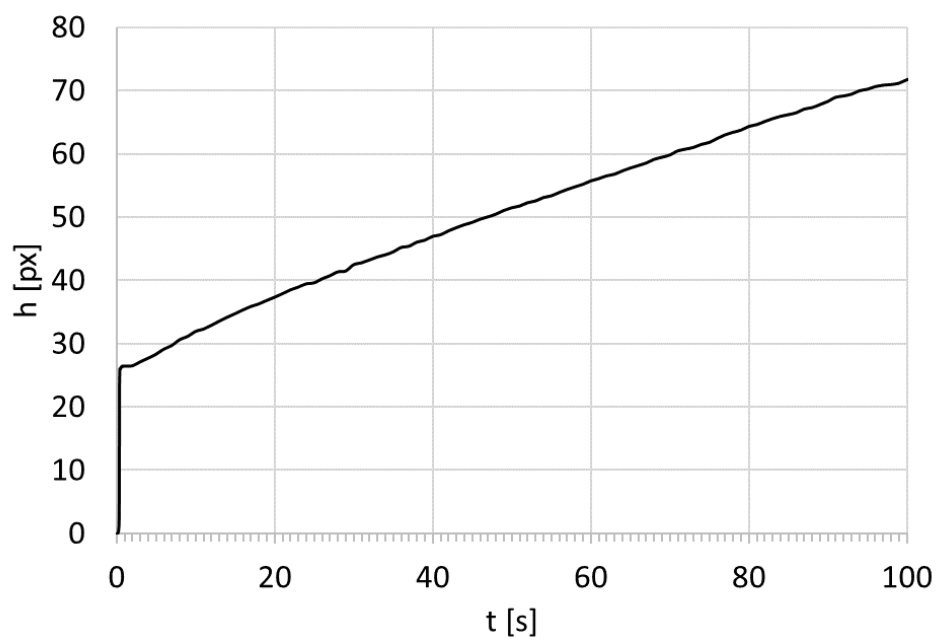


Figura 10-17: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°8 del Lote N°2

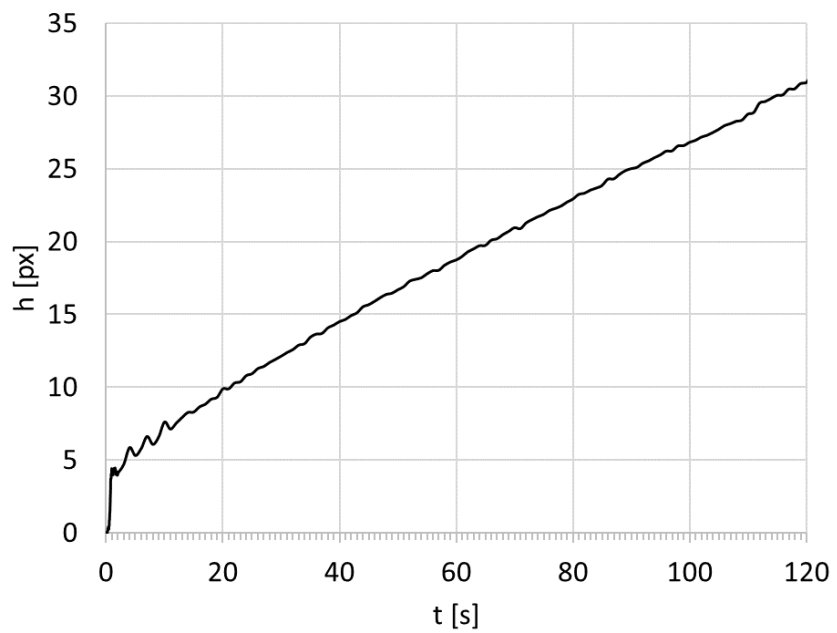


Figura 10-18: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°9 del Lote N°2

