

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ESTUDIO NUMÉRICO COMPUTACIONAL DISCRETO DEL
FENÓMENO DE ADHERENCIA ENTRE UNA MATRIZ
CEMENTANTE Y VARILLAS CORRUGADAS DE ACERO: UN
ACERCAMIENTO DESDE LA MESO-ESCALA.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MENCIÓN ESTRUCTURAS**

OMAR EDUARDO ARANA LUZCANDO

omar_arluzcando@hotmail.com

DIRECTOR: PhD. CARLOS FABIÁN ÁVILA VEGA

carlos.avila@epn.edu.ec

CODIRECTOR: M.Sc. MARÍA BELÉN CORREA VALLEJO

maria.corream@epn.edu.ec

Quito, 22 de marzo de 2019

DECLARACIÓN

Yo Omar Eduardo Arana Luzcando, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Omar Eduardo Arana Luzcando

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Omar Eduardo Arana Luzcando, bajo mi supervisión.

PhD. CARLOS ÁVILA VEGA
DIRECTOR DE PROYECTO

M.Sc. BELÉN CORREA VALLEJO
CODIRECTORA DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que me apoyaron en el desarrollo de esta tesis así como también en el transcurso de mi formación académica, a mis padres y mis hermanos por su apoyo incondicional y a mi director de tesis Carlos Ávila quien con su conocimiento colaboró en el desarrollo de este proyecto.

DEDICATORIA

A Dios y mi familia por su amor incondicional.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
GLOSARIO	ix
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.3 ALCANCES.....	4
1.4 METODOLOGÍA	4
1.4.1 ACTIVIDAD 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
1.4.2 ACTIVIDAD 2: ENSAMBLE DE MATRIZ CEMENTANTE Y GEOMETRÍA DE VARILLAS DE ACERO	5
1.4.3 ACTIVIDAD 3: MODELAMIENTO.....	5
1.4.4 ACTIVIDAD 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS	5
CAPÍTULO 2.....	7
MEDIO GRANULAR GENERALIDADES.....	7
2.1 INTRODUCCIÓN.....	7
2.2 MÉTODO DEL ELEMENTO DISCRETO DEM.....	7
2.2.1 LEY DE FUERZA-DESPLAZAMIENTO APLICADA EN EL DEM.....	8
2.3 CONTACTO ENTRE PARTÍCULAS	9
2.3.1 FUERZAS DE CONTACTO	10
2.4 MODELO DE CONTACTO HERTZ.....	11
2.5 CARACTERIZACIÓN DE LA PARTÍCULA	14
2.5.1 MÓDULO DE ELASTICIDAD	14

2.5.2	RELACIÓN DE POISSON.....	15
2.6	CARACTERIZACIÓN DEL CONGLOMERADO	17
2.6.1	COEFICIENTE DE RESTITUCIÓN.....	17
2.6.2	FRICCIÓN	17
2.6.3	COHESIÓN.....	18
2.7	ADHESIÓN	22
2.7.1	ADHERENCIA HORMIGÓN - ACERO	23
CAPÍTULO 3.....		24
MODELAMIENTO COMPUTACIONAL DE LA MATRIZ CEMENTANTE Y VARILLAS DE ACERO (MESO-ESCALA).....		24
3.1	INTRODUCCIÓN.....	24
3.2	MATERIALES Y SUS LEYES CONSTITUTIVAS	27
3.2.1	PROPIEDADES DE LA MATRIZ CEMENTANTE	27
3.2.2	DENSIDAD DE ENERGÍA DE COHESIÓN DE LA MATRIZ CEMENTANTE 28	
3.2.3	PROPIEDADES DE LAS VARILLAS DE ACERO.....	32
3.2.4	DENSIDAD DE ENERGÍA DE COHESIÓN DEL ACERO.....	32
3.2.5	PROPIEDADES DE LA INTERFAZ MATRIZ CEMENTANTE-ACERO.....	33
3.3	DESCRIPCION DE LA GEOMETRIA DEL MODELO	37
3.3.1	GEOMETRÍA DE LAS VARILLAS CORRUGADAS	37
3.3.2	VOLUMEN DE CONTROL DE LA MATRIZ CEMENTANTE	39
3.4	ASPECTOS NUMÉRICOS DEL MODELAMIENTO COMPUTACIONAL	43
3.4.1	INCREMENTO DE TIEMPO	43
3.4.2	CÁLCULO DEL TIME-STEP	45
3.5	CONDICIONES DE FRONTERA	45
3.5.1	VELOCIDAD DE ENSAYO PULL-OUT	45
CAPÍTULO 4.....		49
RESULTADOS		49
4.1	INTRODUCCIÓN.....	49

4.2	VARIABLES NUMÉRICAS DEL MODELO	49
4.3	ALTURA DE VARILLA.....	50
4.3.1	ANÁLISIS EN EL EJE LONGITUDINAL	50
4.4	FUERZA DE CONTACTO	51
4.5	VOLUMEN DE CONTROL	57
4.6	RELACIÓN DE ASPECTO	62
4.7	LONGITUD DE DESARROLLO	63
4.8	FUERZAS DE CONTACTO EN FUNCION DEL DIÁMETRO DE VARILLA	65
4.9	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	67
4.9.1	VARIACIÓN DE CURVA EN EL TIEMPO DE SIMULACIÓN	67
4.9.2	FUERZA DE CONTACTO EN MATRIZ CEMENTANTE.....	68
4.9.3	INCIDENCIA DE LA LONGITUD DE DESARROLLO	68
4.9.4	INCIDENCIA DE RELACIÓN DE ASPECTO ENTRE LOS CORRUGADOS DE LA VARILLA.....	73
4.9.5	CADENA DE FUERZA	73
	CAPÍTULO 5.....	74
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
5.1	CONCLUSIONES	74
5.2	RECOMENDACIONES.....	77
	REFERENCIAS	79
	ANEXOS.....	84
	ANEXO A: INSTALACION DE LIGGGHTS.....	85
	ANEXO B: ESTRUCTURA DE UN SCRIPT.	86
B.1	INICIALIZACIÓN.....	87
B.2	INSERCIÓN Y DEFINICIÓN DE LAS PARTÍCULAS	88
B.3	AJUSTES.....	88
B.4	CORRER LA SIMULACIÓN	89
	ANEXO C: SCRIPT PARA OBTENCIÓN DE DATOS DE PARTÍCULAS EN CONTACTO (HORMIGÓN-HORMIGÓN, ACERO-ACERO, HORMIGÓN-ACERO).....	89

ANEXO D: SCRIPT PARA PRUEBA DE COHESIÓN DEL HORMIGÓN CON VALORES DE DENSIDAD DE ENERGÍA DE COHESIÓN VARIADOS.....	92
ANEXO E: SCRIPT PARA PRUEBA DE COHESIÓN DEL ACERO CON VALORES DE DENSIDAD DE ENERGÍA DE COHESIÓN VARIADOS.	95
ANEXO F: SCRIPT PARA PRUEBA DE ADHESIÓN DEL ACERO Y HORMIGÓN CON VALORES DE DENSIDAD DE ENERGÍA DE COHESIÓN VARIADOS.....	97
ANEXO G: SCRIPT PARA EL LLENADO DE PROBETAS CON PARTÍCULAS DE HORMIGÓN.....	100
ANEXO H: SCRIPT CON VELOCIDAD DE EXTRACCIÓN DE VARILLA.....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1: DOS PARTÍCULAS A) ANTES DEL CONTACTO, B) DURANTE EL CONTACTO, C) DESPUÉS DEL CONTACTO.....	9
FIGURA 2.2: TRASLAPE DE DOS PARTÍCULAS EN CONTACTO.....	10
FIGURA 2.3: DESCOMPOSICIÓN DE LA FUERZA DE CONTACTO ENTRE DOS PARTÍCULAS.....	11
FIGURA 2.4: FUERZA DE CONTACTO ENTRE DOS PARTÍCULAS.....	12
FIGURA 2.5: DISTANCIAS ESTABLECIDAS EN EL CONTACTO ENTRE DOS PARTÍCULAS.....	12
FIGURA 2.6: COMPORTAMIENTO DE FUERZAS ELÁSTICAS Y FUERZAS DE AMORTIGUAMIENTO EN COMPONENTE NORMAL Y TANGENCIAL EN EL CONTACTO ENTRE DOS PARTÍCULAS.....	14
FIGURA 2.7: MATERIAL SOMETIDO A A) FUERZA DE TRACCIÓN Y B) FUERZA DE COMPRESIÓN.....	16
FIGURA 2.8: RADIO DE LA ZONA DE CONTACTO ENTRE DOS PARTÍCULAS.....	20
FIGURA 2.9: FUERZAS DE TENSIÓN PROVOCADAS POR FUERZAS DE COHESIÓN JKR.....	21
FIGURA 2.10: ADHERENCIA ENTRE PARTÍCULAS DE DIFERENTES TIPO Y COHESIÓN ENTRE PARTÍCULAS DEL MISMO TIPO.....	22
FIGURA 2.11: TRANSMISIÓN DE FUERZA DE TENSION ENTRE VARILLA Y CONCRETO.....	23
FIGURA 3.1: ESTRUCTURA DE LA MESO-ESCALA DEL HORMIGÓN ARMADO.....	25
FIGURA 3.2: MESO-ESCALA DEL HORMIGÓN ARMADO.....	25
FIGURA 3.3: PAR DE PARTÍCULAS DE LA MATRIZ CEMENTANTE EN CONTACTO.....	29
FIGURA 3.4: SIMULACIÓN DE PARTÍCULAS DE MATRIZ CEMENTANTE PARA UN VALOR DE k BAJO.....	30
FIGURA 3.5: SIMULACIÓN DE PARTÍCULAS DE MATRIZ CEMENTANTE PARA UN VALOR DE k ALTO.....	31
FIGURA 3.6: SIMULACIÓN DE PARTÍCULAS DE MATRIZ CEMENTANTE PARA UN VALOR DE k ADECUADO.....	31
FIGURA 3.7: CONTACTO ENTRE PARTÍCULA DE MATRIZ CEMENTANTE Y PARTÍCULA DE ACERO.....	34
FIGURA 3.8: SIMULACIÓN DE ADHERENCIA PARA UN VALOR DE k BAJO.....	36
FIGURA 3.9: SIMULACIÓN DE ADHERENCIA PARA UN VALOR DE k ALTO.....	36

FIGURA 3.10: SIMULACIÓN DE ADHERENCIA PARA UN VALOR DE k ADECUADO.	37
FIGURA 3.11: VARILLA CORRUGADA DE 14MM.	38
FIGURA 3.12: VARILLA CORRUGADA DE 22MM.	39
FIGURA 3.13: VARILLA CORRUGADA DE 32MM.	39
FIGURA 3.14: VARILLA LISA DE 32MM.	39
FIGURA 3.15: LLENADO DE PROBETA DE HORMIGÓN, 40% DEL TOTAL DE STEPS.	40
FIGURA 3.16: LLENADO DE PROBETA DE HORMIGÓN, 100% DEL TOTAL DE STEPS.	41
FIGURA 3.17: PROBETA DE HORMIGÓN CON VARILLA DE 14MM CENTRADA CON 177739 PARTÍCULAS DE LA MATRIZ CEMENTANTE.	41
FIGURA 3.18: PROBETA DE HORMIGÓN CON VARILLA DE 22MM CENTRADA CON 175204 PARTÍCULAS DE LA MATRIZ CEMENTANTE.	42
FIGURA 3.19: PROBETA DE HORMIGÓN CON VARILLA DE 32MM CENTRADA CON 172087 PARTÍCULAS DE LA MATRIZ CEMENTANTE.	42
FIGURA 3.20: PROBETA DE HORMIGÓN CON VARILLA LISA DE 32MM CENTRADA CON 175937 PARTÍCULAS DE LA MATRIZ CEMENTANTE.	43
FIGURA 4.1: FRANJA DE 1 CENTÍMETRO EN TODA LA LONGITUD DE LA VARILLA.	50
FIGURA 4.2: TENDENCIA DE CURVA EN SELECCIÓN DE DATOS.	51
FIGURA 4.3: CADENA DE FUERZAS EN MATRIZ CEMENTANTE.	52
FIGURA 4.4: CADENA DE FUERZAS EN VARILLA DE 14MM EN EJE X Y EJE Y RESPECTIVAMENTE.	53
FIGURA 4.5: CADENA DE FUERZAS EN VARILLA DE 22MM EN EJE X Y EJE Y RESPECTIVAMENTE.	54
FIGURA 4.6: CADENA DE FUERZAS EN VARILLA DE 32MM EN EJE X Y EJE Y RESPECTIVAMENTE.	55
FIGURA 4.7: CADENA DE FUERZAS EN VARILLA LISA EN EJE X Y EJE Y RESPECTIVAMENTE.	56
FIGURA 4.8: VOLUMEN DE CONTROL.	58
FIGURA 4.9: VOLUMEN DE CONTROL DE 3MM DE DIÁMETRO ALREDEDOR DE LA VARILLA.	58
FIGURA 4.10: VOLUMEN DE CONTROL EN EJE LONGITUDINAL.	59
FIGURA 4.11: FUERZA DE CONTACTO REGISTRADA EN VOLUMEN DE CONTROL.	60

FIGURA 4.12: COMPARACIÓN DE FUERZAS DE CONTACTO SEGÚN VOLUMEN DE CONTROL EN VARILLA DE 14MM.....	60
FIGURA 4.13: COMPARACIÓN DE FUERZAS DE CONTACTO SEGÚN VOLUMEN DE CONTROL EN VARILLA DE 22MM.....	61
FIGURA 4.14: COMPARACIÓN DE FUERZAS DE CONTACTO SEGÚN VOLUMEN DE CONTROL EN VARILLA DE 32MM.....	61
FIGURA 4.15: FUERZA DE CONTACTO ENTRE PARTÍCULAS DE MATRIZ CEMENTANTE EN EXTRACCIÓN DE VARILLA, VOLUMEN DE CONTROL 1.5MM EN STEP 2000000 (2SG DE SIMULACIÓN).....	65
FIGURA 4.16: FUERZA DE CONTACTO ENTRE PARTÍCULAS DE MATRIZ CEMENTANTE EN EXTRACCIÓN DE VARILLA, VOLUMEN DE CONTROL 1.5MM EN STEP 3000000 (3SG DE SIMULACIÓN).....	66
FIGURA 4.17: FUERZA DE CONTACTO ENTRE PARTÍCULAS DE MATRIZ CEMENTANTE EN EXTRACCIÓN DE VARILLA, VOLUMEN DE CONTROL 1.5MM EN STEP 4000000 (4SG DE SIMULACIÓN).....	66
FIGURA 4.18: FUERZA DE CONTACTO ENTRE PARTÍCULAS DE MATRIZ CEMENTANTE EN EXTRACCIÓN DE VARILLA, VOLUMEN DE CONTROL 1.5MM EN STEP 5000000 (5SG DE SIMULACIÓN).....	67
FIGURA 4.19: DISTRIBUCIÓN DE LA TENSIÓN DE ADHERENCIA EN LONGITUD DE VARILLA.....	69
FIGURA 4.20: DISTRIBUCIÓN DEL ESFUERZO DE ADHERENCIA LOCAL EN LONGITUD DE VARILLA DE 14MM, 22MM Y 32MM.....	70
FIGURA 4.21: FUERZAS DE CONTACTO EN VARILLA DE 14MM CON LONGITUD DE DESARROLLO DE 11 CENTÍMETROS.....	71
FIGURA 4.22: DISTRIBUCIÓN DEL ESFUERZO DE ADHERENCIA LOCAL EN LONGITUD DE VARILLA DE 14MM, 22MM Y 32MM CON LONGITUD DE DESARROLLO DE 30 CENTÍMETROS.	72
FIGURA 4.23: TRANSFERENCIA DE FUERZA DE CONTACTO ENTRE VARILLA Y CONCRETO.....	73
FIGURA B.1: ESTRUCTURA DE UN SCRIPT.	877

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3.1: PROPIEDADES MECANICAS DE LA MATRIZ CEMENTANTE.....	27
TABLA 3.2: DATOS DEL PAR DE PARTÍCULA DE MATRIZ CEMENTANTE EN CONTACTO.....	28
TABLA 3.3: DENSIDAD DE ENERGÍA DE COHESIÓN DE LA MATRIZ CEMENTANTE.....	29
TABLA 3.4: PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS VARILLAS DE ACERO.....	32
TABLA 3.5: DENSIDAD DE ENERGÍA DE COHESIÓN DEL ACERO.....	33
TABLA 3.6: DATOS DEL CONTACTO ENTRE UNA PARTÍCULA DE MATRIZ CEMENTANTE Y UNA PARTÍCULA DE ACERO.....	34
TABLA 3.7: DENSIDAD DE ENERGÍA DE COHESIÓN PARA EL CONTACTO ENTRE PARTÍCULA DE MATRIZ CEMENTANTE Y PARTÍCULA DE ACERO (ADHESIÓN).....	35
TABLA 3.8: GEOMETRÍA DE LOS RESALTOS DE LAS VARILLAS CORRUGADAS.....	38
TABLA 3.9: PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MATRIZ CEMENTANTE NECESARIAS PARA EL CÁLCULO DE TIME STEP.....	45
TABLA 3.10: RESULTADOS DE ENSAYO PULL OUT PARA VARILLA DE 12MM, 16MM Y 20MM.....	46
TABLA 3.11: VELOCIDAD DE EXTRACCIÓN DE VARILLA EN ENSAYO PULL OUT.....	47
TABLA 3.12: RESULTADOS DE ENSAYO PULL OUT CON VARILLAS DE 3/8" Y 1/2".....	47
TABLA 3.13: VELOCIDAD DE EXTRACCIÓN DE VARILLA EN ENSAYO PULL OUT.....	48
TABLA 4.1: RELACIÓN DE ASPECTO A/C DE VARILLAS CORRUGADAS.....	62
TABLA 4.2: LONGITUD DE DESARROLLO SEGÚN ACI.....	64
TABLA 4.3: LONGITUD DE DESARROLLO SEGÚN BAUS Y NORMA COVENIN.....	64

GLOSARIO

Acuñamiento: fenómeno de adherencia mecánica producido por el aplastamiento del concreto entre los resaltos de la varilla.

Agregado: Son las arenas, gravas naturales y piedra triturada utilizadas para formar la mezcla que da origen al concreto.

Conglomerado: Conjunto de partículas unidas entre sí por medio de fuerzas cohesivas.

Corrugado: geometría que presentan las varillas en su superficie en forma de resalto, que mejora la adherencia con el concreto.

Densidad de energía de cohesión: es una medida de la energía necesaria para poder separar las moléculas unidas por cohesión.

EDO: Se llama ecuación diferencial ordinaria (EDO) a una ecuación diferencial en la que aparecen derivadas ordinarias de una o más variables dependientes respecto a una única variable independiente.

Ensamble de partículas: la unión de todas las partículas que forman el medio granular por medio de la cohesión.

Fuerza cohesiva: es las fuerzas de atracción que mantiene unidas a las partículas de un mismo tipo.

Interfaz: punto de contacto entre dos materiales donde se desarrollan las interacciones entre estos.

Liggghts: software de código abierto que utiliza la tecnología de método de elemento discreto para simular la interacción y el comportamiento de partículas.

Macro-escala: nivel de descripción en que la posición o estado físico concreto de las partículas que integran un cuerpo puede ser resumido en dimensiones geométricas o magnitud física de gran tamaño, es decir, este nivel de observación describe a los objetos visibles a simple vista.

Matriz cementante: Compuesto de partículas cuyas propiedades mecánicas corresponden al cemento y tiene por función aglomerar los agregados gruesos mediante cohesión.

Medio granular: componentes constitutivos que conforman al hormigón, es decir, matriz cementante y agregado grueso.

Meso-escala: escala de observación en la que se puede discutir razonablemente las propiedades de un material o fenómeno, debido a que en esta escala los elementos se descomponen en partículas que representan sus componentes constitutivos que definen el comportamiento global del material.

Método de elemento discreto (DEM): método numérico computacional que se encarga esencialmente de la discretización espacial del continuo logrando de esta manera la simulación del comportamiento mecánico de un medio formado por un conjunto de partículas las cuales interaccionan entre sí a través de sus puntos de contacto.

Micro-escala: nivel de descripción en que fenómenos que ocurren a escalas no visibles a simple vista son relevantes.

Modelo numérico: técnica basada en el cálculo numérico, utilizada para validar o refutar modelos conceptuales propuestos a partir de observaciones o derivados de teorías anteriores.

Polidisperso: partículas de diferentes tamaños.

Pull-out: método de ensayo que determina la resistencia a la extracción por deslizamiento del concreto endurecido, mediante la medición de la fuerza requerida para sacar una varilla embebida en concreto.

Script: conjunto de órdenes escritas en código de programación que son almacenadas en un archivo de texto, generalmente muy ligero y, que es ejecutado por lotes o línea a línea, en tiempo real por un intérprete.

Volumen de control: una región en el espacio donde ocurren los fenómenos relevantes que son objetos de estudio

RESUMEN

En este proyecto de titulación se propone desarrollar un modelo numérico computacional discreto que responde al comportamiento del hormigón armado mediante: (1) un ensamble de partículas esféricas polidispersas (i.e. agregado grueso), representadas sobre la base de un modelo discreto, que interactúan entre sí bajo potenciales de contacto (i.e. Hertz), fricción (i.e. Coulomb friction law), (2) Matriz cementante representada por un modelo de cohesión (i.e. Johnson-Kendall-Roberts Model), y (3) varillas corrugadas representadas por una interfaz sólida (i.e. acero de refuerzo) que reproduce geometría real de corrugados y que interactúan con las partículas (i.e. agregados) mediante potenciales de contacto y cohesión para definir la interacción matriz-refuerzo, todo esto a partir de conceptos fundamentales de la tecnología del Método de Elemento Discreto.

El hormigón armado es un material cuyo análisis y diseño, por lo general, se lo realiza con la mecánica del medio continuo en la macro-escala. Esto implica limitaciones en el estudio del hormigón armado, es decir, muchos efectos no son tomados en cuenta, entre otros: (1) la interacción entre las partículas del medio granular cohesionado (i.e. agregados con pasta cementante), (2) la influencia de los corrugados de la varilla de acero en el medio granular, (3) mecanismos de transmisión de fuerzas entre las componentes del hormigón armado, (4) consideración del hormigón armado como material discreto mediante la tecnología del DEM, (5) consideración del hormigón armado como material heterogéneo. Estos fenómenos logran un mejor entendimiento del comportamiento del hormigón armado y pueden ser analizados desde la meso-escala. Este hecho motiva plenamente el desarrollo de esta investigación y se prevee un impacto que se visibilizará en un mejor entendimiento del comportamiento del hormigón armado, puesto que, este modelo tiene el potencial de generar un mejor entendimiento de la física que gobierna el fenómeno de adherencia (i.e. hormigón-refuerzo) porque permite explorar la manera como las fuerzas de interacción entre matriz y acero se distribuyen a lo largo de la varilla como resultado de este fenómeno.

Para lograr este propósito se elaboró:

Una metodología basada en el método científico que facilitó alcanzar el objetivo general propuesto. Se realizó la revisión bibliográfica de varios autores que realizaron estudios experimentales y numéricos.

El método del elemento discreto propuesto por Cundall y Strack (1979) es una herramienta necesaria para entender el funcionamiento de la interacción partícula – partícula de la matriz cementante en un volumen de control de material granular. La tecnología del elemento discreto es implementada por LIGGGHTS, que es el software que se utilizará para realizar las simulaciones y modelamientos respectivos. Otro aspecto que se debe considerar es el modelo de contacto de Hertz y el modelo cohesivo Johnson Kendall Roberts, que son utilizados por el software LIGGGHTS.

El análisis de resultados se lo realiza en base a información generada por LIGGGHTS open source que implementa tecnología del DEM. El análisis parte de un volumen de control. Para este estudio se consideró un volumen de control lo suficientemente cercano a la varilla pero a la vez no más pequeño que el radio de las partículas de la matriz cementante (i.e. 1.5mm), sección en la cual se pueden distinguir las fuerzas de contacto que actúan en las partículas cementantes cercanas a la varilla. Los resultados obtenidos son datos de posición y fuerza de contacto (i.e. fuerza de fricción y fuerza de cohesión) de cada partícula del medio granular que interactúa bajo potenciales de contacto con la varilla corrugada.

La geometría de los resaltos de las varillas influye de manera positiva en la transferencia de fuerzas de contacto entre matriz cementante y refuerzo logrando que tenga mayor capacidad de adherencia, debido a que producen el fenómeno llamado acuñamiento que es más efectivo que la fricción lo que queda demostrado al observar el comportamiento de la varilla lisa.