c) **Lote N° 3:**

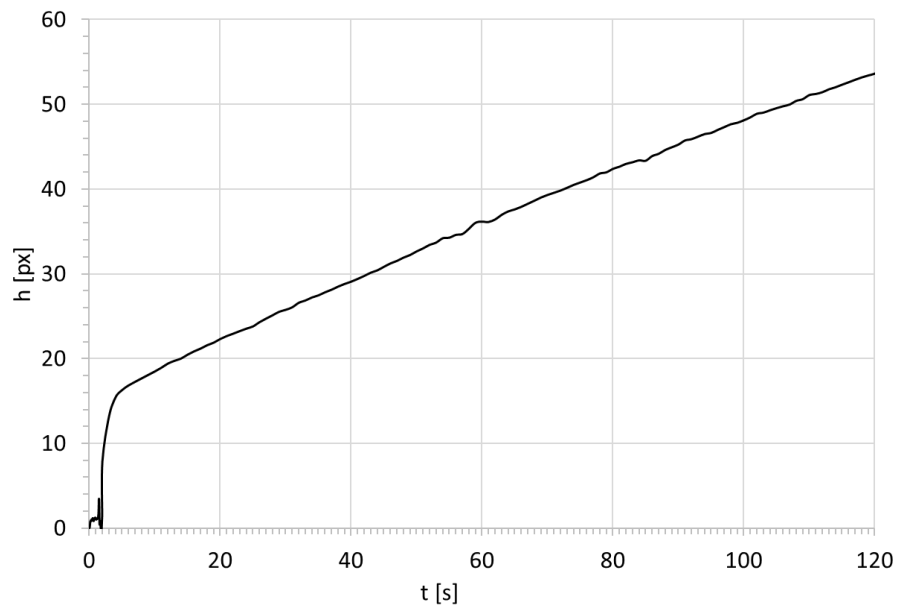


Figura 10-19: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°1 del Lote N°3

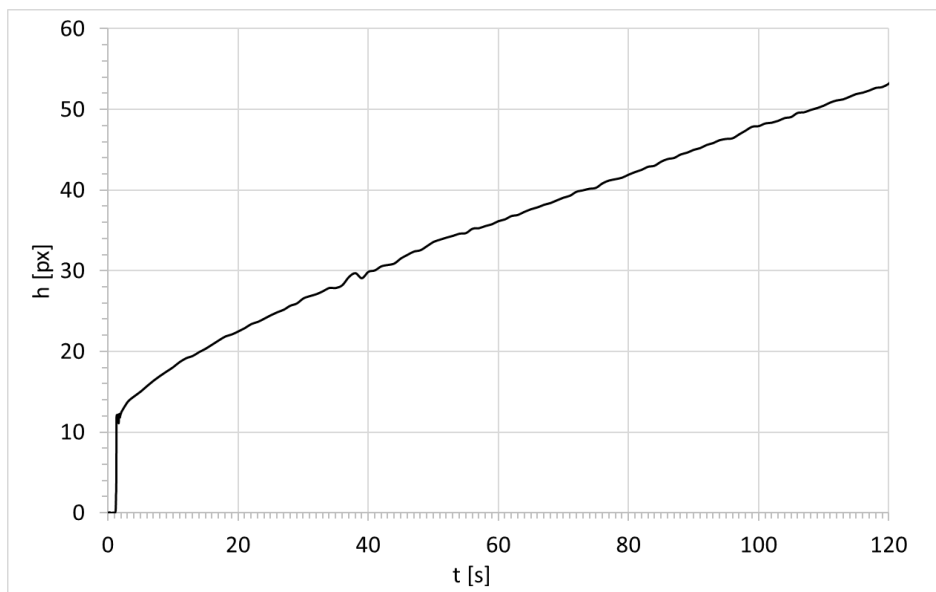


Figura 10-20: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°2 del Lote N°3