ABSTRACT

In this study, a discrete computational numerical model that responds to the behavior of reinforced concrete by: (1) an assembly of polydisperse spherical particles (i.e. aggregate), represented on the basis of a discrete model, which interact with each other low contact potentials (i.e. Hertz), friction (i.e. Coulomb friction law), (2) Cement matrix represented by a cohesion model (i.e. Johnson-Kendall-Roberts Model), and (3) corrugated bars represented by a solid interface (i.e. reinforced bar) that reproduces true corrugated geometry and interacts with particles (i.e. aggregates) through contact and cohesion potentials to define the matrix-reinforcement interaction, all based on fundamental concepts of the Discrete Element Method technology

Reinforced concrete is a material whose analysis and design is carried out with the mechanics of the continuous medium in the macro-scale. This implies limitations in the study of reinforced concrete, many effects are not taken into account as: (1) the interaction between the particles of the cohesive granular medium (i.e. cement matrix), (2) the influence of the corrugated materials of the steel bar in the granular medium (i.e. cement matrix), (3) mechanisms of force transmission between the components of reinforced concrete, (4) consideration of reinforced concrete as discrete material by DEM technology, (5) consideration of reinforced concrete as a heterogeneous material. These phenomena get a better understanding of the behavior of reinforced concrete and can be analyzed from the meso-scale. This fact motivates this investigation and an impact is expected for a better understanding of the behavior of reinforced concrete, since, this model has the potential to generate a better understanding of the physics that governs the phenomenon of adhesion (ie concrete-reinforcement) because it allows explore how the forces of interaction between matrix and bar are distributed along the bar as a result of this phenomenon.

To carry out this purpose, it was elaborated:

A methodology based on the scientific method that facilitated reaching the general objective. A bibliographic review of several authors who carried out experimental and numerical studies was carried out.

The discrete element method proposed by Cundall and Strack (1979) is a necessary tool to understand the operation of the particle-particle interaction of the cement matrix in a control volume of granular material. The technology of the discrete element is implemented by LIGGGHTS, which is the software that will be used to perform the respective simulations and modeling. Another aspect that should be considered is the

Hertz contact model and the Johnson Kendall Roberts cohesive model, which are used by the LIGGGHTS software.

The analysis of results is carry out based on the files generated by LIGGGHTS. The analysis starts from an adequate control volume. For this study a volume of control was considered sufficiently close to the bar but at the same time not smaller than the radius of the particles of the cementing matrix (i.e. 1.5mm), section in which the contact forces can be distinguished. They act on the cementing particles near the rod. The results obtained are data of position and contact force (i.e. friction force and cohesion force) of each particle of the granular medium that interacts under potentials of contact with the corrugated bar

The geometry of the rebars has a positive influence on the transfer of contact forces between cementing matrix and reinforcement, making it have greater adhesion capacity, due to the fact that they produce the phenomenon known as crushing of concrete. More effective than friction, which is demonstrated by observing the behavior of the smooth bar.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN

El fenómeno de la adherencia entre concreto y refuerzo ha sido estudiado por muchos investigadores, sin embargo no se tiene un entendimiento completo muy claro de la mecánica que gobierna este fenómeno. El primer trabajo conocido sobre este fenómeno estuvo a cargo de Considère (1899), quien midió el desplazamiento de los extremos de unos cables de acero sometidos a una carga de tensión y embebidos en concreto para deducir una relación de fuerza-desplazamiento. Mencionando otros estudios previos que se revisaron para la elaboración de este trabajo se tiene por ejemplo: **(1) estudios experimentales:** Rehm (1958), Lutz et al. (1966), Lutz y Gergely (1967), Goto (1971), Viawathanatepa (1979), Mirza y Houde (1979), Eligehausen et al. (1983), Bamonte et al. (2002), Coronelli et al. (2001), Gambarova y Rosati (1997), (Clément, 1987), La Borderie y PijaudierCabot (1987). **(2) Estudios numéricos:** Bresler y Bertero (1968), Rehm (1961), Tepfers (1979), Yankelevsky y Jabareen (2002), Khalfallah (2005), Eligehausen et al. (1983), Harajli (1994), Ozbolt et al. (2002), Cox y Hermann (1998, 1999), Lundgren (1999), Désir (1999) y Romdhane (2002), Monti et al. (1997), D'Ambrisi y Filippou (1999), Ayoub y Filippou (1999), Fantilli y Vallini (2002), Domínguez et al. (2005a, 2005b, 2006, 2012), Gastebled y May (2000), Ghandehari et al. (2000), Gebbeken y Greulich (2002), Tikhomirov y Stein (1999), Assa y Dhanasekar (2002), Nowak y Cho (2002), Sajedi y Huang (2015), Dehestani y Mousavi (2015), Coccia et al. (2016), Yeol Yoo et al. (2014), Ceroni (2016), Ibrahim et al. (2016), Abedulgader y Chudoba (2018), Grassl et al. (2018), Benakli et al. (2018). Describiendo estos enfoques se puede decir que:

Los estudios experimentales tratan sobre investigaciones que se llevaron a cabo en laboratorios donde se observó el comportamiento de la adherencia entre el concreto y refuerzo mediante ensayos pull-out. Como resultados se puede destacar un mejor entendimiento de: fenómeno de adherencia en la interfaz concreto – refuerzo, tipos de falla en la adherencia, fenómeno de transferencia de

las fuerzas entre la varilla de acero y el concreto a través de la zona de interacción, la influencia de los parámetros en el comportamiento de la interacción concreto – refuerzo y los efectos producidos en la respuesta estructural, influencia del confinamiento y de las condiciones límite en la adherencia.

Los estudios numéricos tratan sobre el modelamiento computacional del concreto, varilla de acero y su interfaz. Estos modelos se han basado en el DEM, FEM y otros métodos desde un nivel de micro-escala hasta la meso-escala. Estos estudios lograron: analizar el fenómeno de adherencia simulando su comportamiento en elementos esbeltos de concreto reforzado sujetos completamente a tensión, estimar la resistencia del concreto en términos de esfuerzos-deformaciones, análisis del mortero en base a la tecnología de elementos discretos y elementos finitos, modelo no lineal de la interacción acero-concreto, simular el agrietamiento longitudinal en el cuerpo de concreto inducido por la interacción acero-concreto.

El hormigón es un material que puede ser entendido desde varias escalas y también analizado a distintos niveles. Este proyecto pretende mejorar el entendimiento del mecanismo de adherencia entre una matriz cementante y varillas corrugadas con base en el marco teórico descrito en la tecnología del elemento discreto (Lorefice, Etse, Lopez, & Carol, 2006). La modelación se basa en el método de elementos discretos, que simula el comportamiento mecánico de un medio formado por un conjunto de partículas, las cuales interactúan entre sí a través de sus puntos de contacto (Donzé, Richefeu, & Margnier , 2008). La cohesión toma un papel muy importante en la modelación del medio granular debido a que las partículas de la matriz cementante deben tener un comportamiento similar al del concreto endurecido. El modelo cohesivo de Johnson-Kendall-Roberts (JKR) es utilizado por el software LIGGGHTS cuando se requiere caracterizar un material con cohesión.

El incremento en la capacidad computacional permite el desarrollo de modelos numéricos a meso-escala basados en descripciones más realistas del material (García Alonso & Gutiérrez Jiménez, 1999). Los estudios de la meso-escala se los realiza representando al hormigón en partículas discretas para comprender su comportamiento mecánico mediante la interacción entre ellas (González, Botero,

Rochel, & Vidal, 2005); la finalidad de este estudio es proponer un modelo discreto en el que se pueda describir al material por componente en contra parte a los modelos continuos tradicionales que representa un material compuesto de manera homogeneizada.

En este contexto es importante resaltar que la literatura indicada no muestra un estudio numérico computacional basado en el método de elemento discreto en el cual conste el modelamiento de la meso-escala en el que interactúe matriz cementante con una varilla corrugada de acero con geometría real que simule un ensayo pull-out permitiendo observar el fenómeno de adherencia en la interfaz y los mecanismos de transmisión de fuerza entre matriz cementante y refuerzo. Este hecho justifica la propuesta de este estudio. Por lo tanto, este proyecto pretende dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación:

¿Pueden los mecanismos de transmisión de fuerzas entre las componentes del hormigón armado ser evaluadas cualitativa y cuantitativamente con el uso de modelos discretos?

Responder esta pregunta de investigación podría afectar de manera positiva el entendimiento del fenómeno de adherencia entre concreto y refuerzo y permitiría divisar estrategias para mejorar los conocimientos que se tiene del hormigón a nivel de macro escala.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Generar modelos numérico-computacionales para identificar los mecanismos de transmisión de fuerzas por adherencia entre varillas de refuerzo y una matriz cementante.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Generar un procedimiento para representar la meso-escala del hormigón en base a un marco de trabajo establecido por la tecnología del elemento discreto y calibrar los potenciales que gobiernan el comportamiento del modelo computacional.

2. Evaluar numéricamente los mecanismos de desarrollo de la adherencia (refuerzo-matriz) en base al esquema de transmisión de fuerzas habilitado en la representación discreta del hormigón.
3. Estudiar la influencia de la geometría del refuerzo en los mecanismos de desarrollo de adherencia.

1.3 ALCANCES

1. Se usara software libre para la modelación del medio granular basado en tecnología DEM.
2. El proyecto estudiará la interacción entre matriz cementante y 4 tipos de varillas de diferente geometría pretendiendo observar su influencia en la adherencia.
3. El estudio se centra en el análisis de cadenas de fuerzas entre las partículas de un volumen de control que interactúan con la varilla.
4. La matriz compuesta será representada sobre la base de un modelo discreto de partículas granulares.

1.4 METODOLOGÍA

1.4.1 ACTIVIDAD 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Para respaldar la propuesta de este estudio se han revisado diferentes fuentes bibliográficas como: papers, libros, artículos científicos y otros proyectos de titulación, que contienen información de DEM, materiales granulares, adhesión y cohesión. Se pueden destacar entre estos: “A Discrete Numerical Model For Granular Assemblies” escrito por Cundall y Strack, “Particulate Discrete Element

Modelling” escrito por Suvillan en los cuales se describen los fundamentos de la tecnología DEM.

1.4.2 ACTIVIDAD 2: ENSAMBLE DE MATRIZ CEMENTANTE Y

GEOMETRÍA DE VARILLAS DE ACERO

La matriz cementante se ensambla con partículas esféricas y discretas como lo establece el DEM para comprender su comportamiento mecánico mediante la interacción entre ellas a través de sus puntos de contacto (Cundall & Strack, 1979). Las varillas de acero se las representa como un cuerpo solido que destaca la geometría de los corrugados según lo establece la ASTM para garantizar la correcta interacción entre partículas de la matriz cementante.

1.4.3 ACTIVIDAD 3: MODELAMIENTO

En esta etapa se caracterizan mecánicamente los materiales (i.e. matriz cementante y acero) involucrados en el estudio. Las propiedades mecánicas del material como módulo de elasticidad, relación de Poisson, coeficiente de fricción, se deben tomar muy en cuenta, puesto que de esto depende el nivel de aproximación del modelo (Antony, Hoyle, & Ding, 2004); primero se caracteriza el medio granular (i.e. matriz cementante), los datos que corresponden a las propiedades de la matriz cementante se los obtuvo de fuentes bibliográficas. Posteriormente se realiza la calibración correspondiente de la matriz cementante aplicando cohesión en ésta, para ello se realiza una serie de simulaciones hasta que la matriz cementante refleje el comportamiento apropiado del hormigón. Posteriormente se realiza el ensamble de la matriz cementante con partículas esféricas describiendo la tecnología del DEM en un control de volumen de 30 centímetros de alto y 15 centímetros de diámetro que servirá para realizar las simulaciones correspondientes a ensayos de extracción (i.e. pull-out test). Finalmente, se aplica una velocidad de extracción equivalente a la fuerza de tensión aplicada a una varilla en un ensayo pull-out para poder observar la interacción de las partículas de la matriz cementante como respuesta a un deslizamiento de la varilla.

1.4.4 ACTIVIDAD 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos son de posición y fuerza de contacto de las partículas cohesionadas que representan la matriz cementante y que interactúan con el

modelo de la varilla de acero. Los resultados permiten explorar y evaluar cualitativamente las tendencias del desarrollo de fuerzas de interacción entre matriz cementante y refuerzo como resultado de este fenómeno (Groger, Tuzun, & Heyes, 2003).

CAPÍTULO 2

MEDIO GRANULAR GENERALIDADES

2.1 INTRODUCCIÓN

Podemos encontrar materiales granulares en la naturaleza e industria, por ejemplo, en suelos, en la minería, en silos, en materiales cohesivos como el hormigón. Estos materiales vistos desde la meso escala están conformados por partículas que interactúan entre sí, en algunos casos por fricción y en otros casos por cohesión como lo es en este estudio. Estos materiales tienen un comportamiento muy específico, que aún necesita ser comprendido de una manera más amplia (Donzé, Richefeu, & Margnier , 2008). Para este propósito se hace uso de la simulación numérica, que es un medio que permite, con limitaciones de un modelo, comprender y predecir el comportamiento de una ensamble granular. La micro-mecánica computacional se ha convertido en una herramienta que usan los investigadores para implementar métodos numéricos para el diseño y la optimización de procesos industriales (Kloss & Goniva, 2010), cuyo propósito no se enfoca en el ensamblaje granular como una entidad, sino que deducen sus características globales de la observación del comportamiento individual de cada grano (Nedderman, 2005).

El método DEM fue desarrollado por Cundall en 1979 para el análisis de rocas. Es un modelo numérico capaz de describir el comportamiento mecánico de conjuntos de elementos discretos. Cundall y Strack extienden el DEM para analizar ensamblajes de partículas granulares compuestas de discos circulares y esferas (Cundall & Strack, 1979).

El DEM ha demostrado ser una herramienta confiable para estudiar el comportamiento de materiales granulares en escala microscópica.

2.2 MÉTODO DEL ELEMENTO DISCRETO DEM

Es un método capaz de describir el comportamiento mecánico de un medio formado por un conjunto de partículas las cuales interaccionan entre sí a través

de sus puntos de contacto, estas partículas, de acuerdo a Cundall y Strack, describen una forma esférica o de disco (Cundall & Strack, 1979).

El análisis se realiza de forma discreta, es decir, cada partícula que forma el medio granular es tomada en cuenta de manera individual y caracterizada por su velocidad, movimiento, posición, fuerza tangencial de contacto, fuerza normal de contacto, fuerza de rozamiento y tamaño (Radjai, Dubois, & et al. , 2011).

Los elementos que conforman el medio granular son partículas independientes de geometría esférica. El medio granular es generado con partículas de dimensiones y posición aleatorias, éstos son considerados rígidos tal y como se describe originariamente en la formulación inicial del método de elementos discretos propuesta por Cundall (Kruse & Lemmon, 2005).

2.2.1 LEY DE FUERZA-DESPLAZAMIENTO APLICADA EN EL DEM

El DEM es un método numérico de simulación que se describe con las fuerzas de contacto que surgen del movimiento relativo de las partículas, comenzando con la segunda ley de Newton (Lian, Thornton, & Adams, 1993).

2.2.1.1 Segunda Ley de Newton

La segunda ley de Newton proporciona la relación fundamental entre el movimiento del sistema de partículas y las fuerzas que causan dicho movimiento (Muller, Yushchenko, & Derjaguin, 1980).

Supóngase un medio granular, tal que cada partícula i que lo conforma tiene una masa m_i que se mueve con una aceleración a_i y está sometida a una fuerza f_i . La segunda ley de Newton establece que la fuerza que actúa sobre cada partícula es igual a la masa por la aceleración de cada elemento discreto. La aceleración de estas partículas depende de la masa y las fuerzas que actúan sobre ellas (Muller, Yushchenko, & Derjaguin, 1980). La fuerza neta sobre la partícula se describe con la ecuación 2.1:

$$F_i = m_i a \quad i = 1, \dots, N \quad \text{ecuación 2.1}$$

Donde:

N es el número de partículas en el sistema, m_i es la masa de la partícula i , a_i es la aceleración de i y F_i es la fuerza ejercida sobre esa partícula.

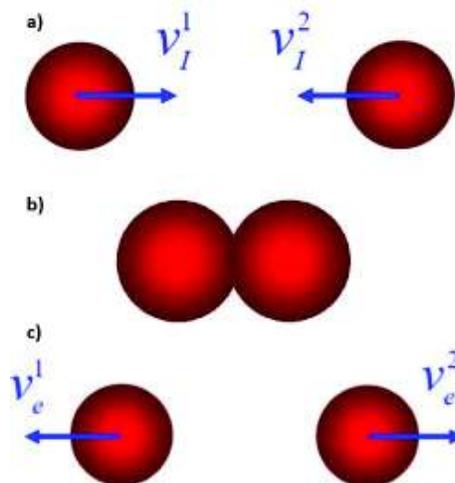
Las fuerzas F_i contienen las interacciones partícula-partícula así como las fuerzas externas. Esta fuerza puede describir la gravedad o las fuerzas de confinamiento debidas a las paredes de un contenedor, así como los efectos adicionales debidos a la adhesión, la cohesión, las formaciones de enlaces y los cambios de temperatura (Pierrat & Caram, 1997). La resultante de todas las fuerzas que actúan sobre el sistema discreto de partículas es igual a la variación por unidad de tiempo de la cantidad de movimiento del mismo.

2.3 CONTACTO ENTRE PARTÍCULAS

La acción que más se repite en una simulación de medios granulares es el contacto entre las partículas, por esta razón, esta es una parte importante del método (Gordon, Zhou, & Sun, 2013).

Cuando dos cuerpos con masa y velocidad chocan entre sí, el comportamiento de la colisión se puede estudiar en términos de la velocidad inicial, la masa de los dos cuerpos y la energía perdida durante el impacto (Kuwabara & Kono, 1987).

FIGURA 2.1: DOS PARTÍCULAS A) ANTES DEL CONTACTO, B) DURANTE EL CONTACTO, C) DESPUÉS DEL CONTACTO.



FUENTE: (Bosch, 2014).

Cuando dos partículas entran en contacto como en la figura 2.1, las partículas se superponen rígidamente y la fuerza de interacción se calcula como una función de esa superposición (Kruggel-Emden, Simsek, Rickelt, Wirtz, & Scherer, 2007).

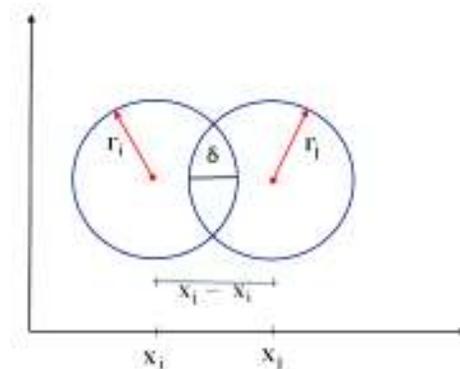
Cuando dos partículas colisionan se presenta un traslape (superposición de dos partículas) δ_n , así como se muestra en la figura 2.2. El traslape se describe con la ecuación 2.2:

$$\delta_n = |X_i - X_j| - r_i - r_j \quad \text{ecuación 2.2}$$

Donde:

X_i y X_j son los centros de las partículas y r_i y r_j son sus respectivos radios. Cuando la separación $\delta_n > 0$, las dos partículas no están en contacto y no hay interacción. Cuando $\delta_n < 0$, se dice que las dos partículas se superponen y se calcula una fuerza de contacto repulsiva que separa las partículas (Labous, Rosato, & Dave, 1997), así como se muestra en la figura 2.2.

FIGURA 2.2: TRASLAPE DE DOS PARTÍCULAS EN CONTACTO.



FUENTE: (Janda y Morrissey, 2016).

2.3.1 FUERZAS DE CONTACTO

Las fuerzas de contacto se pueden interpretar por la aplicación de la tercera ley de Newton. La fuerza de contacto que ejerce una partícula sobre otra, de acuerdo

a la ley de acción-reacción (Goldsmith, 1960) satisface la relación siguiente (ecuación 2.3):

$$F_1 = F_2 \quad \text{ecuación 2.3}$$

2.3.1.1 Descomposición de las fuerzas de contacto.

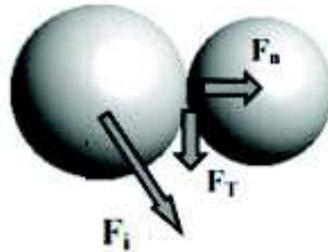
Las fuerzas de contacto que definen la interacción entre dos partículas, pueden descomponerse en una componente normal y una componente tangencial (Kruggel-Emden, Simsek, Rickelt, Wirtz, & Scherer, 2007).

La dirección normal es aquella definida por el eje que une los dos centros de las partículas esféricas. Asimismo, mientras que la dirección tangencial es la perpendicular al antes mencionado eje, como se muestra en la ecuación 2.4.

$$F = F_n + F_t \quad \text{ecuación 2.4}$$

En la figura 2.3 se puede observar la fuerza de contacto entre dos partículas.

FIGURA 2.3: DESCOMPOSICIÓN DE LA FUERZA DE CONTACTO ENTRE DOS PARTICULAS.



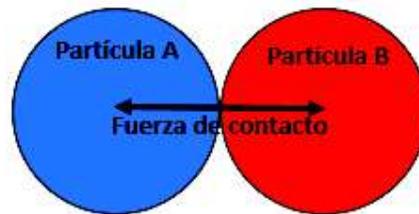
FUENTE: (Cruz, 2005).

2.4 MODELO DE CONTACTO HERTZ

El fenómeno que involucra el contacto de dos cuerpos curvos de igual o diferente radio de curvatura fue resuelto por Hertz en 1882. Esta ley establece la relación entre la compresión o superposición de las partículas y la fuerza creada cuando chocan. Supongamos dos esferas rígidas con módulo de elasticidad, radio y

velocidad específicas. La fuerza de contacto generada por el impacto de estas dos partículas será una línea recta que pasará por el punto donde establecieron el contacto y los centros de las partículas (Hertz, 1882) como se indica en la figura 2.4.

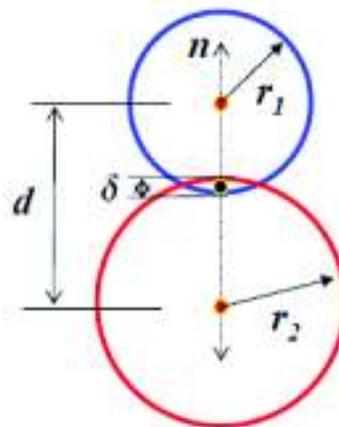
FIGURA 2.4: FUERZA DE CONTACTO ENTRE DOS PARTÍCULAS.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

Este modelo granular utiliza la ecuación 2.5 para evaluar la fuerza de fricción entre dos partículas granulares, cuando la distancia r entre dos partículas de radios r_1 y r_2 es menor que su distancia de contacto d así como se observa en la figura 2.5. No hay fuerza entre las partículas cuando $r > d$ (Bosch, 2014).

FIGURA 2.5: DISTANCIAS ESTABLECIDAS EN EL CONTACTO ENTRE DOS PARTÍCULAS.



FUENTE: (Bosch, 2014).

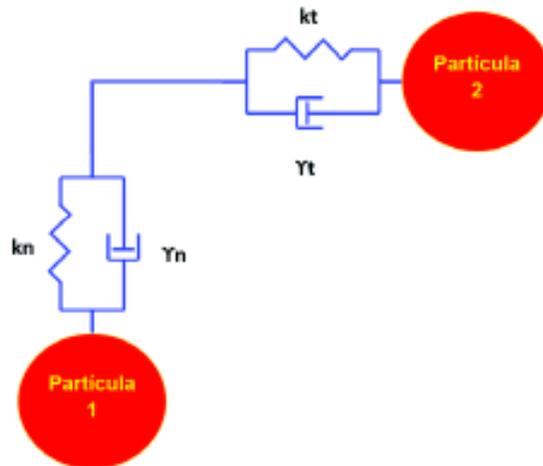
$$F = (k_n \delta_{n_{ij}} - \gamma_n V_{n_{ij}}) + (k_t \delta_{t_{ij}} - \gamma_t V_{t_{ij}}) \quad \text{ecuación 2.5}$$

Donde:

k_n es la constante elástica de la componente normal, k_t es la constante elástica de la componente tangencial, δ_n es el traslapo entre dos partículas, γ_n es la constante de amortiguamiento viscoelástico para contacto normal, V_n es la componente normal de la velocidad relativa entre dos partículas, k_t es la constante elástica de la componente tangencial, δ_t es el vector de desplazamiento tangencial entre dos partículas, γ_t es la constante de amortiguamiento viscoelástico para contacto tangencial, V_t es la componente tangencial de la velocidad relativa entre dos partículas.

La expresión $(k_n \delta_{n_{ij}} - \gamma_n V_{n_{ij}})$ corresponde a la fuerza normal y la expresión $(k_t \delta_{t_{ij}} - \gamma_t V_{t_{ij}})$ corresponde a la fuerza tangencial. La fuerza normal tiene 2 términos, una fuerza elástica y una fuerza de amortiguación. La fuerza tangencial también tiene 2 términos: una fuerza de corte y una fuerza de amortiguación. La figura 2.6 muestra claramente la interacción entre dos partículas mediante el modelo de Hertz.

FIGURA 2.6: COMPORTAMIENTO DE FUERZAS ELASTICAS Y FUERZAS DE AMORTIGUAMIENTO EN COMPONENTE NORMAL Y TANGENCIAL EN EL CONTACTO ENTRE DOS PARTÍCULAS.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

En la figura 2.6 se muestra la descripción del modelo de contacto de Hertz utilizado en LIGGGHTS entre dos partículas que interactúan mediante fuerzas de contacto normal y tangencial en las que intervienen la constante elástica y constante de amortiguamiento.

El módulo de Elasticidad efectivo, el módulo de corte, el radio y la relación de Poisson son las propiedades de los materiales que se requieren para el análisis de la fuerza de contacto de las partículas (Kruggel-Emden, Simsek, Rickelt, Wirtz, & Scherer, 2007).

2.5 CARACTERIZACIÓN DE LA PARTÍCULA

Las propiedades mecánicas que se consideran para caracterizar a la partícula son las siguientes:

2.5.1 MÓDULO DE ELASTICIDAD

El cambio relativo de forma y de las dimensiones de un material se denomina deformación y está en función de las propiedades moleculares del material. La deformación en un cuerpo se da como resultado de un esfuerzo aplicado. Cuando

un cuerpo elástico sufre una deformación, ésta es proporcional a la fuerza aplicada, cuando dicha fuerza es retirada, el cuerpo toma sus dimensiones originales. Sin embargo, existe un límite elástico después del cual los cuerpos ya no regresan a sus dimensiones originales (Sideris, Manita, & Sideris, 2004).

Cuando un esfuerzo de tensión o compresión actúa en un cuerpo elástico, el módulo que relaciona el esfuerzo y la deformación se denomina Módulo de Elasticidad. El módulo de Elasticidad se define en la ecuación 2.6:

$$E = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} \quad \text{ecuación 2.6}$$

Donde:

F es la fuerza aplicada para deformar un objeto, A es el área sobre la cual actúa, ΔL es el cambio longitudinal experimentado y L_0 es la longitud inicial del cuerpo.

Para el hormigón, la forma habitual de determinar el módulo E es cargar una muestra en compresión y registrar el diagrama de carga-deformación. Según el ACI define al Módulo de elasticidad como la relación entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria correspondiente, para esfuerzos de tracción o compresión menores que el límite de proporcionalidad del material. En el capitulo 8.5 establece que para concreto de densidad normal el Módulo de elasticidad se define con la siguiente ecuación 2.7:

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad \text{ecuación 2.7}$$

Donde:

f'_c es la resistencia especificada a la compresión del concreto expresada en MPa.

2.5.2 RELACIÓN DE POISSON

La relación de Poisson es un parámetro fundamental y necesario en el análisis estructural para la determinación de las distribuciones y desplazamientos de deformación, especialmente cuando el diseño se basa en consideraciones de elasticidad (Sideris, Manita, & Sideris, 2004). De acuerdo con el ASTM C 318-92 la relación de Poisson (ν) se define como la relación de deformación transversal y

axial del hormigón, por lo tanto se lo puede describir con la siguiente ecuación 2.8:

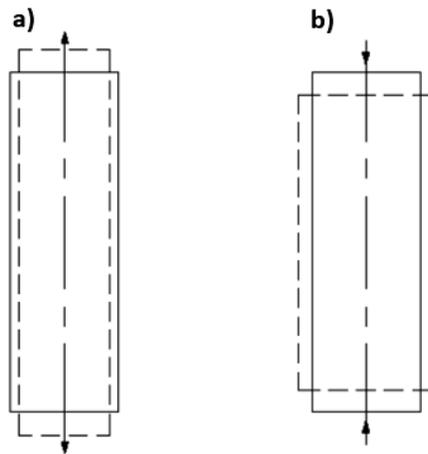
$$\nu = -\frac{\varepsilon_{\text{trans}}}{\varepsilon_{\text{long}}} \quad \text{ecuación 2.8}$$

Donde:

$\varepsilon_{\text{trans}}$ es la deformación transversal y $\varepsilon_{\text{long}}$ es la deformación longitudinal.

La figura 2.7 muestra un ejemplo de la deformación que ocurre cuando a un material se lo somete a fuerzas de tensión y compresión.

FIGURA 2.7: MATERIAL SOMETIDO A A) FUERZA DE TRACCIÓN Y B) FUERZA DE COMPRESIÓN.



FUENTE: (Neville, 2012).

El método para determinar la relación de Poisson se detalla en la ASTM C469. El apartado 363-92 del American Concrete Institute (ACI) dice que los valores experimentales para el coeficiente de Poisson para hormigones de alta resistencia son muy limitados, se reporta un valor para este coeficiente de 0.2 a menos que se determine mediante ensayos físicos otro valor.

2.6 CARACTERIZACIÓN DEL CONGLOMERADO

Las propiedades que se toman en cuenta en la caracterización del conglomerado son las siguientes:

2.6.1 COEFICIENTE DE RESTITUCIÓN

El coeficiente de restitución es el cambio de velocidad relativa de las partículas en contacto e inelásticas (Kuwabara & Kono, 1987). Se lo expresa como indica la ecuación 2.9.

$$C_R = \frac{\mathcal{V}}{\mathcal{U}} \quad \text{ecuación 2.9}$$

Donde:

\mathcal{V} es la velocidad relativa final y \mathcal{U} es la velocidad relativa inicial entre dos objetos que colisionan entre sí,

El coeficiente de restitución presenta valores de entre 0 y 1; si tiene un valor de cero se supone un choque perfectamente inelástico, mientras que si su valor es 1 se supone un choque elástico (Ramirez, Poschel, Brilliantov, & Schwager, 2008).

Estudios numéricos realizados por McNamara y Falcon (2018) registran un modelo numérico que simula una vibración en el medio granular con velocidades de impacto dependiente del coeficiente de restitución. El coeficiente de restitución depende de la velocidad de impacto teniendo en cuenta las deformaciones que ocurren en el contacto de las partículas.

2.6.2 FRICCIÓN

La fuerza de fricción es la oposición al deslizamiento de las superficies de dos cuerpos en contacto debido a la rugosidad de estas; cuando interactúan dos superficies, el movimiento de una con respecto a la otra genera fuerzas tangenciales o fuerzas de fricción, que tienen sentido contrario a la fuerza aplicada (Chang, 1986). El valor del coeficiente de fricción es característico de cada par de materiales en contacto y además depende de factores como la temperatura, la rugosidad de las superficies, la velocidad relativa entre las

superficies, etc (Goldsmith, 1960). El coeficiente de fricción se lo define con la siguiente ecuación 2.10:

$$\mu = \frac{F}{P} \quad \text{ecuación 2.10}$$

Donde:

F es la fuerza tangencial o de fricción y P es la fuerza normal.

La fuerza de fricción estática es la implementada en LIGGGHTS. Ésta se hace presente cuando no existe movimiento relativo entre los cuerpos en contacto (Ballaz, 2005).

Estudios experimentales demuestran el funcionamiento de la fuerza de fricción. Trabajos simples como medir la fuerza de fricción poniendo dos superficies irregulares en contacto en un plano inclinado hasta un límite donde una superficie empieza a deslizarse sobre la otra; y trabajos complejos como el de Sundararajan y Bhushan (2001) que consisten en generar una deflexión lateral a través de un micromotor usando un microscopio de fuerza atómica. El máximo valor de la deflexión equivale a la fuerza de fricción estática obtenida por el microscopio.

2.6.3 COHESIÓN

Las fuerzas de cohesión son el resultado de las interacciones de atracción entre las partículas. Dichas fuerzas se refieren a la interacción de atracción entre partículas del mismo tipo de materiales, estas interacciones incluyen contactos tales como interacciones físico-químicas con intervalos de atracción muy cortos (Tomas, 2001).

2.6.3.1 Modelo Cohesivo Johnson-Kendall-Roberts

Este modelo cohesivo es el que se utilizará en el software LIGGGHTS para este estudio, el modelo Johnson-Kendall-Roberts (JKR) usa partículas esféricas para simular sistemas tridimensionales y hacen las siguientes suposiciones (Groger, Tuzun, & Heyes, 2003):

- Las partículas son perfectamente lisas.
- El comportamiento es elástico e isotrópico.

- La componente tangencial de la fuerza no afecta a la componente normal.
- El traslapeo entre partículas es menor al radio de la zona de contacto.

El modelo Johnson-Kendall-Roberts (JKR), es una optimización del modelo de contacto Hertz. El modelo JKR tiene en cuenta la energía superficial donde se produce el contacto entre partículas (Maugis, 1992).

Este modelo de cohesión agrega una contribución de fuerza normal adicional llamada fuerza de atracción, que tiende a mantener el contacto, esta fuerza se describe en la ecuación 2.11:

$$F = KA \quad \text{ecuación 2.11}$$

Donde:

A es el área de contacto de las partículas y k es la densidad de energía de cohesión en j/m^3 .

El modelo JKR relaciona partículas de diferente tamaño o diferentes propiedades con los parámetros como Módulo de elasticidad efectivo (ecuación 2.12), radio efectivo (ecuación 2.13) y Módulo de Corte efectivo (ecuación 2.14); es por esta razón que el modelo JKR permite conocer la fuerza de adhesión (Maugis, 1992).

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1 - \nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \nu_2^2)}{E_2} \quad \text{ecuación 2.12}$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \text{ecuación 2.13}$$

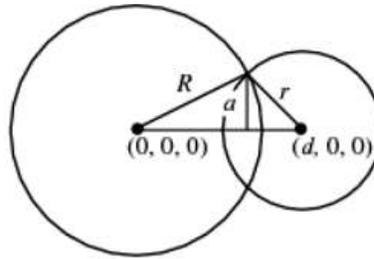
$$\frac{1}{G^*} = \frac{2(2 + \nu_1)(1 - \nu_1)}{E_1} + \frac{2(2 + \nu_2)(1 - \nu_2)}{E_2} \quad \text{ecuación 2.14}$$

Donde:

E^* es el módulo de Elasticidad efectiva, E_1 es el módulo de Elasticidad de la partícula 1, E_2 es el módulo de elasticidad de la partícula 2, G^* el módulo de corte efectivo, ν_1 es la relación de Poisson de la partícula 1, ν_2 es la relación de

Poisson de la partícula 2, R^* es el radio efectivo, R_1 es el radio de la partícula 1 y R_2 es el radio de la partícula 2.

FIGURA 2.8: RADIO DE LA ZONA DE CONTACTO ENTRE DOS PARTÍCULAS.



FUENTE: (Del Cid, 2015).

Esta teoría correlaciona el área de contacto de dos partículas con las propiedades del material elástico y la fuerza de interacción interfacial (Groger, Tuzun, & Heyes, 2003). Es necesario definir el radio de la zona de contacto (ecuación 2.15), que es aquel radio que se forma en el traslape de dos partículas que colisionan (ver figura 2.8) para poder describir el área de contacto (ecuación 2.16).

$$a = \frac{1}{2d} \sqrt{(-d + R_1 - R_2)(-d - R_1 + R_2)(-d + R_1 + R_2)(d + R_1 + R_2)} \quad \text{ecuación 2.15}$$

$$\text{Area} = \pi a^2 \quad \text{ecuación 2.16}$$

$$d = R_1 + R_2 - \delta_n \quad \text{ecuación 2.17}$$

Donde:

d es la distancia entre los centros de ambas partículas en la colisión, R_1 es el radio de la partícula 1 y R_2 es el radio de la partícula 2, δ_n es el traslape de las dos partículas colisionadas.

La densidad de energía de cohesión k se define con la ecuación 2.18.

$$k = \frac{\sqrt{8\pi E^* \gamma a^3}}{\pi a^2} \quad \text{ecuación 2.18}$$

Donde:

E^* es el Módulo de Elasticidad efectivo, γ es la energía de superficie, a es el radio de la zona de contacto.

Entonces se puede definir la fuerza de cohesión JKR como la fuerza normal (ecuación 2.19) más la fuerza de atracción (ecuación 2.11).

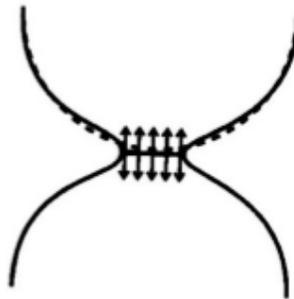
$$f_n = \frac{4a^2}{3R^*} - \sqrt{8\pi E^* \gamma a^3} \quad \text{ecuación 2.19}$$

Donde:

E^* es el Módulo de Elasticidad efectivo, a es el radio de la zona de contacto, R^* es el radio efectivo, γ es la energía de superficie.

Esto representa un modelo completamente elástico con cohesión entre partículas en la zona de contacto (Bradley, 1932). La Figura 2.9 proporciona un ejemplo del modelo JKR e ilustra la fuerza de tensión entre las partículas en contacto cohesivo.

FIGURA 2.9: FUERZAS DE TENSIÓN PROVOCADAS POR FUERZAS DE COHESIÓN JKR.



FUENTE: (Del Cid, 2015).

El modelo no proporciona resistencia en la dirección de corte tangencial

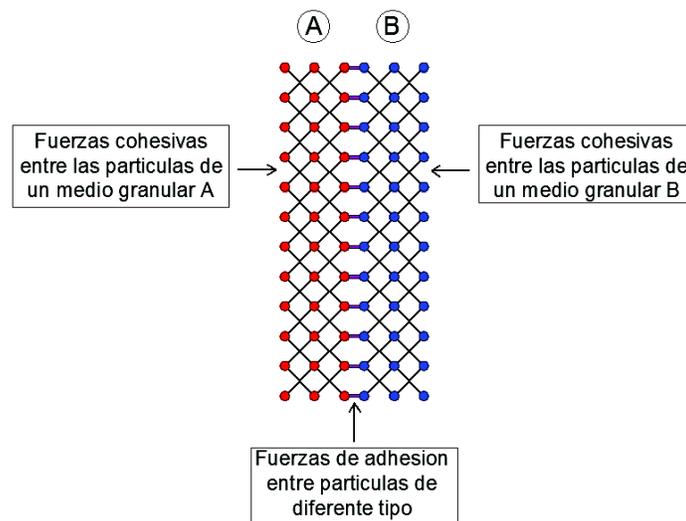
2.7 ADHESIÓN

La adhesión es una propiedad de los materiales por la cual dos superficies de sustancias diferentes se mantienen juntas por fuerzas intermoleculares cuando entran en contacto (Galanov, 2011).

La adhesión desempeña un papel muy importante en la construcción tradicional, como por ejemplo, la adhesión del ladrillo con el mortero.

La figura 2.10 muestra un esquema del funcionamiento de la adhesión entre partículas.

FIGURA 2.10: ADHERENCIA ENTRE PARTÍCULAS DE DIFERENTES TIPO Y COHESIÓN ENTRE PARTÍCULAS DEL MISMO TIPO.



FUENTE: (Lutz y Gergeley, 1967).

La adherencia hormigón-acero es el fenómeno que gobierna el funcionamiento del hormigón armado como material estructural (Molina & Gutiérrez, 2005).

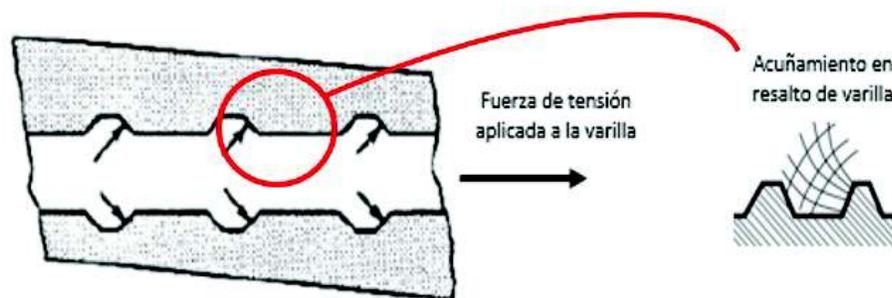
2.7.1 ADHERENCIA HORMIGÓN - ACERO

Con la falta de adherencia, las barras de acero no podrían tomar el menor esfuerzo de tracción, ya que el acero se deslizaría sin encontrar una fuerza que se oponga en toda su longitud y no se deformaría junto al hormigón (Uijl & Bigaj, 1996).

La adherencia es causada por dos fenómenos:

- De naturaleza física (o físico-química): La adhesión se produce por las fuerzas capilares y moleculares desarrolladas en la interfaz; el acero absorbe pasta cementante, ayudado por el efecto de la retracción.
- De naturaleza mecánica: Es el resultado de la resistencia al deslizamiento debido a que el cemento penetra en el corrugado de las barras de acero. Esto da origen a los fenómenos de rozamiento y acuñaamiento del hormigón entre los resaltos como se muestra en la figura 2.11.

FIGURA 2.11: TRANSMISIÓN DE FUERZA DE TENSION ENTRE VARILLA Y CONCRETO.



FUENTE: (Goto, 1971).

La figura 2.11 muestra como la fuerza de tensión aplicada a la varilla genera fuerzas de contacto sobre el concreto con un ángulo de inclinación donde existen resaltos y se produce el fenómeno de acuñaamiento.

CAPÍTULO 3

MODELAMIENTO COMPUTACIONAL DE LA MATRIZ CEMENTANTE Y VARILLAS DE ACERO (MESO- ESCALA).

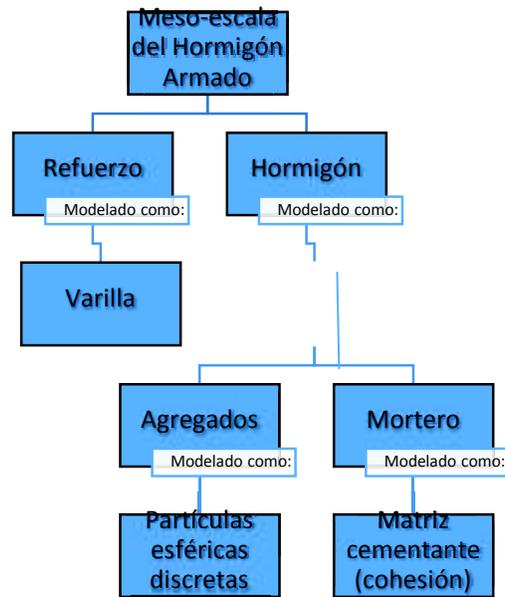
3.1 INTRODUCCIÓN

El hormigón es un material con un comportamiento complejo debido a que no es homogéneo como se asume en la teoría del continuo, sino que sus componentes constitutivos poseen una estructura heterogénea en la cual su tamaño es significativamente menor que las dimensiones estructurales. El hormigón también presenta un comportamiento no lineal debido a la propagación y acumulación de microgrietas en el interior de su estructura. Por lo tanto, el hormigón es considerado un material multiescala pudiéndose analizar a distintos niveles de observación como: macro-escala, meso-escala y micro-escala.

La meso-escala es el nivel de observación donde un material se muestra discretizado en sus componentes constitutivas representadas por partículas discretas que interactúan entre sí por medio de potenciales que caracterizan su comportamiento (e.g. cohesión, fricción, fuerza de contacto). Por lo tanto, en esta escala se pueden discutir las propiedades de un material y los fenómenos que lo involucren de una manera más razonable.

En esta investigación se estudia la meso-escala para representar al hormigón armado mediante un modelo cuya estructura se muestra en la figura 3.1.

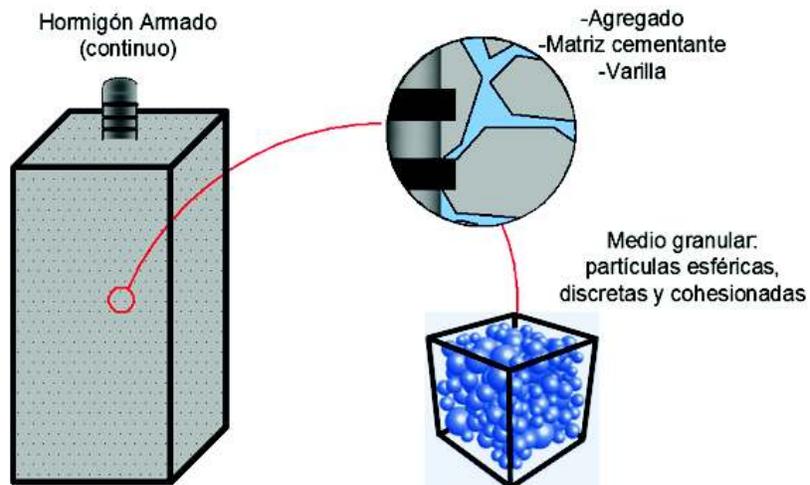
FIGURA 3.1: ESTRUCTURA DE LA MESO-ESCALA DEL HORMIGÓN ARMADO.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

En la figura 3.2 se muestra la representación de la estructura de la meso-escala del hormigón armado de acuerdo a la figura 3.1.

FIGURA 3.2: MESO-ESCALA DEL HORMIGÓN ARMADO.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

En este contexto, se generó un modelo a nivel meso-escala del hormigón armado en base a parámetros y distribución de tamaños de partículas de agregado que se describen en el desarrollo de este capítulo para poder observar el comportamiento constitutivo del hormigón debido a que las propiedades mecánicas de la matriz cementante influyen en el comportamiento de la adherencia con el acero (Chang, 1986). La meso-estructura generada fue modelada basada en el método de elementos discretos (DEM) porque a nivel de la meso-escala el concreto muestra un comportamiento heterogéneo (Gambarova, Rosati, & Zasso, 1989).

En el presente capítulo se considerara el Método de Elemento Discreto (DEM) para el modelamiento del hormigón armado representado por: (1) los agregados gruesos que estarán conformados por partículas esféricas, individuales y discretas, (2) la matriz cementante que aporta la cohesión a los agregados gruesos representada de acuerdo al modelo cohesivo propuesto por Johnson Kendall Robert que se detalla en el capítulo 2. La fuerza cohesiva caracteriza a la matriz cementante permitiendo que las partículas permanezcan unidas y de esta forma analizar su comportamiento individual e interacciones.

El modelamiento computacional de los especímenes (i.e. matriz cementante y varilla de acero) permite observar de manera correcta el fenómeno de adherencia entre matriz cementante y varilla. El modelo utilizado en este estudio se describe a continuación:

1. Los materiales y sus leyes constitutivas. Varios parámetros de la matriz cementante, como la forma, el tamaño, la distribución de los agregados gruesos, módulo de Young, relación de Poisson, coeficiente de fricción y cohesión, influyen de manera significativa en su comportamiento mecánico (Mabrouk, Ishida, & Maekawa, 1998).
2. Descripción geométrica. La simulación se lleva a cabo en una probeta cilíndrica de 30 centímetros de alto y 15 centímetros de diámetro como lo establece la norma ASTM C900-15 que estará llena de partículas cohesionadas que representan la matriz cementante y en el centro la varilla de acero caracterizada por la geometría sus resaltos.

3. Condiciones de frontera. La varilla de acero tiene que simular su comportamiento en un ensayo pull-out. Una limitación del programa LIGGGHTS es que no permite agregar fuerzas a elementos en el modelamiento, es decir, no se puede especificar una fuerza de tensión en la varilla. Por esta razón se calculó la velocidad de extracción relativa a una fuerza de tensión aplicada a una varilla en un ensayo pull-out.
4. Aspectos numéricos del modelamiento computacional. El método numérico utilizado en la solución de la EDO que utiliza el DEM depende de la selección de un adecuado time-step. Este time-step está asociado a conceptos energéticos y deformaciones considerables en las partículas (Yavuzturk & Spitler, 1999).

3.2 MATERIALES Y SUS LEYES CONSTITUTIVAS

3.2.1 PROPIEDADES DE LA MATRIZ CEMENTANTE

En la tabla 3.1 se especifican las propiedades con las que se modeló la matriz cementante para representar a un hormigón de resistencia de 21MPa de acuerdo a los conceptos establecidos en el capítulo 2 y a la revisión bibliográfica que se indica en la fuente de la tabla 3.1.

TABLA 3.1: PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MATRIZ CEMENTANTE.

ρ (kg/m^3) = Densidad	2400
E (GPa) = Módulo de Elasticidad	21
ν = Relación de Poisson	0.2
C_R = Coeficiente de restitución	0.28
μ = Coeficiente de fricción	0.45

FUENTE: (ACI 318 capítulo 8.5), (Apartado 363-92 del ACI), (Zaven Davidian, 1982), (Jankowski 2005), (Anagnostopoulos y Karamaneas 2008), (Manual de diseño de Portland Cement Association (PCA) apéndice A).

3.2.2 DENSIDAD DE ENERGÍA DE COHESIÓN DE LA MATRIZ CEMENTANTE

Como se menciona en el capítulo 2, en esta investigación se usa el modelo de cohesión Johnson-Kendall-Roberts. Este modelo usa la densidad de energía de cohesión para, conjuntamente con el software LIGGGHTS, calcular las fuerzas de contacto que describen el comportamiento constitutivo de la matriz cementante. Los datos que se muestran en la tabla 3.2. son resultados de las ecuaciones indicadas en el capítulo dos.