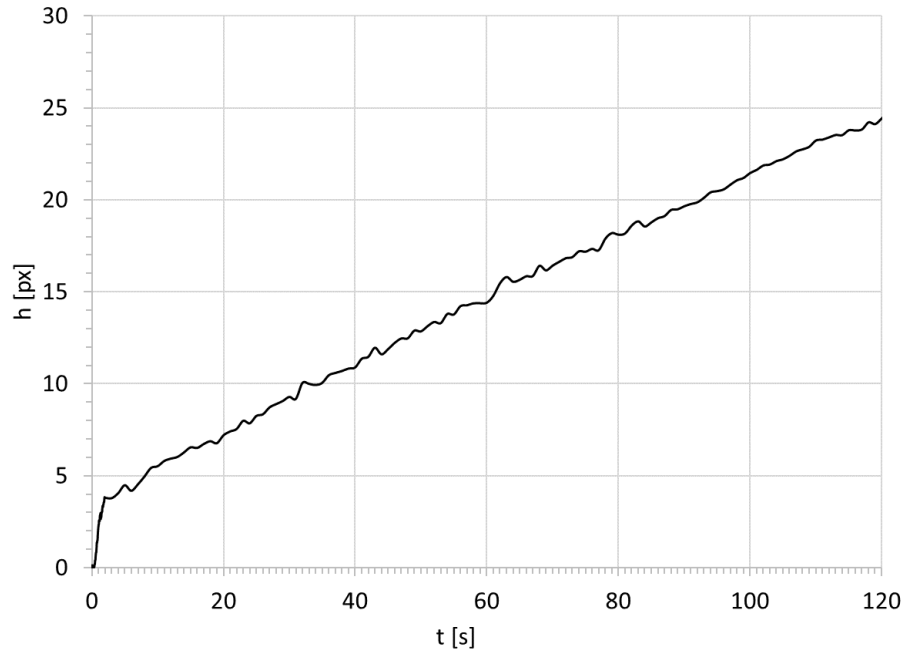


Figura 10-21: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°3 del Lote N°3

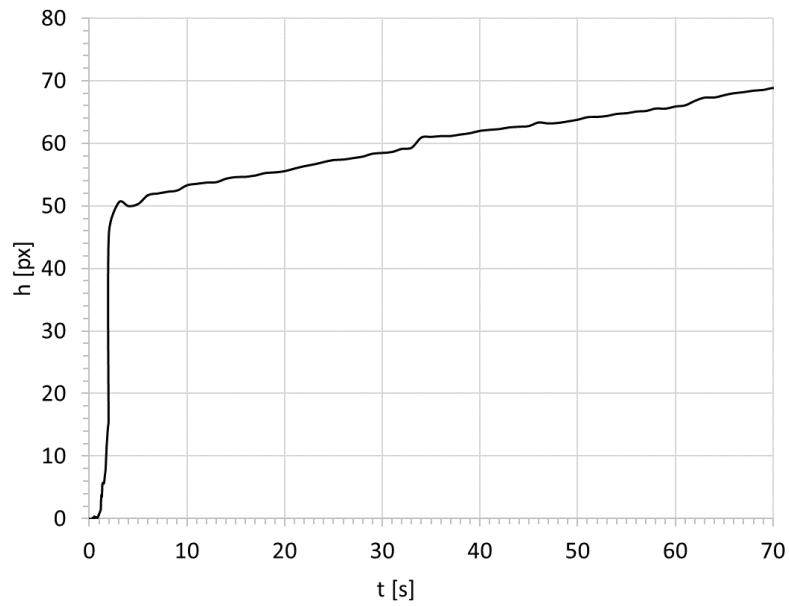


Figura 10-22: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°4 del Lote N°3

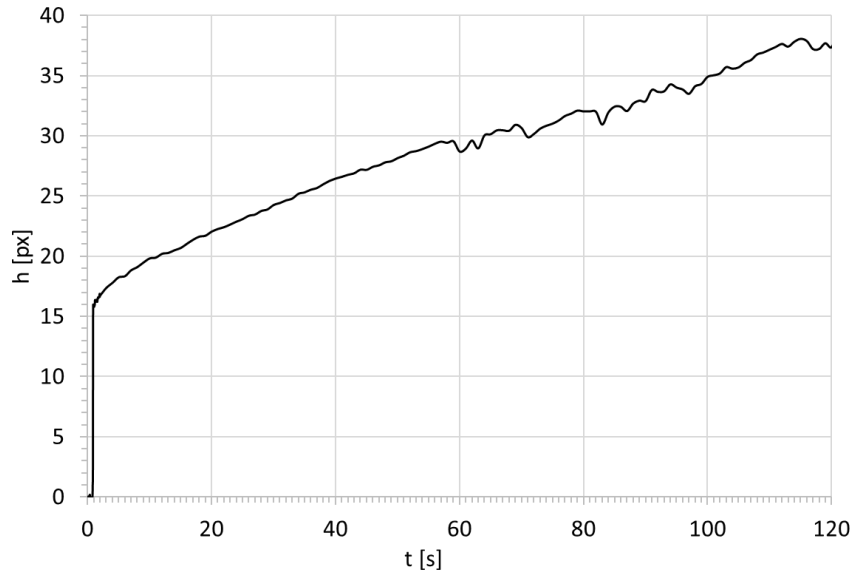


Figura 10-23: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°5 del Lote N°3