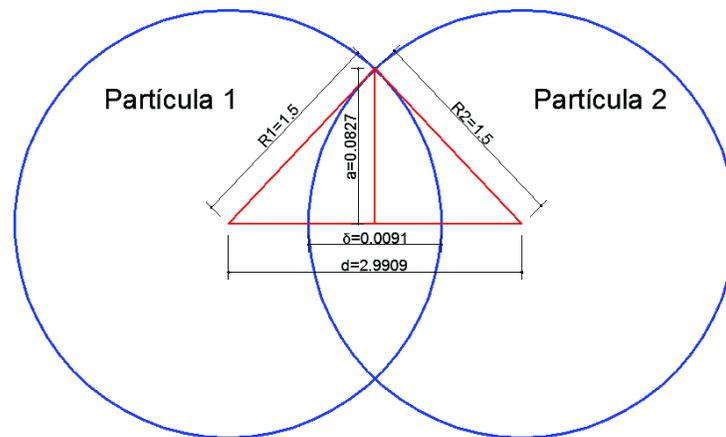
TABLA 3.2: DATOS DE UN PAR DE PARTÍCULAS DE MATRIZ CEMENTANTE EN CONTACTO.

R1 (mm) = radio de la partícula 1	1.5	Dato
R2 (mm) = radio de la partícula 2	1.5	Dato
δ (mm) = traslape	0.0091	Ecuación 2.2
d (mm) = distancia entre centro de partículas	2.9909	Ecuación 2.17
a (mm) = radio de la zona de contacto	0.0827	Ecuación 2.15
Área (mm^2) = área de contacto	2.15E-02	Ecuación 2.16

FUENTE: (Datos obtenidos de la simulación del programa LIGGGHTS).

La figura 3.3 representa el contacto de dos partículas de la matriz cementante de acuerdo a los datos obtenidos en la tabla 3.2.

FIGURA 3.3: PAR DE PARTÍCULAS DE LA MATRIZ CEMENTANTE EN CONTACTO.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

Estos datos son de utilidad para establecer la relación entre el par de partículas que se mantienen en contacto debido a la fuerza cohesiva existente entre ellas. Posteriormente con ayuda de estos datos se calcula la densidad de energía de cohesión como se indica en la tabla 3.3.

TABLA 3.3: DENSIDAD DE ENERGÍA DE COHESIÓN DE LA MATRIZ CEMENTANTE.

γ (J/mm^2) = Energía de superficie	6.71E-05	Dato
R^* (mm) = Radio efectivo	0.75	Ecuación 2.14
E^* (GPa) = Módulo de elasticidad efectivo	10.9375	Ecuación 2.12
k (J/mm^3) = Densidad de energía de cohesión	0.150314	Ecuación 2.18

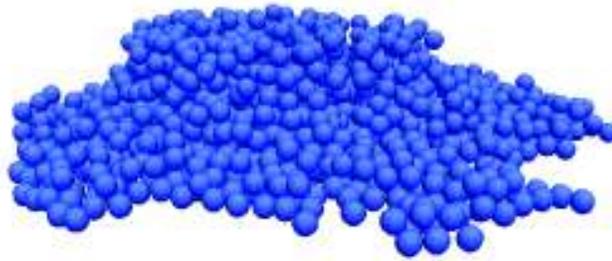
FUENTE: datos obtenidos de la simulación con LIGGGHTS.

Para corroborar el valor de la densidad de energía de cohesión, se realizaron varias simulaciones con valores diferentes de k utilizando la caracterización de la

matriz cementante de la tabla 3.1, los resultados obtenidos se muestran en las figuras 3.4 hasta la figura 3.6.

Cuando el valor de la densidad de energía de cohesión es el indicado, las partículas de la matriz cementante permanecerán en contacto debido a que la fuerza cohesiva en el modelo de Johnson-Kendall-Roberts generado por la energía de densidad de cohesión tiene un comportamiento normal.

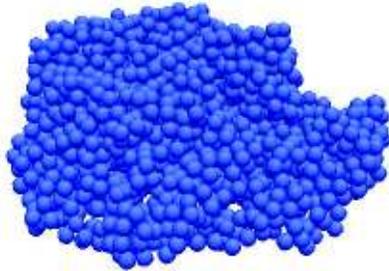
FIGURA 3.4: SIMULACIÓN DE PARTÍCULAS DE MATRIZ CEMENTANTE PARA UN VALOR DE k BAJO.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

En la figura 3.4 se observa que las partículas de la matriz cementante frente a un valor de densidad de energía de cohesión menor al indicado en la tabla 3.3 no permanecen juntas. El medio granular no muestra cohesión.

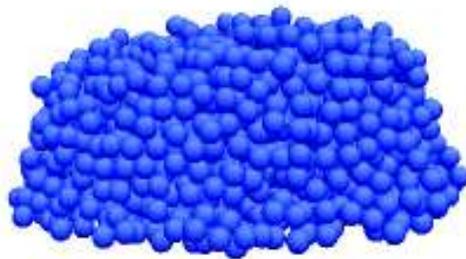
FIGURA 3.5: SIMULACIÓN DE PARTÍCULAS DE MATRIZ CEMENTANTE PARA UN VALOR DE k ALTO.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

En la figura 3.5 se observa que las partículas permanecen juntas debido a la densidad de energía de cohesión. Al ser el valor de k mucho mayor al indicado en la tabla 3.3, se generan fuerzas cohesivas que hacen que las partículas de la matriz cementante se redistribuyan y adopten una forma diferente a la planteada inicialmente.

FIGURA 3.6: SIMULACIÓN DE PARTÍCULAS DE MATRIZ CEMENTANTE PARA UN VALOR DE k ADECUADO.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

En la figura 3.6, las partículas de la matriz cementante permanecen unidas manteniendo la forma cilíndrica que se les impuso debido a que se utilizó la densidad de energía de cohesión que se muestra en la tabla 3.3.

3.2.3 PROPIEDADES DE LAS VARILLAS DE ACERO

Las varillas corrugadas de acero son utilizadas como refuerzo debido a su capacidad de absorber los esfuerzos de tracción conservando el concreto en compresión (Uijl & Bigaj, 1996). Los resaltos mejoran la adherencia con el hormigón e inhiben el movimiento longitudinal entre la varilla y el concreto. El espaciamiento entre los resalto es uniforme a lo largo de la varilla (Molina & Gutiérrez, 2004).

En la tabla 3.4 se especifican las propiedades de las varillas de acero de acuerdo a los conceptos establecidos en el capítulo 2 y a la revisión bibliográfica que se indica en la fuente de la tabla 3.4.

TABLA 3.4: PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS VARILLAS DE ACERO.

E (GPa) = Módulo de Elasticidad	210
ν = Relación de Poisson	0.3
C_R = Coeficiente de restitución	0.41
μ = Coeficiente de fricción	0.3

FUENTE: (NTE INEN 102), (Rivera Hamilton, 2009), (BHADESHIA, H.K.D.H. y Honeycombe R.W.K., 2006), (Norma NTE INEN), (Hangzhou, 2002), (Rabinowicz, E., 1995).

3.2.4 DENSIDAD DE ENERGÍA DE COHESIÓN DEL ACERO

Se usa el modelo de cohesión Johnson-Kendall-Roberts al igual que en la matriz cementante para hallar el valor de la densidad de energía de cohesión. Las ecuaciones indicadas en el capítulo anterior facilitan la obtención de los datos que se indican en la tabla 3.5.

TABLA 3.5: DENSIDAD DE ENERGÍA DE COHESIÓN DEL ACERO.

E^* (GPa) = Módulo de elasticidad efectivo	115.385	Ecuación 2.12
k (J/mm^3) = Densidad de energía de cohesión	1.57626	Ecuación 2.18

FUENTE: datos obtenidos de la simulación con LIGGGHTS.

Para corroborar el valor de la densidad de energía de cohesión, se realizaron varias simulaciones con valores diferentes de k utilizando la caracterización del acero que se muestra en la tabla 3.4, la simulación en LIGGGHTS utilizó el script mostrado en el anexo 3.

Los resultados fueron los mismos de la matriz cementante, para valores bajos de k se mostró falta de cohesión, para valores altos de k se observó alteración en el acero. De esta manera se demostró que el valor de k ideal es el mostrado en la tabla 3.5.

3.2.5 PROPIEDADES DE LA INTERFAZ MATRIZ CEMENTANTE-ACERO

Los mecanismos que ocurren en la interface sugieren que hay una fuerza de adherencia entre el acero y la matriz cementante que depende de varios factores (i.e. diámetro y textura de la varillas, confinamiento, propiedades mecánicas y geometría de las varillas). Los datos que se listan en la tabla 3.6 fueron necesarios para encontrar el valor de la densidad de energía de adhesión.

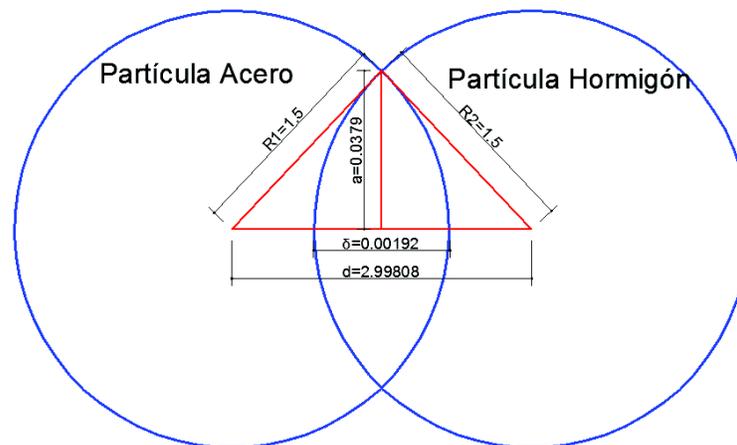
TABLA 3.6: DATOS DEL CONTACTO ENTRE UNA PARTÍCULA DE MATRIZ CEMENTANTE Y UNA PARTÍCULA DE ACERO.

R1 (mm) = radio de la partícula de acero	1.5	Dato
R2 (mm) = radio de la partícula de hormigón	1.5	Dato
δ (mm) = traslape	0.00192	Ecuación 2.2
d (mm) = distancia entre centro de partículas	2.99808	Ecuación 2.17
a (mm) = radio de la zona de contacto	0.0379	Ecuación 2.15
Área (mm^2) = área de contacto	4.52E-03	Ecuación 2.16

FUENTE: Datos obtenidos de la simulación con el programa LIGGGHTS.

De esta manera podemos representar en la figura 3.7 el contacto del par de partículas de la matriz cementante y acero.

FIGURA 3.7: CONTACTO ENTRE PARTÍCULA DE MATRIZ CEMENTANTE Y PARTÍCULA DE ACERO.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

Estos datos son de utilidad para establecer la relación entre una partícula de la matriz cementante y una partícula con las propiedades mecánicas del acero para poder calcular la densidad de energía de adhesión como se indica en la tabla 3.7.

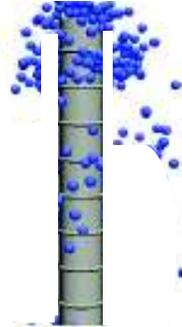
TABLA 3.7: DENSIDAD DE ENERGÍA DE COHESIÓN PARA EL CONTACTO ENTRE PARTÍCULA DE MATRIZ CEMENTANTE Y PARTÍCULA DE ACERO (ADHESIÓN).

γ (J/mm^2) = Energía de superficie	4.297E-05	Dato
R^* (mm) = Radio efectivo	0.75	Ecuación 2.14
E^* (GPa) = Módulo de elasticidad efectivo	20	Ecuación 2.12
k (J/mm^3) = Densidad de energía de cohesión	0.24	Ecuación 2.18

FUENTE: Datos obtenidos de la simulación con LIGGGHTS.

Las partículas de la matriz cementante deben permanecer adheridas a la varilla para satisfacer el comportamiento normal entre varilla de acero y matriz cementante. Las figuras 3.8 hasta la figura 3.10 muestran el comportamiento de la interfaz de matriz cementante y varilla de acero para valores de densidad de energía de adhesión bajos, altos y el indicado que se muestra en la tabla 3.7.

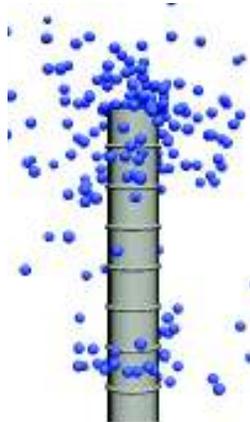
FIGURA 3.8: SIMULACIÓN DE ADHERENCIA PARA UN VALOR DE k BAJO.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

En la figura 3.8 las partículas de la matriz cementante no se adhieren a la varilla. No se observa adhesión, debido al valor de k al que se asignó a la interfaz matriz cementante – acero. Este valor de k es mucho menor al que se muestra en la tabla 3.7.

FIGURA 3.9: SIMULACIÓN DE ADHERENCIA PARA UN VALOR DE k ALTO.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

En la figura 3.9 las partículas de la matriz cementante se dispersan impidiendo que se adhieran a la varilla de acero debido al valor alto de k con la cual se ha hecho la simulación. El valor de k es mucho mayor que el indicado en la tabla 3.7.

FIGURA 3.10: SIMULACIÓN DE ADHERENCIA PARA UN VALOR DE k ADECUADO.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

Las partículas de la matriz cementante en la figura 3.10 se adhieren por completo en la varilla de acero demostrando el comportamiento de la fuerza de adherencia frente a un valor de k correcto (ver tabla 3.7).

3.3 DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL MODELO

La geometría de las varillas de acero es un factor que influye directamente en los resultados del fenómeno de adherencia entre concreto y refuerzo debido a que su diámetro, altura de resalto y distancia entre resaltos determinan la interacción entre este y las partículas de la matriz cementante. El ensamble de las partículas de la matriz cementante muestra una geometría cilíndrica que simula una probeta de hormigón utilizada en ensayos pull-out.

3.3.1 GEOMETRÍA DE LAS VARILLAS CORRUGADAS

Las varillas corrugadas que se utilizan en esta investigación son de 14mm, 22mm y 32mm y una varilla lisa de 32mm de diámetro.

Las características adherentes de las varillas dependen de la forma del resalto, este viene definido por parámetros como: la altura de los resaltos y la separación entre estos (Molina & Gutiérrez, 2004). La geometría de las varillas corrugadas se muestra en la tabla 3.8.

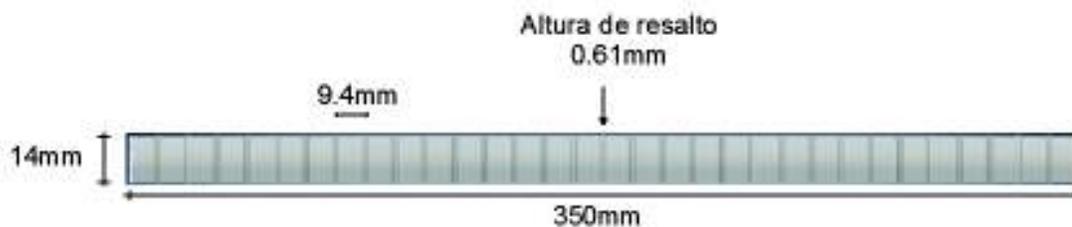
TABLA 3.8: GEOMETRÍA DE LOS RESALTOS DE LAS VARILLAS CORRUGADAS.

Diámetro de varilla (mm)	Altura de resalto (mm)	Distancia entre resaltos (mm)	Longitud de varilla (mm)
14	0.61	9.4	350
22	1.12	15.5	350
32	1.63	22.6	350

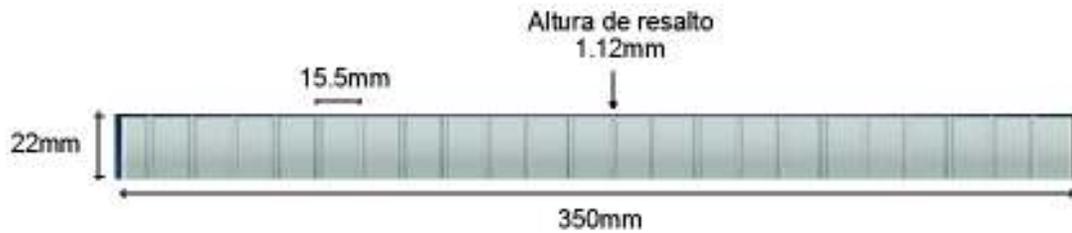
FUENTE: (SILVA FILHO, VALE SILVA y DAL BOSCO, 2012), (Norma UNE 36.068:94), (Diseño de Estructuras de Concreto - Teodoro Harmsen), (Manual ADELCA), (Manual NOVACERO).

Las figuras 3.11 hasta la figura 3.14 muestran las varillas de 14mm, 22mm y 32mm y lisa que se realizaron en este estudio.

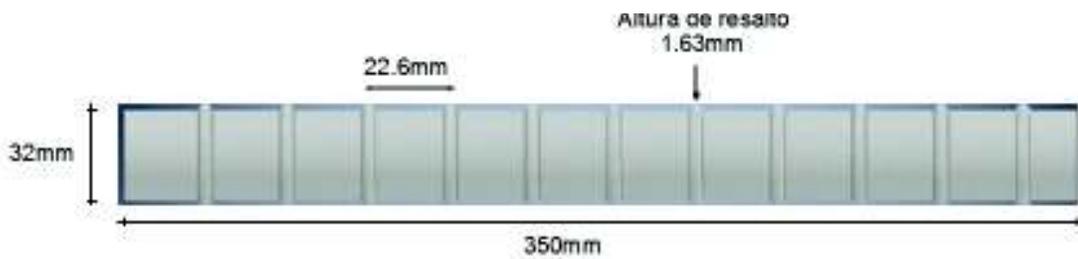
FIGURA 3.11: VARILLA CORRUGADA DE 14MM.



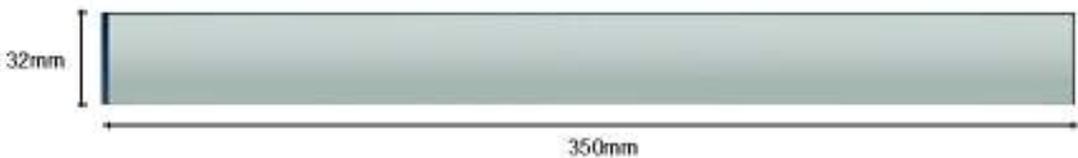
ELABORACIÓN: Arana, 2018.

FIGURA 3.12: VARILLA CORRUGADA DE 22MM

ELABORACIÓN: Arana, 2018.

FIGURA 3.13: VARILLA CORRUGADA DE 32MM

ELABORACIÓN: Arana, 2018.

FIGURA 3.14: VARILLA LISA DE 32MM

ELABORACIÓN: Arana, 2018.

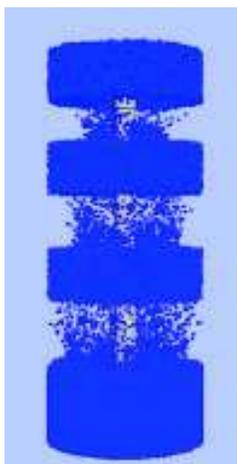
3.3.2 VOLUMEN DE CONTROL DE LA MATRIZ CEMENTANTE

La matriz cementante se modeló con partículas esféricas caracterizadas de acuerdo a la tabla 3.1. Estas partículas conforman la matriz cementante que para este modelo su ensamble describe una forma cilíndrica que hace referencia a una probeta de hormigón. Estas probetas tienen por dimensión: 15 cm de diámetro y

30 cm de alto lo cual cumple con la condición para ensayos pull-out según la ASTM.

La figura 3.15 muestra como las partículas de la matriz cementante se vierten y distribuyen.

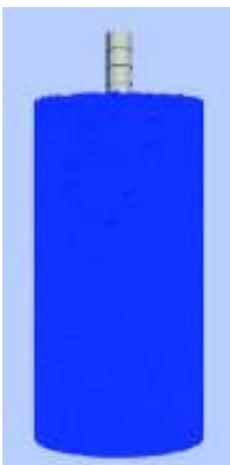
FIGURA 3.15: LLENADO DE PROBETA DE HORMIGÓN, 40% DEL TOTAL DE STEPS.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

La figura 3.16 muestra la probeta completamente llena de partículas.

FIGURA 3.16: LLENADO DE PROBETA DE HORMIGÓN, 100% DEL TOTAL DE STEPS.

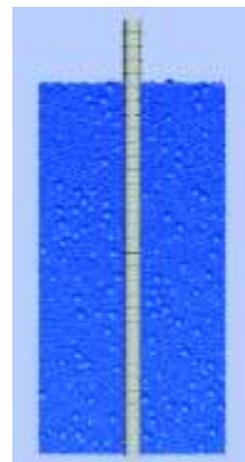
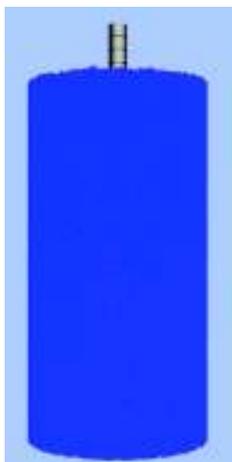


ELABORACIÓN: Arana, 2018.

El mismo proceso se realiza con las 4 varillas que serán de utilidad para esta investigación.

Las figuras 3.17 hasta la figura 3.20 muestran la probeta correspondiente para cada varilla a analizar.

FIGURA 3.17: PROBETA DE HORMIGÓN CON VARILLA DE 14MM CENTRADA CON 177739 PARTÍCULAS DE LA MATRIZ CEMENTANTE.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

FIGURA 3.18: PROBETA DE HORMIGÓN CON VARILLA DE 22MM CENTRADA CON 175204 PARTÍCULAS DE LA MATRIZ CEMENTANTE.



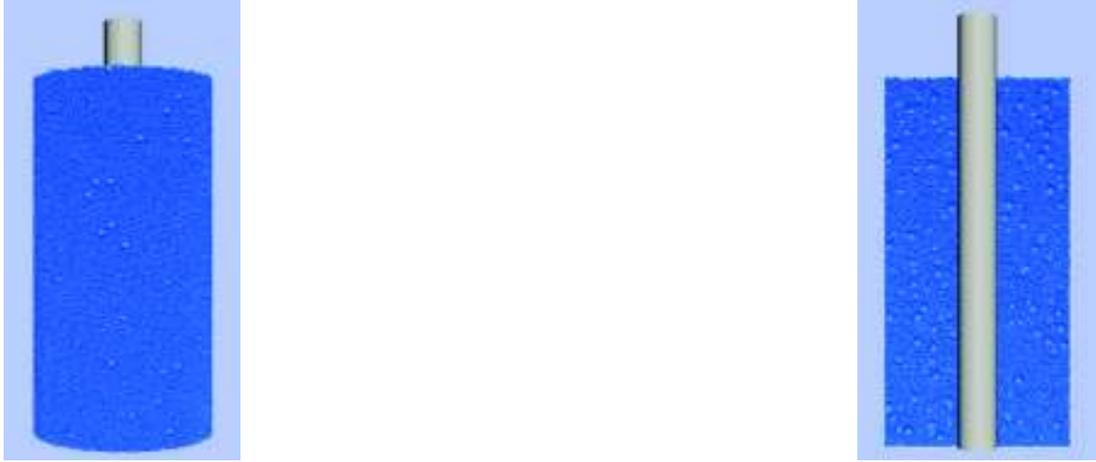
ELABORACIÓN: Arana, 2018.

FIGURA 3.19: PROBETA DE HORMIGÓN CON VARILLA DE 32MM CENTRADA CON 172087 PARTÍCULAS DE LA MATRIZ CEMENTANTE.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

FIGURA 3.20: PROBETA DE HORMIGÓN CON VARILLA LISA DE 32MM CENTRADA CON 175937 PARTÍCULAS DE LA MATRIZ CEMENTANTE.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

3.4 ASPECTOS NUMÉRICOS DEL MODELAMIENTO COMPUTACIONAL

3.4.1 INCREMENTO DE TIEMPO

Un time-step es un incremento de la variable tiempo que permite la liberalización numérica en el proceso de solución de las EDO. Su cálculo es de fundamental importancia debido a que de él depende que las partículas simulen el debido comportamiento que se requiere (Yavuzturk & Spitler, 1999).

Existen dos métodos para calcular el incremento de la variable tiempo para el modelamiento que implementa la tecnología DEM:

1. Energía de transferencia de Rayleigh.
2. Teoría de contacto de Hertz.

Para seleccionar un incremento de tiempo adecuado, debe considerarse (Kloss, 2010):

1. Con un time-step muy grande, la velocidad de transferencia energía en el modelo es incorrecta.

2. El traslape entre partículas representa la energía almacenada durante la deformación de la partícula.

3.4.1.1 Incremento de la variable tiempo debido a la transferencia de energía

Rayleigh

Las ondas de Rayleigh, son ondas de superficie donde las partículas se desplazan describiendo una elipse en el plano vertical que contiene la dirección de propagación de la onda. En un medio granular, las perturbaciones se propagan en ondas de Rayleigh produciendo de esta manera la transferencia de energía de Rayleigh (Xia, Miller, & Park, 1999) que se expresa con la ecuación 3.1:

$$T_R = \pi R \frac{\sqrt{(\rho/G)}}{(0.1632\nu + 0.8766)} \quad \text{ecuación 3.1}$$

Donde:

R es el radio de la partícula, ρ es la densidad, ν la relación de Poisson y G el módulo de corte.

El valor del time step debe estar en el rango mostrado en la ecuación 3.2:

$$\Delta t = (0.1T_R - 0.4T_R) \quad \text{ecuación 3.2}$$

3.4.1.2 Incremento de la variable tiempo debido a la teoría de contacto de Hertz

El tiempo que dura el contacto entre las partículas se define de acuerdo a la teoría de contacto de Hertz. El concepto toma en cuenta la velocidad relativa entre las partículas, masa, relación de Poisson y módulo de elasticidad (Kloss, 2010). El tiempo de contacto de Hertz se define en la ecuación 3.3.

$$T_{ch} = 2.87 \left(\frac{m^*}{R^* E^* v_{max}} \right) \quad \text{ecuación 3.3}$$

Donde:

m^* es la masa efectiva, R^* es el radio efectivo, E^* es el módulo de elasticidad efectivo y v_{max} es la velocidad relativa máxima.

3.4.2 CÁLCULO DEL TIME-STEP

Para calcular el time-step se hace uso de los datos listados en la tabla 3.9

TABLA 3.9: PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MATRIZ CEMENTANTE NECESARIAS PARA EL CÁLCULO DE TIME STEP.

R (mm) = Radio	1.5
ν = Relación de Poisson	0.2
E (GPa) = Módulo de Elasticidad	21
G (GPa) = Módulo de Corte	8.75

FUENTE: (ACI 318 capítulo 8.5), (Apartado 363-92 del ACI), (Manual de diseño de Portland Cement Association (PCA) apéndice A).

Aplicando la ecuación 3.1 tenemos:

$$T_R = \pi * 0.0015 * \frac{\sqrt{(2400/8.75E09)}}{(0.1632 * 0.2 + 0.8766)}$$

$$T_R = 2.7144E - 06$$

$$\Delta t < (0.4 * 2.7144E - 06)$$

$$\Delta t < (1.08576E - 06)$$

Por lo tanto el valor del time step que se utilizara en el modelamiento computacional de este trabajo es 1×10^{-6} segundos.

3.5 CONDICIONES DE FRONTERA

3.5.1 VELOCIDAD DE ENSAYO PULL-OUT

Una limitación del programa LIGGGHTS es que no se puede aplicar fuerza a las partículas o para el caso de esta investigación, al mallado (i.e. varilla de acero), por esta razón se optó por aplicar una velocidad al mallado que represente la fuerza de tracción aplicada en un ensayo pull-out.

Un estudio realizado en la Universidad Politécnica de Madrid acerca del comportamiento de estructuras de hormigón armado mediante transferencia de tensiones hormigón-acero, realiza múltiples ensayos pull-out normalizados por la RILEM/CEB/FIP, de los cuales destacamos para nuestro estudio, aquellos ensayos en los cuales la varilla de acero está centrada en la probeta de hormigón.

En la siguiente tabla 3.10 se muestran los resultados de los ensayos pull-out.

TABLA 3.10: RESULTADOS DE ENSAYO PULL-OUT PARA VARILLA DE 12MM, 16MM Y 20MM.

Diámetro (mm)	Velocidad de carga (N/s)	Esfuerzo de Tensión (Mpa)	Longitud de adherencia (mm)	Área embebida (mm ²)
12	72	18.55	60	2260
16	128	13.85	80	4020
20	200	20.44	100	6280

FUENTE: (Molina Marta, 2005).

De estos resultados podemos calcular la velocidad equivalente a la fuerza de tensión aplicada a la varilla; se calcula el tiempo que la varilla se demora en tener el deslizamiento indicado según su velocidad de carga así como también la fuerza de tensión aplicada mediante la definición de esfuerzo de tensión (i.e. fuerza de tensión aplicada en el área embebida de la varilla), los resultados se muestran en la tabla 3.11.

TABLA 3.11: VELOCIDAD DE EXTRACCIÓN DE VARILLA EN ENSAYO PULL OUT.

Diámetro (mm)	Fuerza de Tensión (KN)	Deslizamiento (mm)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)
12	41.98	1.03	583.06	1.76656E-06
16	55.73	0.57	435.39	1.30917E-06
20	128.46	0.74	642.30	1.15211E-06

FUENTE: (Molina Marta, 2005).

Otro estudio realizado en la Universidad Central de Venezuela acerca de la adherencia entre barras de acero corrugado y cemento, realiza ensayos pull-out según la norma COVENIN 1667-80.

En la tabla 3.12 se muestran los resultados de los ensayos pull-out de la investigación antes mencionada.

TABLA 3.12: RESULTADOS DE ENSAYO PULL OUT CON VARILLAS DE 3/8" Y 1/2".

Diámetro (pulgada)	Velocidad de carga (KN/s)	Esfuerzo de Tensión (Mpa)	Longitud de adherencia (mm)	Área (mm ²)
3/8	0.3675	69.06	143	4280
1/2	0.3675	58.05	190	5710

FUENTE: (Guédez Yan y Pita Eugenio, 2005).

De estos resultados podemos calcular la velocidad equivalente a la fuerza de tensión aplicada a la varilla, los resultados se muestran en la tabla 3.13.

TABLA 3.13: VELOCIDAD DE EXTRACCIÓN DE VARILLA EN ENSAYO PULL-OUT.

Diámetro (pulgada)	Fuerza de Tensión (KN)	Deslizamiento (mm)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)
3/8	295.51	1.65	804.12	2.05E-06
1/2	331.20	0.25	901.23	2.77E-07

FUENTE: (Guédez Yan y Pita Eugenio, 2005).

Las velocidades mostradas en la tabla 3.11 y la tabla 3.13 muestran tendencias en el orden de 10^{-6} . Por lo tanto, en el modelo computacional se tomará una velocidad de 1×10^{-6} m/s como velocidad equivalente a la fuerza de tracción que se aplica a una varilla en un ensayo de extracción pull-out. Con este valor de la velocidad de extracción de varilla y con todos los datos recolectados, se realizó el script del anexo H que es con el cual se hizo la simulación para lograr los objetivos de esta investigación.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas en el programa LIGGGHTS la cual implementa la tecnología DEM

Se estudia las fuerzas de contacto y el comportamiento de las partículas que componen la matriz cementante y que interactúan con la varilla en movimiento sometida a una velocidad de extracción equivalente a una fuerza de tensión de ensayo pull-out quasi-estático.

Las variables que se toman en cuenta en este análisis son:

1. Diámetro de varilla
2. Relación de aspecto con respecto al corrugado de las varillas

Se debe tomar en cuenta que los resultados son mostrados desde una perspectiva cualitativa. Las propiedades físicas y mecánicas de los materiales (i.e. matriz cementante y varilla de acero) así como su modelamiento se muestran en el capítulo 3.

4.2 VARIABLES NUMÉRICAS DEL MODELO

El time-step utilizado en el modelo discreto del problema de adherencia entre matriz y varilla fue 0.000001 s, en base a cálculos expuestos en el capítulo 3.

El tiempo de simulación y por tanto en el que se generó análisis de resultados está caracterizado por 5000000 de time-steps lo que permite representar el fenómeno por un tiempo de 5 segundos y esto en función de la velocidad de 0.000001 m/s equivale a un desplazamiento de 0.005 mm de la varilla en el tiempo de simulación.

4.3 ALTURA DE VARILLA

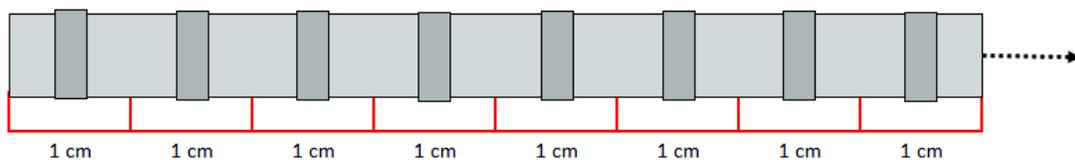
Las varillas se analizarán en una longitud de 30 centímetros, que es la longitud embebida en la probeta de hormigón de 30 centímetros de alto como se describe en la sección 3.3.

4.3.1 ANÁLISIS EN EL EJE LONGITUDINAL

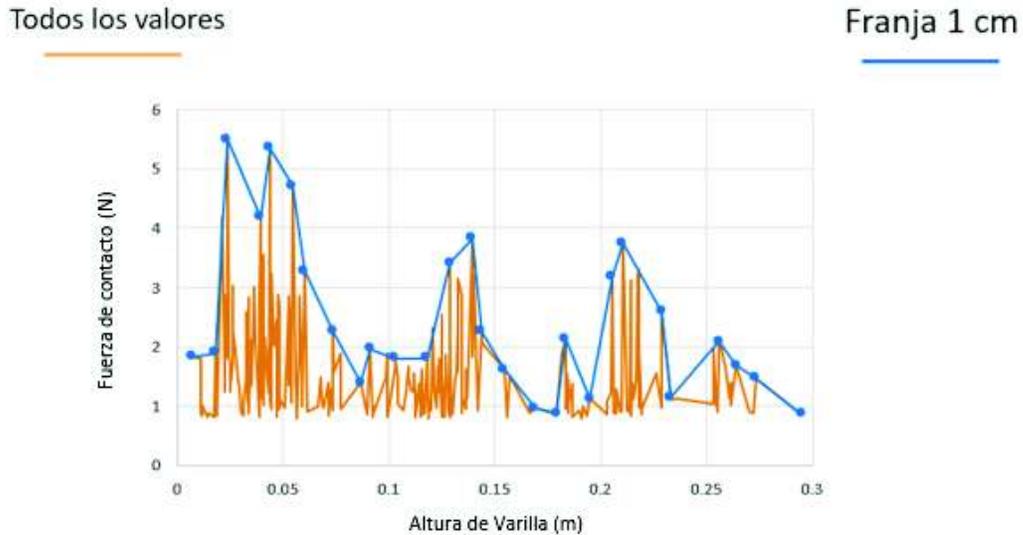
El análisis en el eje longitudinal se hace en franjas de 1 cm en toda la longitud de la varilla, es decir 30 centímetros tal como se muestra en la figura 4.1.

La figura 4.2. muestra valores de fuerza de contacto máximas para cada franja en que se dividió el eje longitudinal.

FIGURA 4.1: FRANJA DE 1 CENTÍMETRO EN TODA LA LONGITUD DE LA VARILLA.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

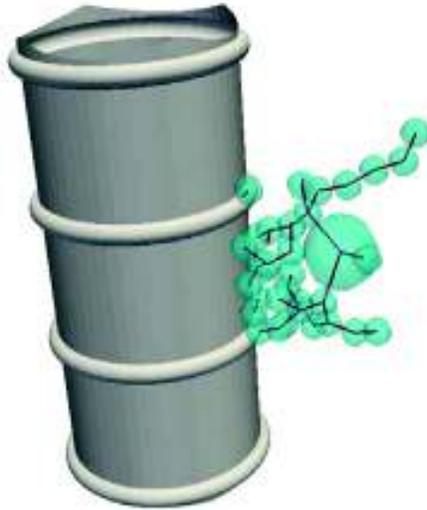
FIGURA 4.2: TENDENCIA DE CURVA EN SELECCIÓN DE DATOS.

ELABORACIÓN: Arana, 2018.

4.4 FUERZA DE CONTACTO

La superficie de la varilla interactúa con las partículas de la matriz cementante circundante cuando ésta se desliza ocasionando que entre dichas partículas se generen las fuerzas de contacto. El efecto de acuñamiento en los resaltos hace que las fuerzas de contacto ocasionadas por el deslizamiento de la varilla se transmiten entre las partículas de la matriz cementante generando las cadenas de fuerzas, así como se indica en la figura 4.3.

FIGURA 4.3: CADENA DE FUERZAS EN MATRIZ CEMENTANTE.

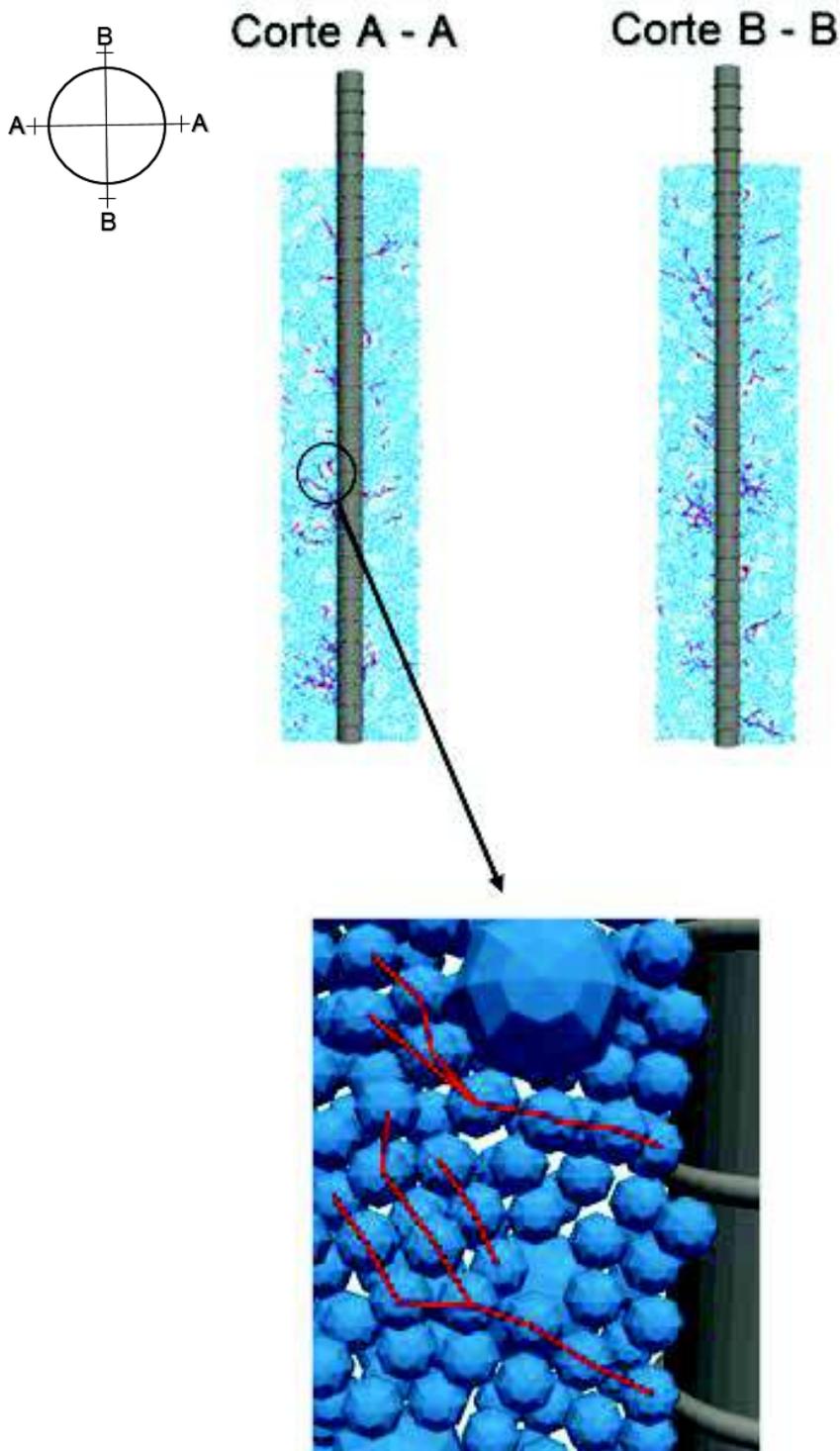


ELABORACIÓN: Arana, 2018.

La figura 4.3 muestra cadenas de fuerzas constituidas por fuerzas de contacto entre las partículas de la matriz cementante.

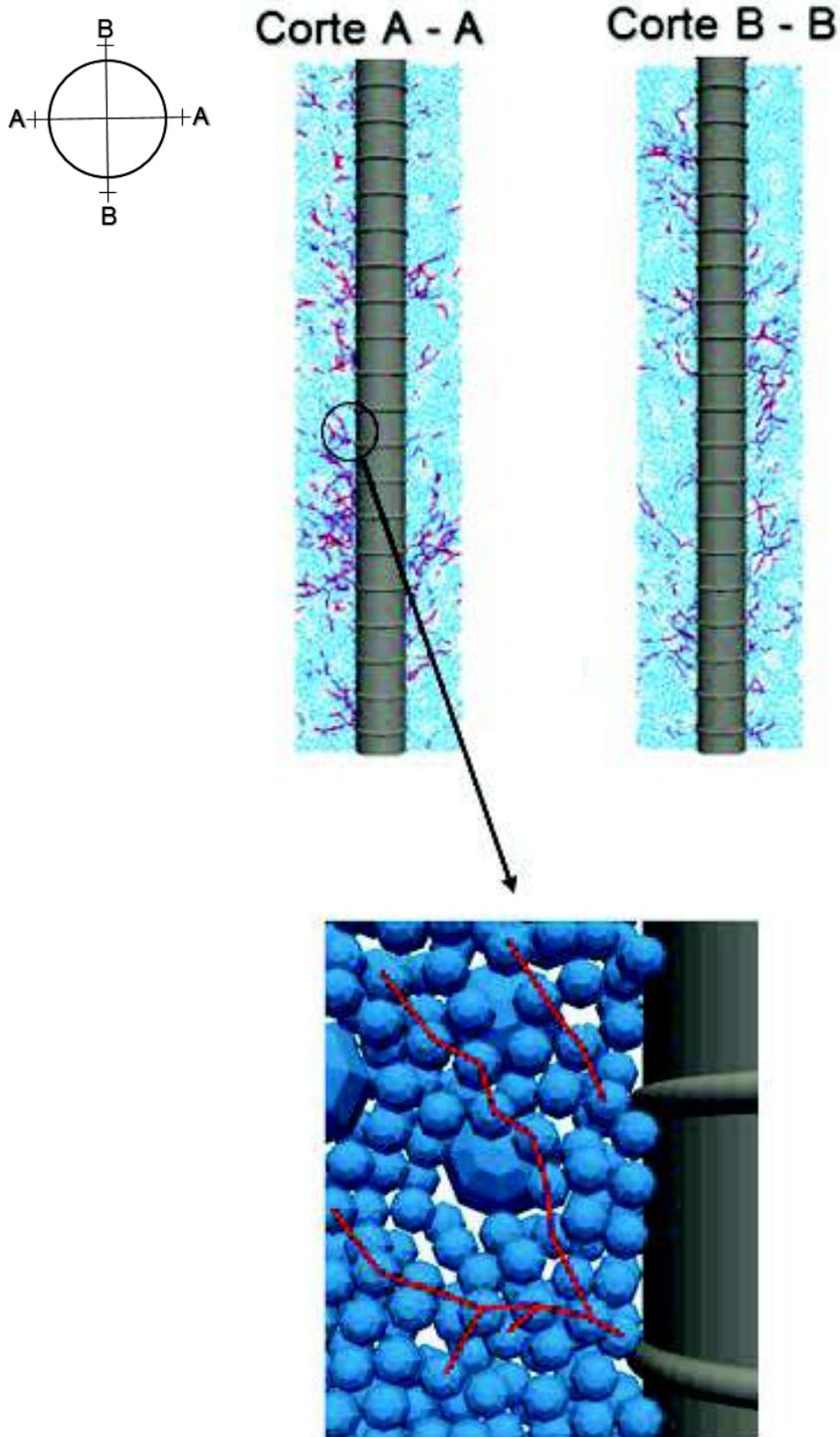
Las figuras 4.4 hasta 4.7 muestran una representación gráfica de las cadenas de fuerza generadas entre partículas cohesionadas y utilizadas para representar a la matriz cementante. Las figuras muestran resultados de los experimentos numérico-computacionales generados para diferentes diámetros de varilla de refuerzo (i.e. 14mm, 22mm, 32mm, y varilla lisa)

FIGURA 4.4: CADENA DE FUERZAS EN VARILLA DE 14MM EN EJE X Y EJE Y RESPECTIVAMENTE.



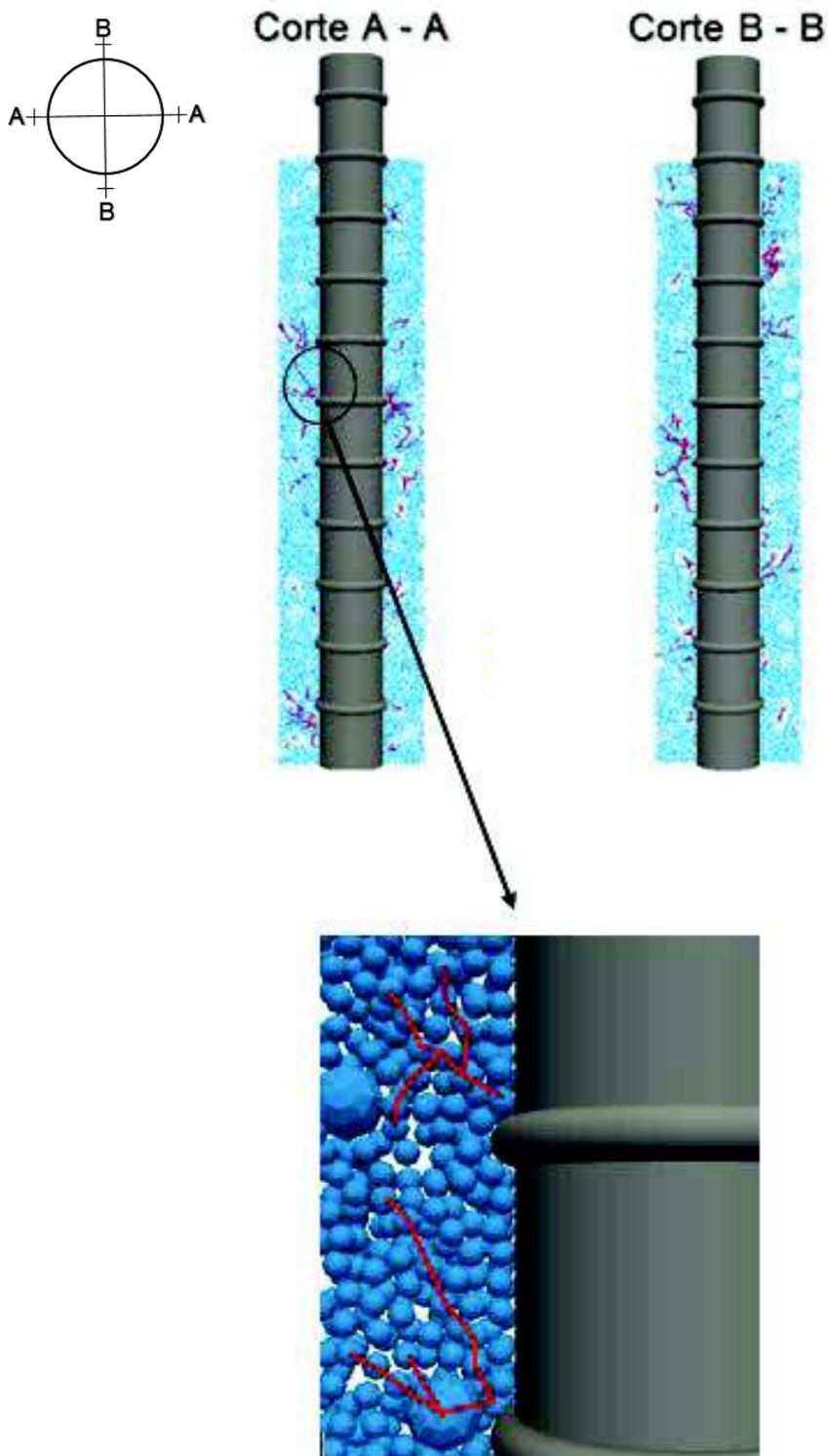
ELABORACIÓN: Arana, 2018.

FIGURA 4.5: CADENA DE FUERZAS EN VARILLA DE 22MM EN EJE X Y EJE Y RESPECTIVAMENTE.