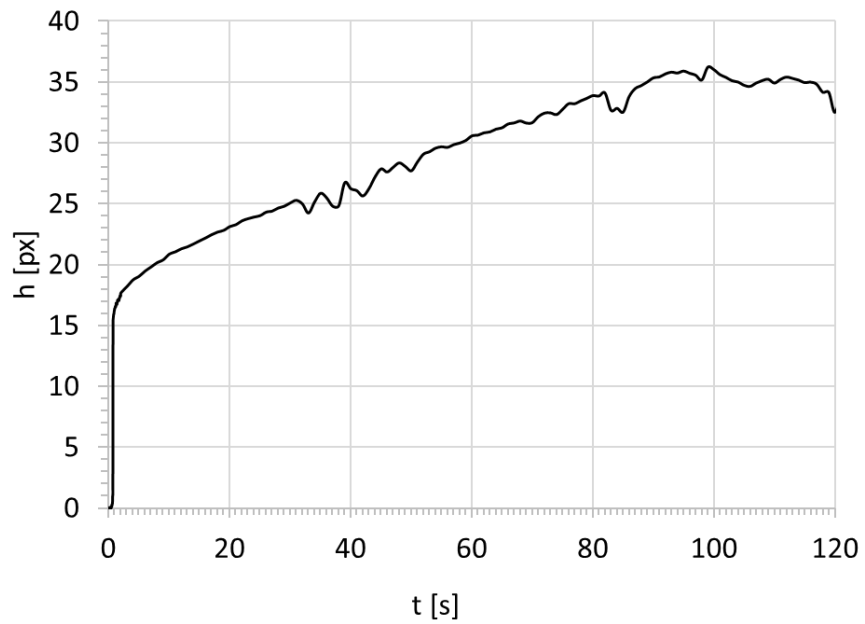


Figura 10-24: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°6 del Lote N°3

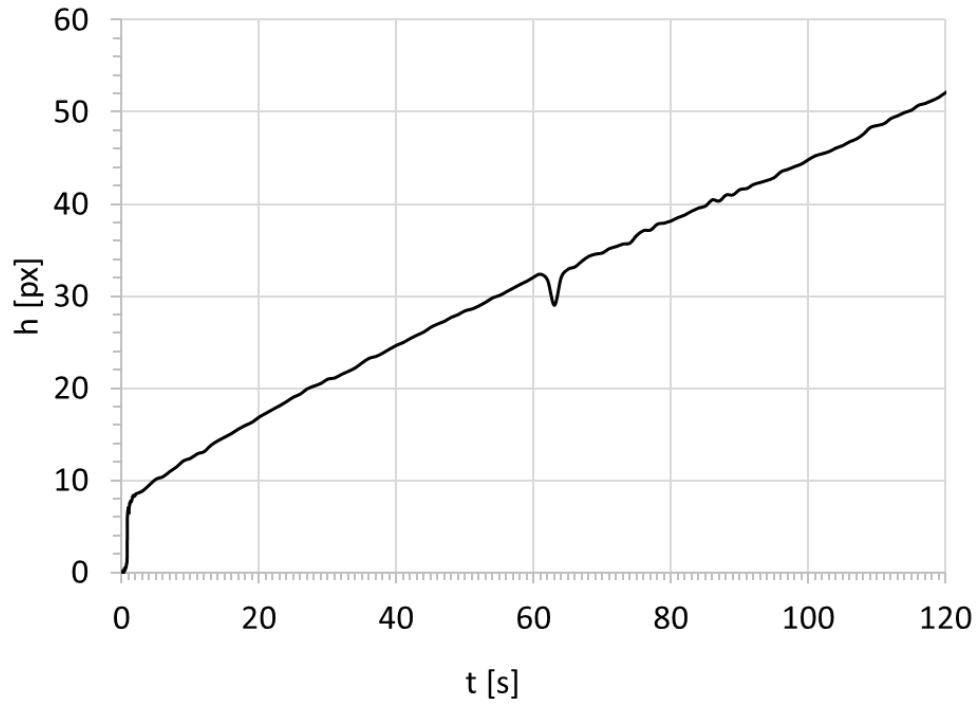


Figura 10-25: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°7 del Lote N°3