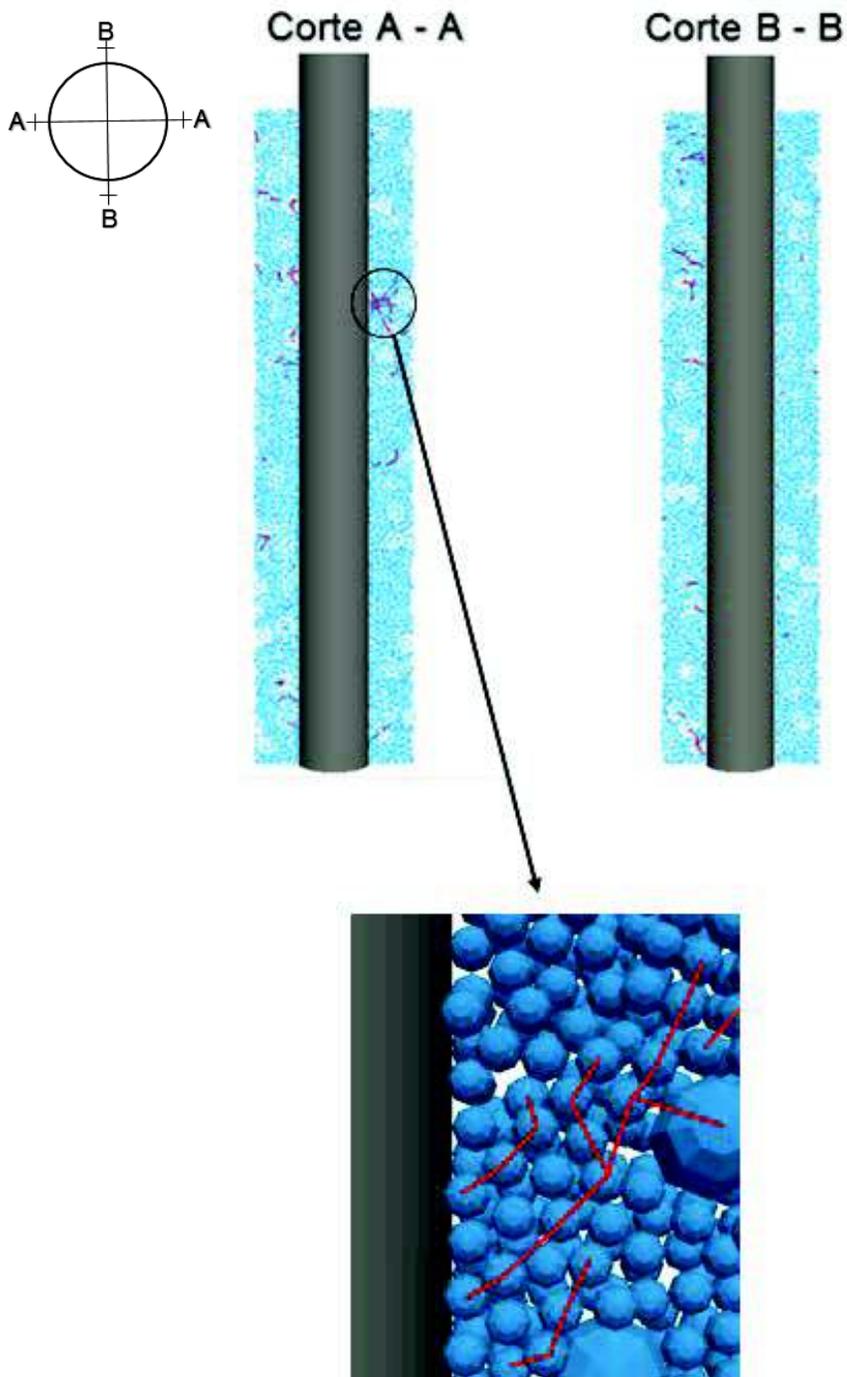
ELABORACIÓN: Arana, 2018.

FIGURA 4.6: CADENA DE FUERZAS EN VARILLA DE 32MM EN EJE X Y EJE Y RESPECTIVAMENTE.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

FIGURA 4.7: CADENA DE FUERZAS EN VARILLA LISA EN EJE X Y EJE Y RESPECTIVAMENTE.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

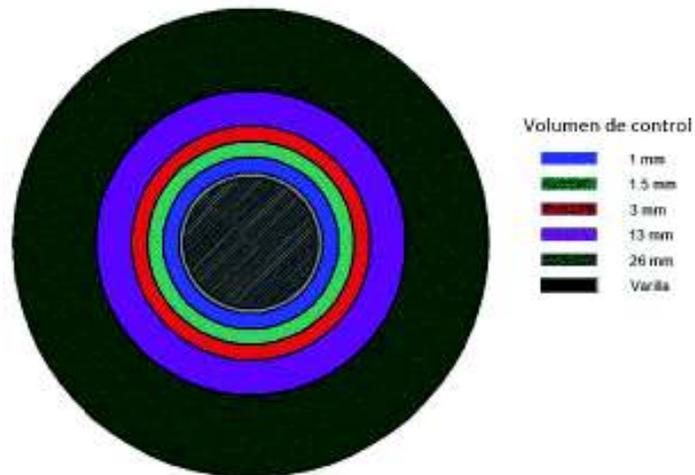
Las figuras evidencian la interacción de los resaltes de las varillas con la matriz cementante. Esto se puede concluir al observar que las cadenas de fuerza de manera predominante tienen su inicio precisamente en los resaltes de la varilla que son responsables de un mecanismo de acuíñamiento con la matriz.

La varilla lisa, por el contrario, muestra una menor incidencia de cadenas de fuerza como consecuencia de la falta de resaltes y por tanto del efecto mecánico que éstos generan a favor de la interacción entre estas dos componentes del hormigón armado.

4.5 VOLUMEN DE CONTROL

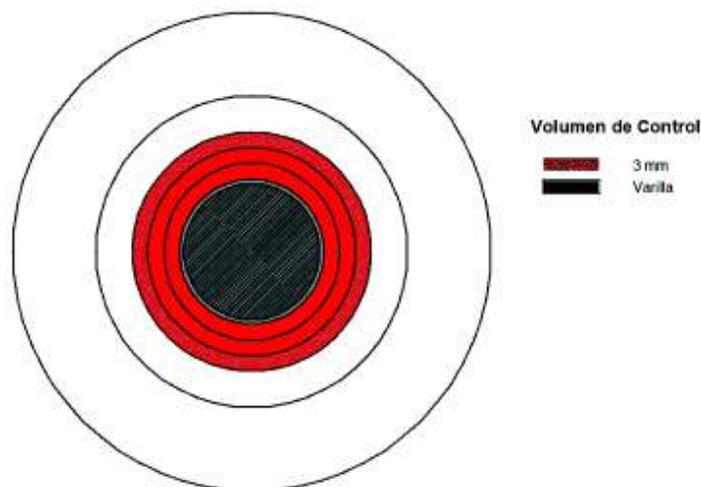
El volumen de control es relevante en el análisis de los resultados. Es una parte de la matriz cementante que se desea analizar evitando datos innecesarios que desvíen el propósito de este estudio.

Para un correcto análisis de resultados se plantearon 5 volúmenes de control inicialmente (i.e. 1mm de diámetro, 1.5mm de diámetro, 3mm de diámetro, 13mm de diámetro y 26mm de diámetro) describiendo un cilindro alrededor de la varilla cada vez de mayor diámetro que el anterior como se puede apreciar en la figura 4.8, de los cuales se eligió solo uno bajo criterios correctos.

FIGURA 4.8: VOLUMEN DE CONTROL.

ELABORACIÓN: Arana, 2018.

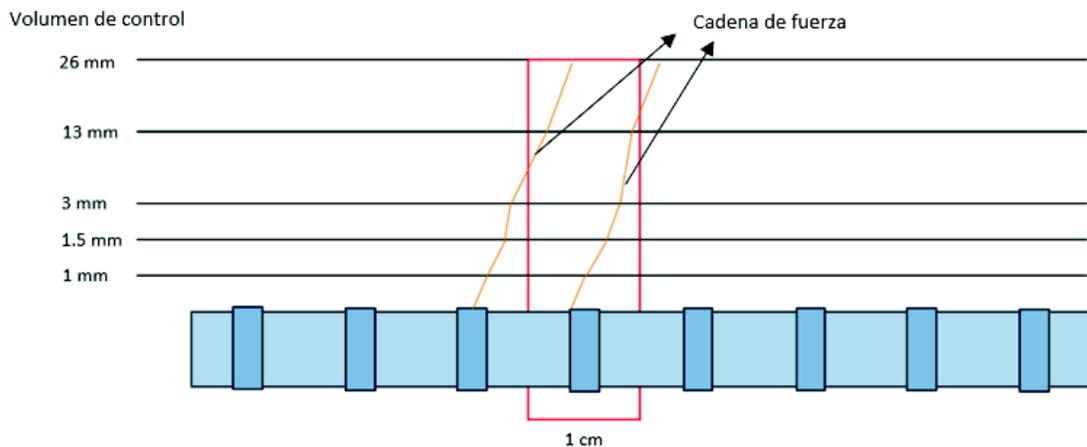
En la figura 4.8 se observa los 5 volúmenes de control planteados. Cabe resaltar que cada volumen de control contiene al anterior. La figura 4.9 muestra claramente el volumen de control como se lo describe.

FIGURA 4.9: VOLUMEN DE CONTROL DE 3MM DE DIÁMETRO ALREDEDOR DE LA VARILLA.

ELABORACIÓN: Arana, 2018.

Si observamos la varilla en el eje longitudinal se observa que las cadenas de fuerza se muestran de una manera no uniforme en las partículas de la matriz cementante que interactúan con la varilla en movimiento como se muestra en la figura 4.10.

FIGURA 4.10: VOLUMEN DE CONTROL EN EJE LONGITUDINAL.

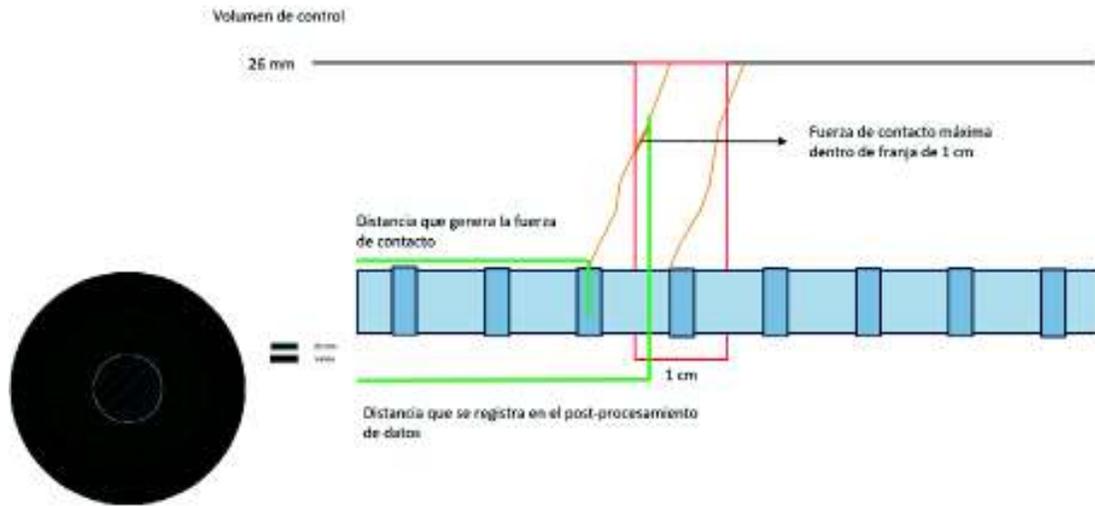


ELABORACIÓN: Arana, 2018.

Los datos registrados pertenecen a la fuerza de contacto de las partículas de la matriz cementante cuya cadena de fuerza generada se encuentra dentro del volumen de control a analizar y dentro de cada franja de 1 centímetro. En este contexto se puede decir que las fuerzas de contacto registradas en un volumen de control son iguales o mayor que el volumen de control anterior.

Debido a que las cadenas de fuerzas no son perpendiculares a la varilla se presenta un problema cuando el volumen de control es de gran diámetro puesto que la fuerza de contacto que se registra en la franja de 1 centímetro no equivale a la altura de la varilla correspondiente así como se muestra en la figura 4.11. La zona de contacto de la varilla que genera dicha fuerza de contacto es otra.

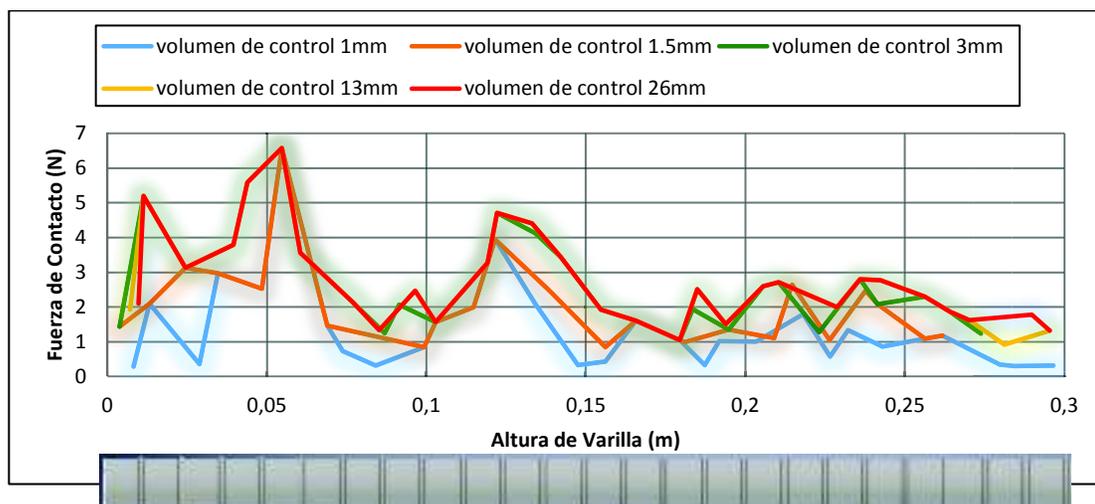
FIGURA 4.11: FUERZA DE CONTACTO REGISTRADA EN VOLUMEN DE CONTROL.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

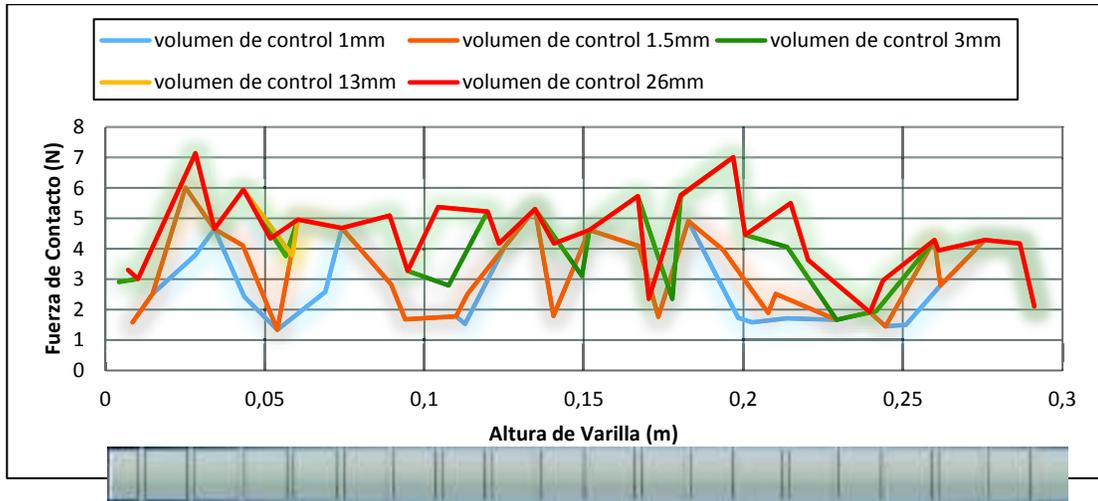
Los resultados obtenidos fueron de la varilla de 14mm, 22mm y 32mm en un volumen de control de 1mm, 1.5mm, 3mm, 13mm y 26mm de diámetro para cada varilla. Los gráficos se muestran a continuación.

FIGURA 4.12: COMPARACIÓN DE FUERZAS DE CONTACTO SEGÚN VOLUMEN DE CONTROL EN VARILLA DE 14MM.



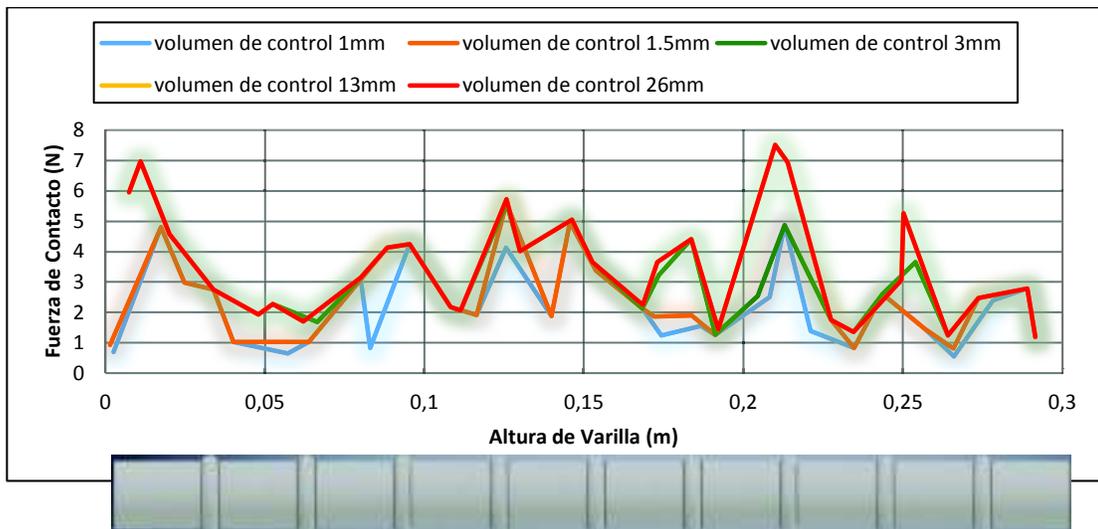
ELABORACIÓN: Arana, 2018.

FIGURA 4.13: COMPARACIÓN DE FUERZAS DE CONTACTO SEGÚN VOLUMEN DE CONTROL EN VARILLA DE 22MM.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

FIGURA 4.14: COMPARACIÓN DE FUERZAS DE CONTACTO SEGÚN VOLUMEN DE CONTROL EN VARILLA DE 32MM.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

En las figura 4.12 hasta la figura 4.14 las fuerzas de contacto registradas en un volumen de control siempre son iguales o mayores que el volumen de control anterior.

El volumen de control que describe un cilindro de diámetro de 1.5mm alrededor de la varilla es el que se eligió para estudiar el fenómeno de adherencia en este estudio bajo los siguientes criterios: (1) el volumen de control mientras sea más grande registrará datos equívocos, (2) las partículas de la matriz cementante tienen un diámetro de 3mm y (3) las fuerzas de contacto registradas en un volumen de control siempre son iguales o mayores que el volumen de control anterior.

4.6 RELACIÓN DE ASPECTO

La relación existente entre la altura del resalto (a) y distancia entre resaltos (c) es importante debido a que ésta garantiza la adhesión mecánica que se presenta por el acañamiento en las varillas corrugadas. El rango establecido por Rehm (1969) indica que una relación optima es $0,062 < a/c < 0,1$.

TABLA 4.1: RELACIÓN DE ASPECTO A/C DE VARILLAS CORRUGADAS.

Diámetro de varilla (mm)	Altura de resalto "a" (mm)	Distancia entre resaltos "c" (mm)	a/c
14	0.61	9.4	0.06489
22	1.12	15.5	0.07226
32	1.63	22.6	0.07212

ELABORACIÓN: Arana, 2018.

La tabla 4.1 muestra la relación a/c de las varillas corrugadas utilizadas para este estudio.

4.7 LONGITUD DE DESARROLLO

La longitud de desarrollo es la longitud embebida en concreto necesaria para que la varilla desarrolle toda la resistencia a tensión controlada por adherencia. El ACI 318-05 dice que la tracción calculada en el refuerzo de cada sección de elementos de concreto estructural debe ser desarrollada hacia cada lado de dicha sección mediante una longitud embebida en el concreto, gancho o dispositivo mecánico, o una combinación de ellos, para el cálculo de dicha longitud de desarrollo el ACI sugiere la siguiente ecuación 4.1:

$$l_d = \left[\frac{9}{10} \frac{\psi_t \psi_e \psi_s \lambda}{\sqrt{f'_c} \left(\frac{C_b + K_{tr}}{d_b} \right)} \right] d_b \quad \text{ecuación 4.1}$$

Donde f_y es el esfuerzo a fluencia de la varilla, ψ_t es el factor de ubicación de refuerzo que para este caso es 1, ψ_e es el factor de revestimiento epóxico que para este caso es 1, ψ_s es el factor por tamaño de refuerzo, para varillas 19 o menores es 0.8 para otras varillas es 1, λ es el factor que refleja el peso del concreto para este caso el factor es 1 que corresponde a concreto de peso normal, f'_c es el esfuerzo a compresión del concreto, K_{tr} se sugiere que sea cero para simplificación de diseño, C_b es la menor de (a) la distancia medida del centro de una barra o alambre a la superficie más cercana del concreto o (b) la mitad de la separación centro a centro de las barras o alambres que se desarrollan y d_b es el diámetro de la varilla. Hay que tomar en cuenta que el código sugiere que l_d no sea menor a 30 centímetros.

Aplicando la ecuación 4.1 para cada caso de este estudio se tiene la siguiente tabla 4.2.

TABLA 4.2: LONGITUD DE DESARROLLO SEGÚN ACI.

Diámetro de Varilla (mm)	Ld	Ld (mm)
14	16 \emptyset	224 – 300
22	24 \emptyset	528
32	33 \emptyset	1050

ELABORACIÓN: Arana, 2018.

También existen otros códigos como el COVENIN 1753 y textos como el de Baus (1965) quien realizó múltiples ensayos para aceros con distintos esfuerzos de fluencia y con diferentes longitudes de anclaje, definiendo de esta manera las expresiones que miden las longitudes prácticas de desarrollo en función de la resistencia del concreto y de las longitudes de anclajes experimentales. De estos textos se tiene la siguiente tabla 4.3 con longitudes de desarrollo para cada varilla.

TABLA 4.3: LONGITUD DE DESARROLLO SEGÚN BAUS Y NORMA COVENIN.

Diámetro (pulgadas)	Diámetro (mm)	Baus	COVENIN
3/8"	9.5	20 \emptyset	26 \emptyset
1/2"	12.7	20 \emptyset	26 \emptyset
5/8"	15.8	20 \emptyset	26 \emptyset
3/4"	19.05	20 \emptyset	26 \emptyset
1"	25.4	20 \emptyset	32 \emptyset

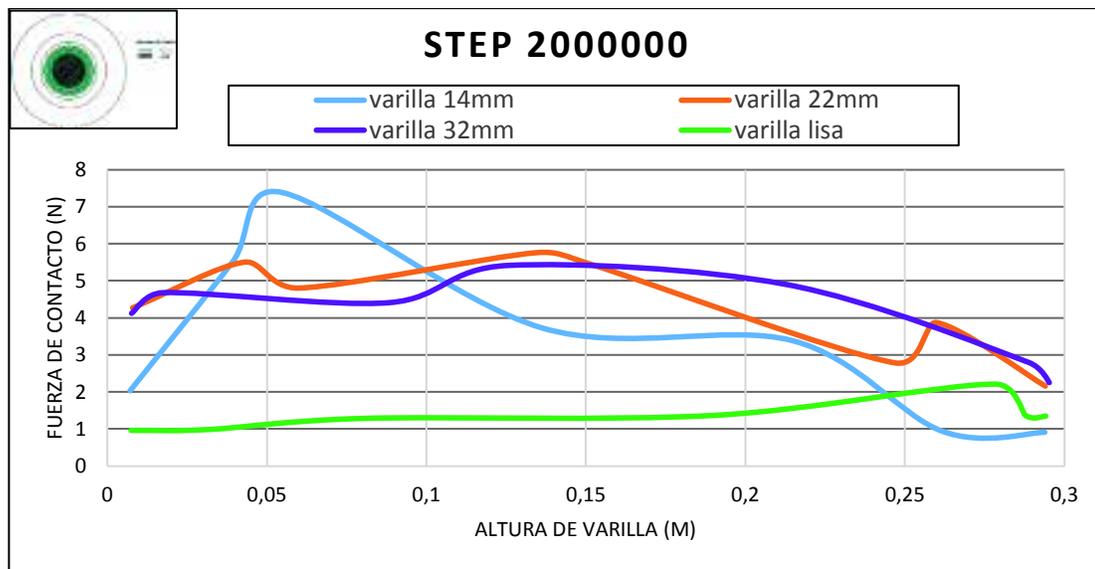
ELABORACIÓN: Arana, 2018.

De las tablas 4.2 y 4.3 podemos observar que en este estudio solo la varilla de 14mm tiene la longitud de desarrollo sugerida.

4.8 FUERZAS DE CONTACTO EN FUNCION DEL DIÁMETRO DE VARILLA

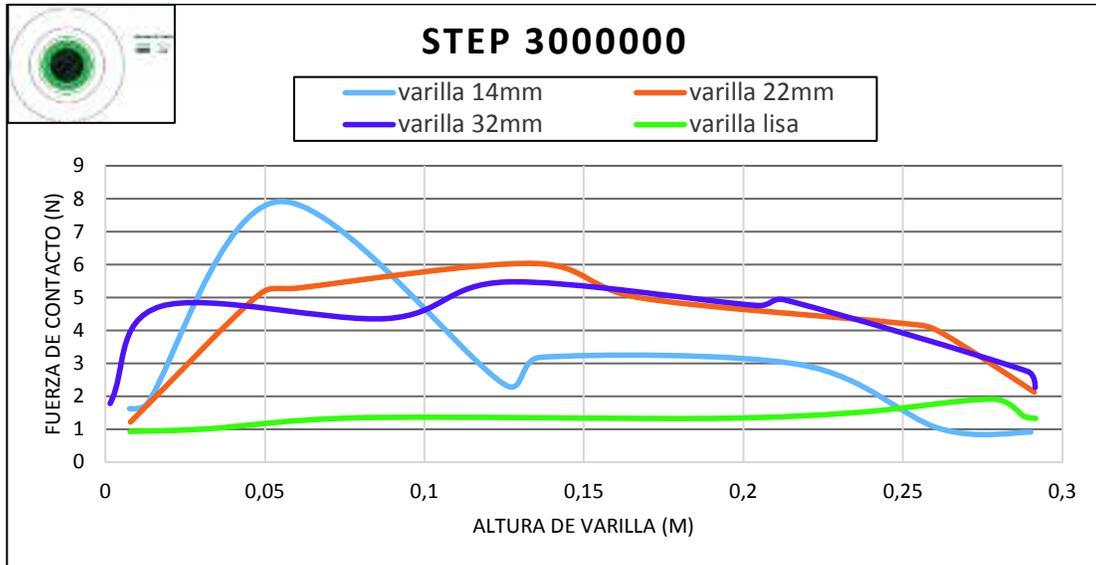
Para comparar los resultados obtenidos de la varilla de 14mm, 22mm, 32mm y varilla lisa se realizaron gráficos en los cuales se muestran las líneas de tendencia de la fuerza de contacto máxima registrada en cada franja de 1 centímetro de altura para cada varilla a través de los time-step correspondientes en un volumen de control de 1.5mm. Las figuras se muestran a continuación.