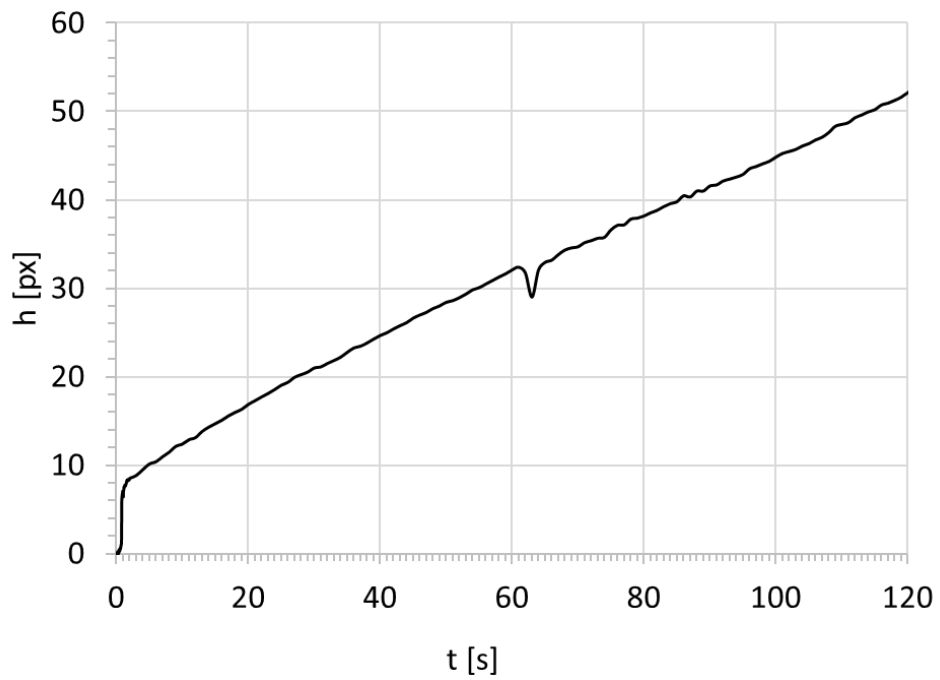


Figura 10-26: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°8 del Lote N°3

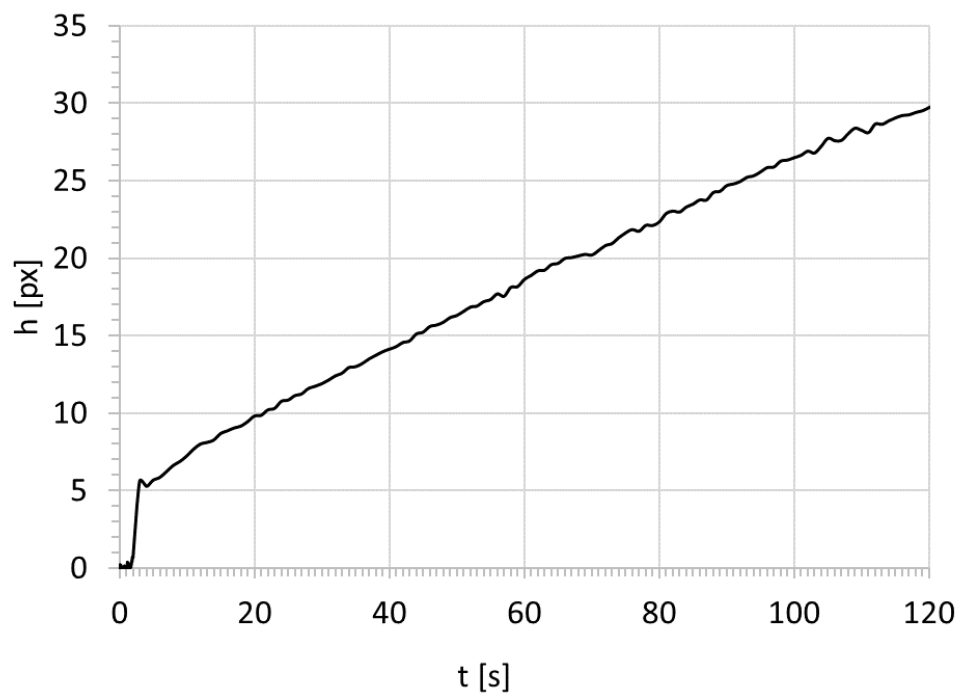


Figura 10-27: Gráfico de indentación en bruto para la probeta N°9 del Lote N°3