FIGURA 4.15: FUERZA DE CONTACTO ENTRE PARTÍCULAS DE MATRIZ CEMENTANTE EN EXTRACCIÓN DE VARILLA, VOLUMEN DE CONTROL 1.5MM EN STEP 2000000 (2SG DE SIMULACIÓN).



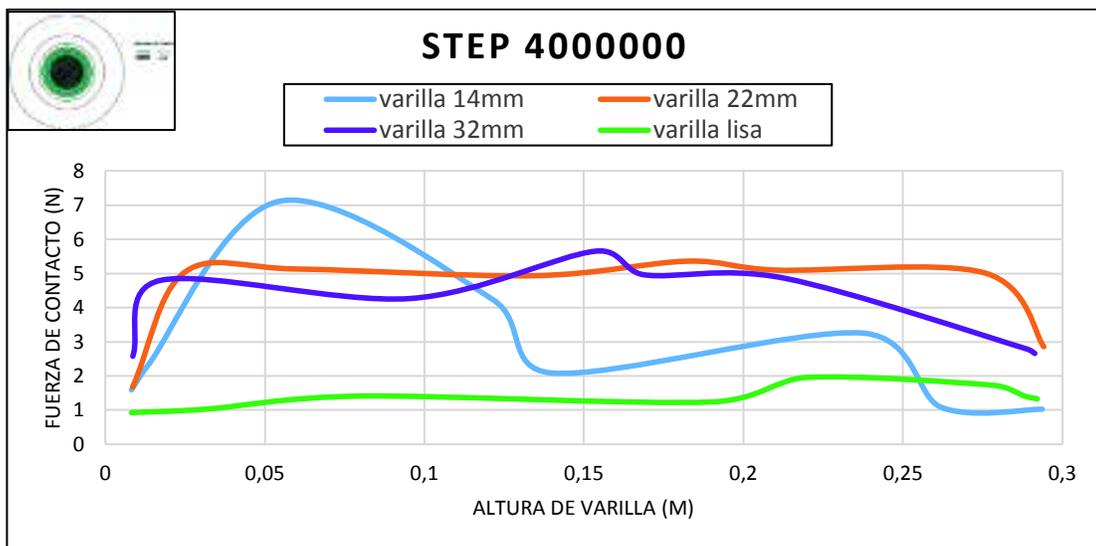
ELABORACIÓN: Arana, 2018.

FIGURA 4.16: FUERZA DE CONTACTO ENTRE PARTÍCULAS DE MATRIZ CEMENTANTE EN EXTRACCIÓN DE VARILLA, VOLUMEN DE CONTROL 1.5MM EN STEP 3000000 (3SG DE SIMULACIÓN).



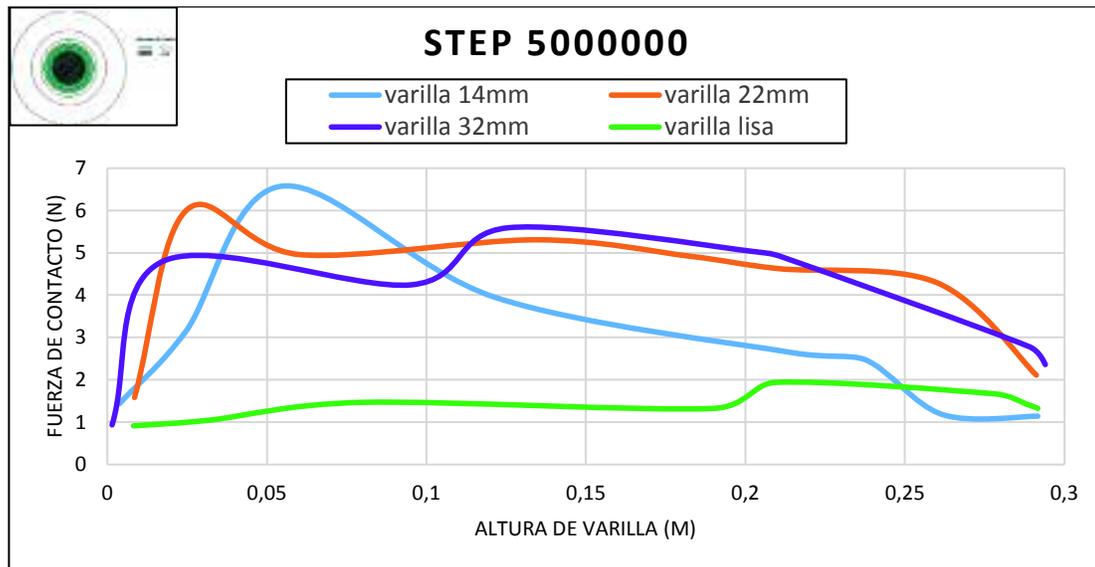
ELABORACIÓN: Arana, 2018.

FIGURA 4.17: FUERZA DE CONTACTO ENTRE PARTÍCULAS DE MATRIZ CEMENTANTE EN EXTRACCIÓN DE VARILLA, VOLUMEN DE CONTROL 1.5MM EN STEP 4000000 (4SG DE SIMULACIÓN).



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

FIGURA 4.18: FUERZA DE CONTACTO ENTRE PARTÍCULAS DE MATRIZ CEMENTANTE EN EXTRACCIÓN DE VARILLA, VOLUMEN DE CONTROL 1.5MM EN STEP 5000000 (5SG DE SIMULACIÓN).



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

En la figura 4.15 hasta la figura 4.18 Las fuerzas de contacto son las que se presentan entre las partículas de la matriz cementante que interactúan con la varilla desde su base hasta los 30 centímetros de altura cuando ésta se somete a la extracción (la discusión de estos resultados se muestran en la sección 4.9.2 y 4.9.3).

4.9 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.9.1 VARIACIÓN DE CURVA EN EL TIEMPO DE SIMULACIÓN

En todas las varillas que se analizaron para este estudio podemos observar que existe una redistribución de fuerzas en la matriz cementante debido al deslizamiento de la varilla (González, 1990) debido a que la varilla siempre está en movimiento como se explicó en el capítulo 2. Las partículas de la matriz cementante se mueven conjuntamente con la varilla ocasionando una reubicación

de dichas partículas e interactuando con una superficie de la varilla diferente que en el time-step anterior. Las partículas de la matriz cementante van agotando sus propiedades mecánicas debido a la extracción de la varilla hasta que se observa una estabilidad en las curvas.

4.9.2 FUERZA DE CONTACTO EN MATRIZ CEMENTANTE

4.9.2.1 Varilla lisa

La varilla lisa en comparación con las otras varillas no muestra valores significativos debido a la ausencia de los resaltos que impiden de mejor manera el deslizamiento de la varilla. La adhesión química se hace presente para este caso.

4.9.2.2 Varilla 14mm

En la varilla de 14mm las partículas de la matriz cementante presentan fuerzas de contacto altas entre los 5 centímetros y 10 centímetros de altura de la varilla, luego de esto se observa que la curva decrece hasta la altura de 30 centímetros. Las partículas de la matriz cementante tienen un comportamiento habitual como el del esfuerzo de adherencia a lo largo de una varilla.

4.9.2.3 Varillas 22mm y 32mm

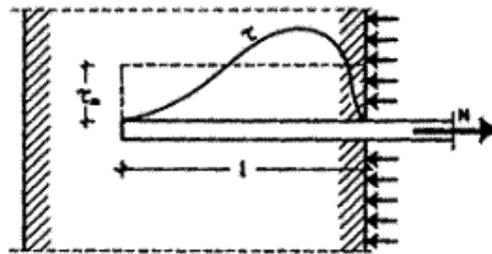
Las fuerzas de contacto entre las partículas de la matriz cementante muestran valores similares al pico de la curva de la varilla de 14mm con la diferencia de que su curva no decrece. Las curvas que representan la fuerza de contacto entre partículas de la matriz cementante son casi similares debido a que su relación de aspecto son iguales. La diferencia de estas dos varillas es la distribución de fuerzas de contacto de las partículas de la matriz cementante, en la varilla de 32mm se observa una mejor distribución de estas fuerzas.

4.9.3 INCIDENCIA DE LA LONGITUD DE DESARROLLO

Se puede decir que entre mayor sea el diámetro de las barra, mayor será la longitud de desarrollo debido a que son directamente proporcionales (González, 1990). Es necesaria una longitud de desarrollo suficiente para que una barra esté anclada por adherencia y pueda desarrollar el esfuerzo de fluencia sin fallar.

Si a una barra de acero de diámetro Φ embebida en concreto se somete a un esfuerzo de tracción N creciente, habrá una distribución de las tensiones ζ de adherencia como se observa en la figura 4.19, cuyo valor medio ζ_m se muestra en la ecuación 4.2:

FIGURA 4.19: DISTRIBUCIÓN DE LA TENSIÓN DE ADHERENCIA EN LONGITUD DE VARILLA.



FUENTE: (González, 1990).

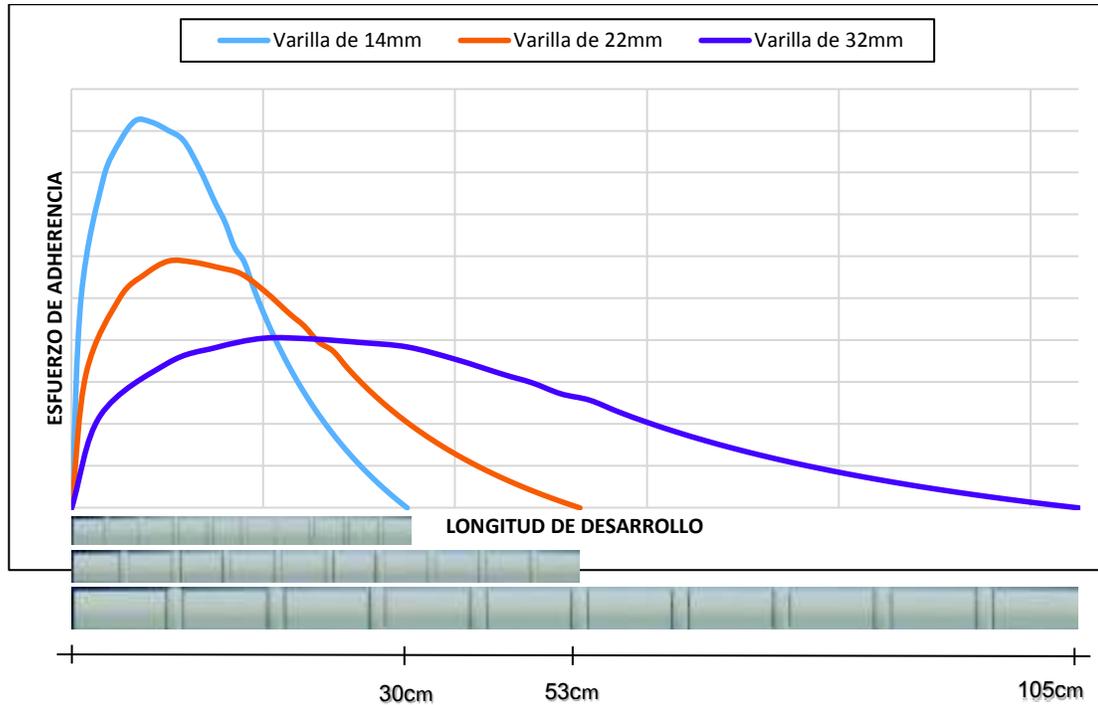
$$\zeta_m = \frac{N}{\pi\Phi L} \quad \text{ecuación 4.2}$$

Donde: N es el esfuerzo de tracción, Φ es el diámetro de la varilla y L la longitud de desarrollo.

De la ecuación 4.2 se deduce que mientras menor sea el diámetro de la varilla mayor será el esfuerzo de adherencia medio entre éste y la matriz cementante.

Una longitud de desarrollo ideal ocasiona una distribución de esfuerzos de adherencia a lo largo de la varilla como se muestra en la figura 4.19. En este contexto se puede decir que la figura 4.20 muestra el comportamiento del esfuerzo de adherencia en una varilla (i.e. 14mm, 22mm y 32mm) cuando tiene una longitud de desarrollo adecuada.

FIGURA 4.20: DISTRIBUCIÓN DEL ESFUERZO DE ADHERENCIA LOCAL EN LONGITUD DE VARILLA DE 14MM, 22MM Y 32MM.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

En la figura 4.20 se observa la tendencia de las curvas de esfuerzo de adherencia a lo largo de una varilla que tiene una longitud de desarrollo sugerida por las ecuaciones del ACI.

Para comprobar lo mencionado se realizó un modelamiento adicional con una varilla de 14mm limitando su longitud de desarrollo a 11 centímetros, el resultado se muestra en la figura 4.21.

FIGURA 4.21: FUERZAS DE CONTACTO EN VARILLA DE 14MM CON LONGITUD DE DESARROLLO DE 11 CENTÍMETROS.

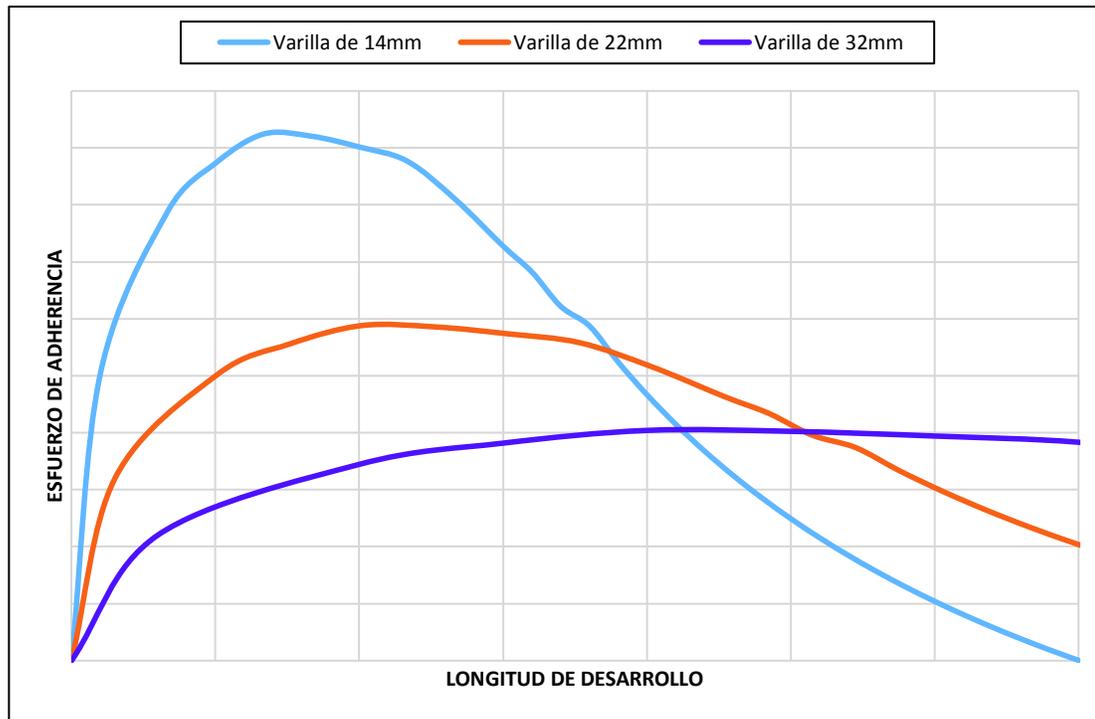


ELABORACIÓN: Arana, 2018.

Como se puede observar la figura 4.21 que corresponde a las fuerzas de contacto entre las partículas de la matriz cementante registradas en la varilla de 14mm para una longitud de desarrollo de 11 centímetros es diferente a la mostrada en la figura 4.15 hasta la figura 4.19 donde su longitud de desarrollo es de 30 centímetros, que según la sección 4.7 es la longitud de desarrollo adecuada para esta varilla.

Los esfuerzos de adherencia a lo largo de la varilla no logran desarrollarse adecuadamente si limitamos la longitud de desarrollo. Como resultado tendremos las tendencias de estas curvas, como se muestra en la figura 4.22 que se asemeja a los resultados mostrados en la sección 4.6.

FIGURA 4.22: DISTRIBUCIÓN DEL ESFUERZO DE ADHERENCIA LOCAL EN LONGITUD DE VARILLA DE 14MM, 22MM Y 32MM CON LONGITUD DE DESARROLLO DE 30 CENTÍMETROS.



ELABORACIÓN: Arana, 2018.

4.9.3.1 Varilla 14mm

La probeta de hormigón de 30 centímetros de alto cumple con la longitud de desarrollo calculada en la sección 4.7 para esta varilla. La curva de las fuerzas de contacto de la matriz cementante en la varilla se asemeja con la figura 4.19.

4.9.3.2 Varillas 22mm y 32mm

La longitud de desarrollo para ambas varillas es mucho mayor que la probeta de hormigón con la que se modeló este estudio. Las curvas de la fuerza de contacto de la matriz cementante no decrece, es decir, el esfuerzo de adherencia no se desarrolló debidamente por la falta de longitud de desarrollo.

4.9.4 INCIDENCIA DE RELACIÓN DE ASPECTO ENTRE LOS CORRUGADOS DE LA VARILLA

Como se mencionó, la relación de aspecto que se describe en la sección 4.6 compromete a la geometría de los resaltos con la adherencia.

4.9.4.1 Varilla 14mm

La relación de aspecto es diferente de la varilla de 22mm y 32mm pero está dentro del rango permitido. La curva de la fuerza de contacto de la matriz cementante es diferente a la varilla de 22mm y 32mm.

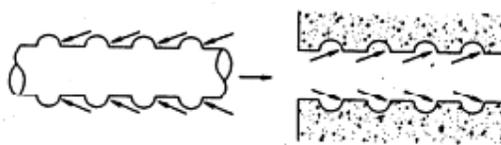
4.9.4.2 Varilla de 22mm y 32mm

Las relaciones de aspecto de los resaltos de estas varillas son similares y está dentro del rango permitido. La tendencia de las curvas de la fuerza de contacto de la matriz cementante a lo largo de la varilla mostradas en la figura 4.15 hasta la figura 4.18 son parecidas.

4.9.5 CADENA DE FUERZA

Tepfers (1973) afirma que la transferencia de tensiones desde la barra embebida al hormigón se produce mediante fuerzas inclinadas de compresión según un ángulo.

FIGURA 4.23: TRANSFERENCIA DE FUERZA DE CONTACTO ENTRE VARILLA Y CONCRETO.



FUENTE: (González, 1990).

Las cadenas de fuerzas mostradas en este estudio para la varilla de 14mm, 22mm y 32mm, tienen un comportamiento como lo estableció Tepfers, excluyendo la varilla lisa ya que ésta no tiene resaltos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como resultado de este trabajo de investigación cuyo objetivo general consiste en generar modelos numérico-computacionales para identificar mecanismos de transmisión de fuerzas por adherencia entre varillas de refuerzo y una matriz cementante, se obtienen las siguientes conclusiones:

5.1 CONCLUSIONES

- Se logró generar un modelo que responde al comportamiento del hormigón armado mediante: (1) un ensamble de partículas esféricas polidispersas (i.e. agregado grueso), que interactúan entre sí bajo potenciales de contacto (i.e. Hertz), fricción (i.e. Coulomb friction law), (2) Matriz cementante representada por un modelo de cohesión (i.e. Johnson-Kendall-Roberts Model), y (3) varillas corrugadas representadas por una interfaz sólida (i.e. acero de refuerzo) que reproduce geometría real de corrugados y que interactúa con las partículas (i.e. agregados) mediante potenciales de contacto y cohesión para definir la interacción matriz-refuerzo, todo esto a partir de conceptos fundamentales de la tecnología del Método de Elemento Discreto.
- El modelamiento de la cohesión demandó de una calibración del DEM basada en valores de energía de densidad de cohesión que representen la interfaz del modelo correspondiente al hormigón (i.e. agregados gruesos, matriz cementante) y de las varillas corrugadas, logrando un modelo numérico computacional que satisfaga los requerimientos de este estudio.
- El estudio de adherencia, en base a un modelo discreto, generado en este estudio utiliza para el acero de refuerzo una representación de varillas de 14mm, 22mm, 32mm y lisa. Todo esto con la intención de analizar la incidencia del diámetro en el fenómeno de adherencia varilla - hormigón

- El fenómeno de adherencia (i.e. varilla corrugada – hormigón) se modela mediante una representación del ensayo pull-out referido en la literatura como un estándar para estudiar este fenómeno desde una perspectiva del continuo. La representación utilizada en este estudio, genera una nueva alternativa basada en la teoría del medio discreto para conseguir visibilizar la contribución de cada una de las componentes de la meso-escala del hormigón armado en la respuesta mecánica del elemento objeto de ensayo.
- Las propiedades mecánicas de los materiales se utilizan como parámetros de los modelos de contacto, fricción y cohesión en base a los cuales se representan las interfaces que permiten la interacción entre todas las componentes del hormigón armado modeladas de manera discreta.
- Los mecanismos de desarrollo de la adherencia se evalúan con el método del elemento discreto y se hacen visibles en el modelo a través de cadenas de fuerza que no son más que una representación del flujo de fuerzas de contacto entre partículas.
- En este mismo sentido, los resultados dejan ver con claridad que las cadenas de fuerza tienen su origen en los resaltes de las varillas además de sus mayores magnitudes.
- Las fuerzas de contacto entre las partículas que en el modelo representan al agregado y la matriz cementante que surgen de la aplicación de fuerzas de extracción de la varilla son un indicador de la capacidad de adherencia entre matriz y refuerzo, es decir, mientras más altas las fuerzas, más altos serán los esfuerzos de adherencia.
- Los resultados se muestran en base a la evaluación de cadenas de fuerza en volúmenes de control que pueden describirse de la siguiente manera:
(1) En el eje longitudinal se toman en cuenta franjas de un centímetro a lo largo de la varilla, (2) cada franja del eje longitudinal describe un cilindro

alrededor de la varilla de 1.5mm de diámetro, (3) los volúmenes de control fueron evaluados para que en el análisis de cadenas de fuerzas se tomen en cuenta las partículas que muestran mayor incidencia en las interacción con la varilla.

- Estos resultados evidencian tendencias que se aproximan a los procesos de homogenización descritos en la teoría del continuo cuando se trata el fenómeno de adherencia. Más allá de esto, el estudio permite un seguimiento mucho más detallado de la manera como las cadenas de fuerza reflejan las interacciones entre varilla y hormigón y por tanto nos permiten establecer criterios con una base mucho más física y de esta manera contribuir a un mejor entendimiento de este fenómeno.
- La varilla de 14mm muestra una tendencia de la curva “fuerzas de contacto vs longitud de la varilla” que puede describirse de la siguiente manera: un tramo creciente en los primeros 5 centímetros que luego decrece hasta los 30 centímetros, esto tiene una correspondencia con el diagrama de esfuerzo de adherencia local en un ensayo pull-out que presentan las varillas cuando su longitud de desarrollo es la establecida por las normas.
- La relación entre altura de resalto y distancia entre resaltos (a/c) de las varillas de 22mm y 32mm son relativamente iguales y sus valores están dentro del rango establecido por Rehm (1969) que indica que la relación optima es de $0,062 < a/c < 0,1$. Este factor tiene un impacto en la similitud observada en la variación de las curvas “fuerzas de contacto vs longitud de la varilla” de las varillas mencionadas.
- La altura y distancia entre resaltos es un factor que influye en la transferencia de fuerzas de contacto entre las partículas que representan al hormigón (i.e. agregado y matriz cementante) y la interfaz que representa a la varilla refuerzo, ya que evitan el desplazamiento relativo de la varilla embebida en el concreto (fib, 2000). Es por esta razón que la varilla de 32mm, al ser de mayor diámetro, presenta similitud en la variación de la curva “fuerzas de contacto vs longitud de la varilla” que la varilla de 22mm.

- La longitud de desarrollo permite que los esfuerzos de adherencia local se desarrollen debidamente en la longitud de la varilla embebida en el concreto y anticipar una relación con el diámetro de la varilla. En este estudio se mantuvo constante la longitud de desarrollo para todos los diámetros de varilla analizados, lo cual se hace visible en las curvas que muestran valores y tendencias de distribución de cadenas de fuerza. Los resultados hacen evidente la dependencia de la adherencia, la longitud de desarrollo y el diámetro de la varilla.
- El aplastamiento del concreto que se da en las varillas corrugadas o también llamado acuñaamiento, es más efectivo que la fricción, lo que queda demostrado en este estudio al observar que el modelo numérico de la varilla lisa muestra valores de fuerza de contacto entre las partículas de la matriz cementante muy bajos debido a que solo actúa la adhesión química.
- Las simulaciones numéricas de modelos meso-escala requieren la discretización de la estructura interna del material, aumentando por tanto el coste computacional de las mismas.
- El incremento de la variable tiempo es de 10^{-6} segundos, su elección depende de las propiedades mecánicas de los materiales como el módulo de elasticidad y relación de Poisson para mantener la estabilidad del tiempo en la simulación implementada por la tecnología del DEM.

5.2 RECOMENDACIONES

- En este estudio se consideran partículas únicamente esféricas limitando, debido a la forma, la posibilidad de extraer información más real sobre la incidencia de éstas en el comportamiento de las componentes constitutivas de un material. El DEM es una técnica de modelado utilizada en sistemas granulares y permite también modelar partículas de forma no esférica. Esta capacidad es importante debido a que existe un entendimiento común de

que la forma de las partículas tiene una gran influencia en la dinámica de estos sistemas. Es necesaria una comprensión fundamental de la física de los sistemas granulares conformados por partículas no esféricas para: (1) entender la contribución de sistema de partículas modelado de elementos discretos con formas reales y su incidencia en la relación de fuerzas de contacto (2) proporcionar más información sobre la mecánica de partículas en aplicaciones de ingeniería. Es relevante llevar a cabo este propósito no solo por interés académico, ya que también es de utilidad para aplicaciones industriales.

- La longitud de desarrollo es un factor predominante en el análisis del fenómeno de adherencia local de la varilla, resultado de la interacción entre hormigón y refuerzo. A nivel de la meso-escala no es posible observar en su totalidad el comportamiento de la adherencia local si la longitud de desarrollo no es la que indican las ecuaciones establecidas por la norma. Debido a que este estudio se centra en la evaluación de cadenas de fuerzas generadas entre las partículas que en el modelo representan al agregado y la matriz cementante ubicadas en un volumen de control equivalente a una longitud de 30 centímetros correspondiente a la varilla embebida en concreto, se recomienda extender este estudio al análisis más detallado del fenómeno de adherencia local a través de la implementación de modelos de hormigón armado cuyo volumen de control satisfaga la longitud de desarrollo establecida en la normativa.
- Se recomienda extender este estudio en cuanto al análisis de la incidencia de la geometría de los corrugados. Los corrugados caracterizan a la varilla influyendo directamente con la adherencia entre hormigón y refuerzo, debido a que produce el fenómeno denominado acuñaamiento que es el factor que garantiza la adherencia en el hormigón armado en contraparte del diámetro de la varilla, es decir, la geometría de los resaltos compensa el diámetro de las varillas en el fenómeno de la adherencia, convirtiéndola de esta manera en objeto de estudio para poder tener un mejor entendimiento de la física que gobierna este fenómeno.

REFERENCIAS

- ACI 318S-08. (2008). *Requisitos de reglamento para concreto estructural y comentario, (versión en español y en sistema métrico)*.
- Antony, S., Hoyle, W., & Ding, Y. (2004). *Granular materials: fundamentals and applications*. Royal Society of Chemistry.
- Bradley, R. (1932). *The cohesive force between solid surfaces and the surface energy of solids*. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 13(86), 853–862.
- CEB, R. (1983). *Recommendations on reinforcement Steel for reinforced concrete. RC-6: Bond test for reinforcement Steel: 2. Pull-out test, Revised Edition*.
- Chang, W. (1986). *Contact, Adhesion and Static Friction of Metallic Rough Surfaces (Ph.D. tesis)*. University of California, Berkeley.
- COVENIN1667-80, N. (n.d.). *Método de ensayo para la determinación de valores comparativos de la adherencia desarrollada entre el concreto y el acero usado como refuerzo*.
- Cundall, P., & Strack. (1979). *A discrete numerical model for granular assemblies*. *Geotechnique*. 29(1), 47–65.
- Donzé, F., Richefeu, V., & Margnier, S. (2008). *Advances in discrete element method applied to soil, rock and concrete mechanics*.
- Filippou, F. (1986). *A Simple Model for Reinforcing Bar Anchorages under Cyclic Excitations*. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 112(7), 1605-1622.
- Foerster, S., Louge, M., Chang, H., & Allis, K. (1994). *Measurements of the collision properties of small spheres*. *Physics of Fluids*, 6(3), 1108 – 1115.
- Galanov, B. (2011). *Models of adhesive contact between rough elastic solids*. *International Journal of Mechanical Sciences*, 53(11), 968–977.
- Gambarova, P., Rosati, g., & Zasso, B. (1989). *Steel-to-Concrete Bond After Concrete Splitting: Test Results*. *Materials and Structures*, 22(127), 35-47.

- García Alonso, M., & Gutiérrez Jiménez, J. (1999). *Consecuencias de la falta de adherencia en zonas locales de la armadura traccionada sobre el comportamiento de elementos a flexión*. 1er Congreso ACHE, 287-290.
- Goldsmith, W. (1960). *Impact: The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids*.
- González, V., Botero, J., Rochel, R., & Vidal, J. (2005). *Propiedades mecánicas del acero de refuerzo*. *Ingeniería y Ciencia*, 67-76.
- Gordon, G., Zhou, & Sun, Q. (2013). *Three-dimensional numerical study on flow regimes of dry granular flows by dem*. *Powder Technology*, 239, 115–127.
- Goto, Y. (1971). *Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars*. *ACI JOURNAL, Proceedings*, 68(4), 244-251.
- Groger, T., Tuzun, U., & Heyes, M. (2003). *Modelling and measuring of cohesion in wet granular materials*. *Powder Technology*, 133(1), 203–215.
- Groot, A., Kusters, B., & Monnier, T. (1981). *Numerical Modelling of Bond-Slip Behaviour*. *Heron*, 26(1B).
- Jenike, A. (1964). *Storage and flow of solids*. bulletin no. 123. *Bulletin of the University of Utah*, 53(26).
- Kloss, C., & Goniva, C. (2010). *Liggghts—a new open source discrete element simulation software*. In *Proc. of The 5th International Conference on Discrete Element Methods*, 25-26.
- Krugger-Emden, H., Simsek, E., Rickelt, S., Wirtz, S., & Scherer, V. (2007). *Review and extension of normal force models for the Discrete Element*. *Powder Technology*, 171, 157 – 173.
- Kruse, D., & Lemmon, R. (2005). *Material flow simulation-using the discrete element method as an everyday design tool*. *Bulk Solids Handling*, 25(6), :358–367.
- Kuwabara, G., & Kono. (1987). *Restitution coefficient in a collision between two spheres*. *Jpn. J.Appl. Phys.*, 26, 1230 – 1233.

- Labous, L., Rosato, A., & Dave, R. (1997). *Measurement of collisional properties of spheres using high-speed video analysis*. *Physical Review E*, 56, 5717 – 5725.
- Lian, G., Thornton, C., & Adams, J. (1993). *A theoretical study of the liquid bridge forces between two rigid spherical bodies*. *Journal of Colloid and Interface Science*, 161(1), 138–147.
- Lorefice, R., Etse, G., Lopez, C., & Carol, I. (2006). *Mesomechanic Analysis of time dependent concrete behavior, EURO-C 2006, Computational Modeling of Concrete Structures, Mayrhofen. Austria*.
- Mabrouk, R., Ishida, T., & Maekawa, K. (1998). *Solidification model of hardening concrete composite for predicting autogenous and drying shrinkage*. *Autogenous Shrinkage of Concrete*, 309-318.
- Maugis, D. (1992). *Adhesion of spheres: the JKR-DMT transition using a Dugdale model*. *Journal of Colloid and Interface Science*, 150(1), 243–269.
- Molina, M., & Gutiérrez, J. (2004). *Influencia del diámetro de la barra y del recubrimiento en las características adherentes del hormigón armado*. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*.
- Molina, M., & Gutiérrez, P. (2005). *Comportamiento de estructuras de hormigón armado con una deficiente transferencia de tensiones Hormigón-Acero. Análisis experimental y propuesta de un modelo de evaluación estructura. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid*.
- Mukherjee, P., & Mailvaganam, N. (1992). *In situ evaluation of concrete structures, Repair and Protection of Concrete Structures*. CRC Press, Boca Raton, FL, 191.
- Muller, V., Yushchenko, V., & Derjaguin, B. (1980). *On the influence of molecular forces on the deformation of an elastic sphere and its sticking to a rigid plane*. *Journal of Colloid and Interface Science*, 77(1), :91–101.
- Nedderman, R. (2005). *Statics and kinematics of granular materials*. Cambridge University Press, 2005.

- Norma CCCA:AC A-64. (n.d.). *Método para el ensayo a tracción de barras de acero ordinario para usarse como refuerzo en el concreto armado.*
- Pierrat, P., & Caram, H. (1997). *Tensile strength of wet granula materials. Powder Technology, 91(2), 83–93.*
- Radjai, F., Dubois, F., & et al. . (2011). *Discrete-element modeling of granular materials.*
- Ramirez, R., Poschel, h., Brilliantov, N., & Schwager, T. (2008). *Coefficient of restitution of colliding viscoelastic spheres. Moscow State University, Physics Department.*
- Rehm, G., & Eligehausen, R. (1979). *Bond of Ribbed Bars under High Cycle Repeated Loads. ACI JOURNAL, Proceedings, 76(2), 297-309.*
- RILEM. (1978). *Recommandations RILEM/CEB/FIP, RC6 "Adhesion by direct tearing".*
- Sideris, K., Manita, P., & Sideris, K. (2004). *Estimation of ultimate modulus of elasticity and Poisson ratio of normal concrete. Cement & Concrete Composites, 26, 623–631.*
- Talon, C., & Curnier , A. (2003). *A model of adhesion coupled to contact and friction. European Journal of Mechanics, A/Solids, 545-565.*
- Tastani, S. (2002). *Experimental Evaluation of the direct tension – Pullout bond test. Department of Civil Engineering, Demokritus University of Thrace Bas.*
- Tepfers, R. (1973). *A theory of bond applied to overlapped tensile reinforcement splices for deformed bars. Chalmers University of Technology. Division of Concrete Structures, Goteborg, Sweden.*
- Tomas, J. (2001). *Assessment of mechanical properties of cohesive particulate solids. Part 1: particle contact constitutive model. Particulate science and technology, 19(2), 95–110.*
- Uijl, J., & Bigaj, A. (1996). *A Bond Model for Ribbed Bars Based on Concrete Confinement. Heron, 41(3), 201-226.*

Xia, J., Miller, R., & Park, C. (1999). Estimation of near-surface shear-wave velocity. GEOPHYSICS, 64(3), 691–700.

Yankelevsky, D. (1997). A two phase one dimensional model for steel-concrete interaction. Computers & Structures, 65(6), 781–794.

Yavuzturk, C., & Spitler, J. (1999). A Short Time Step Response Factor Model for Vertical. ASHRAE Transactions, 105(2), 475-485.

ANEXOS

ANEXO A: INSTALACION DE LIGGGHTS.

LIGGGHTS es un software de código abierto que utiliza la tecnología de método de elemento discreto para simular la interacción y el comportamiento de partículas.

Para su instalación se necesita previamente hacer uso del sistema operativo de código abierto UBUNTU, que es una distribución de Linux. La instalación de LIGGGHTS se logra a través de la terminal de UBUNTU, esta se accede con la combinación de teclas Ctrl+Alt+t.

Los pasos a seguir para la instalación son los siguientes:

1.- Instalar GIT.

En la terminal de UBUNTU escribimos el siguiente comando:

```
sudo apt-get install git-all
```

Git es una herramienta para crear y gestionar repositorios remotos.

2.- Clonar el repositorio deseado.

Clonamos el repositorio público LIGGGHTS@-TUG escribiendo en el terminal la siguiente línea:

```
git clone git@github.com:CFDEMproject/LIGGGHTS-PUBLIC.git
```

Si muestra error es debido al firewall el cual bloquea el puerto TCP, en este caso se debería usar la siguiente línea:

```
git clone https://github.com/CFDEMproject/LIGGGHTS-PUBLIC.git
```

3.- Actualizar los repositorios

Se debe ir a la carpeta donde se encuentra el repositorio LIGGGHTSPUBLIC escribiendo en el terminal las siguientes líneas:

```
Cd /home/usuario/LIGGGHTSPUBLIC
```

Git pull

6.- Instalar LPP

Nos dirigimos a la ruta de su ubicación:

```
Cd /home/usuario/LPP
```

Luego en la terminal escribimos:

```
bash ./install.sh -p home/usuario
```

```
bash
```

7.- Instalar LIGGGHTS

En el terminal y con ruta en home escribimos:

```
sudo apt -get install liggghts
```

ANEXO B: ESTRUCTURA DE UN SCRIPT.

Un script es un conjunto de órdenes escritas en código de programación que son almacenadas en un archivo de texto, generalmente muy ligero y, que es ejecutado por lotes o línea a línea, en tiempo real por un intérprete.

La estructura típica de un script utilizado por LIGGGHTS consta de 4 partes, así como se indica en la figura B.1:

1. Inicialización
2. Inserción y definición de las partículas
3. Ajustes
4. Correr la simulación

FIGURA B.1: ESTRUCTURA DE UN SCRIPT.

```

#Extraccion de varilla
atom_style granular
atom_modify map array
boundary f f f
newton off
echo both
$processors 1 1 2
units si
read_data data/particle.data
hard_particles yes
neighbor 0.001 bin
neigh_modify delay 0

#Propiedades de los materiales
fix m1 all property/global youngsModulus peratomtype 21e9 210e9
fix m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.2 0.3
fix m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 2 0.32 0.38 0.38 0.41
fix m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 2 0.45 0.4 0.4 0.3
fix m5 all property/global cohesionEnergyDensity peratomtypepair 2 150314000 240000000 240000000 1576260000
$fix m6 all property/global k_finnie peratomtypepair 2 1.0 1.0 1.0 1.0

#New pair style
pair_style gran model hertz tangential history cohesion sjkr #Hertzian with cohesion
pair_coeff * *
timestep 0.000001
fix gravi all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0

#cylinder walls
fix zwall1 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 spline 0.0
fix zwall2 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 spline 0.3039
fix cylwalls all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 cylinder 0.075 0. 0.

#Importar la geometria de la malla desde un cad
fix cad all mesh/surface file meshes/varilla_alto.stl type 2

#use the imported mesh as granular wall
fix bucket_wall all wall/gran model hertz tangential history cohesion sjkr mesh_n_meshe 1 meshes cad
compute cpq1 all pair/gran/local pos force_normal

#insert the first particles so that dump is not empty
run 1

#make a dump of particles and the stl file
dump dmp1 all custom/vtk 10000 post1/particle_*.vtk id type type x y z ix iy iz vx vy vz fx fy fz omegaX omegaY
dump dmp2 all local/gran/vtk 10000 post1/forcechain*.vtk cpq1
dump dmp3 all mesh/stl 10000 post1/dump*.stl

#moving mesh
fix move all move/mesh mesh cad linear 0. 0.
run 5000000

```

Inicialización

Inserción y definición de partículas

Ajustes

Correr la simulación

ELABORACIÓN: Arana, 2018.

B.1 INICIALIZACIÓN

En esta sección se Configura los parámetros que deben definirse antes de crear o leer partículas desde un archivo.

Los comandos utilizados son:

- `atom_style`: define el estilo de partículas que se usa en la simulación.
- `atom_modify`: modifica el estilo de particulas seleccionado
- `boundary`: Establece el estilo de los límites para el cuadro de simulación global en cada dimensión.
- `newton`: este comando active o desactiva la tercera ley de Newton para interacciones de pares de partículas
- `units`: indica el Sistema de unidades.

- `hard_particles`: es usado cuando el módulo de elasticidad es mayor a $1E9$.
- `neighbor / Neighbor_modify`: establece parámetros que afectan la construcción y el uso de listas de vecinos de pares

B.2 INSERCIÓN Y DEFINICIÓN DE LAS PARTÍCULAS

Existen dos maneras para definir las partículas en LIGGGHTS. Leerlas desde un archivo de texto o crearlas a través de una región definida previamente para luego insertar las partículas en dicha en región.

Los comandos utilizados son:

- `fix property/global`: establece las propiedades de los materiales que se simularán.
- `pair_coeff`: especifica los coeficientes del campo de fuerza por pares, para uno o más pares de tipos de átomos.
- `pair_style`: define el tipo de contacto y si la interacción entre átomos tiene o no cohesión.
- `timestep`: define el tiempo que transcurre entre un step y el siguiente.
- `fix gravity`: establece el eje y la dirección en la que actúa la gravedad.
- `fix mesh/surface`: inserta un sólido en forma de mallado desde un archivo con extensión `stl`.
- `fix Wall/gran`: establece una región en donde las partículas interactúan unas con otras.
- `region`: define una región geométrica del espacio.
- `Compute`: define un cálculo que se realiza en un grupo de partículas.
- `read_data`: Lee un archivo de datos que contenga información que LIGGGHTS necesita para ejecutar una simulación.
- `fix insert pack`: inserta partículas dentro de la región especificada.

B.3 AJUSTES

Luego de definir e insertar las partículas se debe ajustar los parámetros de simulación y las opciones de salida.

El comando utilizado es:

- dump: arroja una instantánea de cantidades atómicas en uno o más archivos cada N pasos de tiempo en archivos de salida.

B.4 CORRER LA SIMULACIÓN

En este apartado se especifica al software LIGGGHTS cuantos steps se desea simular.

El comando utilizado es:

- run: Ejecuta la simulacion para un número específico de time-steps

ANEXO C: SCRIPT PARA OBTENCIÓN DE DATOS DE PARTICULAS EN CONTACTO (HORMIGÓN-HORMIGÓN, ACERO-ACERO, HORMIGÓN-ACERO).

#Modelo de contacto

```
atom_style      granular
atom_modify     map array
boundary        f f f
newton          off
communicate     single vel yes
units           si
hard_particles  yes
region         reg block -0.05 0.05 -0.05 0.05 0. 0.15 units box
create_box     2 reg
neighbor        0.002 bin
neigh_modifydelay 0
```

#Material properties required for new pair styles

```

fix          m1 all property/global youngsModulus peratomtype 21e9 210e9
fix          m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.2 0.3
fix          m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 2 0.28
0.38 0.38 0.41
fix          m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 2 0.45 0.4
0.4 0.3
fix          m5 all property/global cohesionEnergyDensity peratomtypepair 2
150314000 240000000 240000000 1576260000

#New pair style

pair_style gran model hertz tangential history cohesion sjkr #Hertzian with
cohesion

pair_coeff    * *

timestep     0.000001

fix          gravi all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0

fix zwalls1 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 zplane 0.0
fix zwalls2 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 zplane 0.15
fix cylwalls all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 zcylinder
0.05 0. 0.

#region for insertion

region       bc cylinder z 0.01 0.01 0.025 0.05 0.0603 units box

group        nve_group region reg

#distributions for insertion

fix          pts1 all particletemplate/sphere 32452867 atom_type 1
density constant 2400 radius constant 0.0015

```

```
fix                pdd1 all particledistribution/discrete 15485867 1 pts1 1.0

fix                pts2 all particletemplate/sphere 15485863 atom_type 2
density constant 7850 radius constant 0.0015

fix                pdd2 all particledistribution/discrete 49979687 1 pts2 1.0

#particle insertion

fix                ins nve_group insert/pack seed 32452843 distributiontemplate pdd1
&

maxattempt 100 insert_every 30000 overlapcheck yes all_in yes vel constant 0.0
0.0 -1 &

region bc particles_in_region 250 ntry_mc 10000

compute cpgl all pair/gran/local pos force_normal delta

#apply nve integration to all particles that are inserted as single particles

fix                integr nve_group nve/sphere

#output settings, include total thermal energy

compute                rke all erotate/sphere

thermo_style custom step atoms ke c_rke vol

thermo                1000

thermo_modify        lost ignore norm no

#insert the first particles so that dump is not empty

run                1
```

```
dump      dmp1 all custom/vtk 10000 post/cohesion_*.vtk id type type x y z ix iy
iz vx vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz radius
```

```
dump      dmp2 all local/gran/vtk 10000 post/forcechain*.vtk cpgl
```

```
#insert particles
```

```
run              100000
```

```
unfix           ins
```

```
run              60000
```

```
#insert particles acero
```

```
fix             ins2 nve_group insert/pack seed 49979693 distributiontemplate pdd2
&
```

```
maxattempt 100 insert_every 30000 overlapcheck yes all_in yes vel constant 0.0
0.0 -1 &
```

```
region bc particles_in_region 250 ntry_mc 10000
```

```
run              130000
```

```
unfix           ins2
```

```
run              80000
```

ANEXO D: SCRIPT PARA PRUEBA DE COHESIÓN DEL HORMIGÓN CON VALORES DE DENSIDAD DE ENERGÍA DE COHESIÓN VARIADOS.

```
#Cohesion para hormigon
```

```
atom_style      granular
```

```
atom_modify     map array
```

```
boundary        f f f
```

```
newton          off
```

```

communicate      single vel yes
units            si
hard_particles   yes
region          reg block -0.05 0.05 -0.05 0.05 0. 0.15 units box
create_box      1 reg
neighbor        0.002 bin
neigh_modifydelay 0

```

#Material properties required for new pair styles

```

fix            m1 all property/global youngsModulus peratomtype 21.e9
fix            m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.2
fix            m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 1 0.28
fix            m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 1 0.45
fix            m6 all property/global cohesionEnergyDensity peratomtypepair 1
150314000

```

#New pair style

```

pair_style gran model hertz tangential history cohesion sjkr #Hertzian with
cohesion

```

```

pair_coeff      * *

```

```

timestep       0.000001

```

```

fix            gravi all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0

```

```

fix zwalls1 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 zplane 0.0

```

```

fix zwalls2 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 zplane 0.15

```

```

fix cylwalls all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 zcylinder
0.05 0. 0.

```

#region for insertion

```

region        bc cylinder z 0.01 0.01 0.025 0.05 0.0603 units box

```

```

group        nve_group region reg

```

#distributions for insertion

```
fix                pts1 all particletemplate/sphere 15485863 atom_type 1
density constant 2400 radius constant 0.0015
```

```
fix                pdd1 all particledistribution/discrete 15485867 1 pts1 1.0
```

#particle insertion

```
fix                ins nve_group insert/pack seed 32452843 distributiontemplate pdd1
&
```

```
maxattempt 100 insert_every 30000 overlapcheck yes all_in yes vel constant 0.0
0.0 -1 &
```

```
region bc particles_in_region 250 ntry_mc 10000
```

#apply nve integration to all particles that are inserted as single particles

```
fix                integr nve_group nve/sphere
```

#output settings, include total thermal energy

```
compute                rke all erotate/sphere
```

```
thermo_style custom step atoms ke c_rke vol
```

```
thermo                1000
```

```
thermo_modify        lost ignore norm no
```

#insert the first particles so that dump is not empty

```
run                1
```

```
dump                dmp1 all custom/vtk 10000 post/cohesion_*.vtk id type type x y z ix iy
iz vx vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz radius
```

#insert particles

```
run                200000
```

```
unfix                ins
```

```
#run
```

```
run          100000
```

ANEXO E: SCRIPT PARA PRUEBA DE COHESIÓN DEL ACERO CON VALORES DE DENSIDAD DE ENERGÍA DE COHESIÓN VARIADOS.

```
#Cohesion para el acero
```

```
atom_style      granular
```

```
atom_modify     map array
```

```
boundary        f f f
```

```
newton          off
```

```
communicate     single vel yes
```

```
units           si
```

```
hard_particles  yes
```

```
region          reg block -0.05 0.05 -0.05 0.05 0. 0.15 units box
```

```
create_box      1 reg
```

```
neighbor        0.002 bin
```

```
neigh_modify   delay 0
```

```
#Material properties required for new pair styles
```

```
fix             m1 all property/global youngsModulus peratomtype 210.e9
```

```
fix             m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.3
```

```
fix             m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 1 0.41
```

```
fix             m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 1 0.3
```

```
fix             m6 all property/global cohesionEnergyDensity peratomtypepair 1  
1576260000
```

```
#New pair style
```

```
pair_style      gran model hertz tangential history cohesion sjkr #Hertzian with cohesion
```

```

pair_coeff      * *
timestep       0.000001
fix            gravi all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0
fix zwalls1 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 zplane 0.0
fix zwalls2 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 zplane 0.15
fix cylwalls all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 zcylinder 0.05 0.
0.

#region for insertion
region         bc cylinder z 0.01 0.01 0.025 0.05 0.0603 units box
group         nve_group region reg

#distributions for insertion
fix           pts1 all particletemplate/sphere 15485863 atom_type 1 density
constant 7850 radius constant 0.0015
fix          pdd1 all particledistribution/discrete 15485867 1 pts1 1.0

#particle insertion
fix          ins nve_group insert/pack seed 32452843 distributiontemplate pdd1 &
maxattempt 100 insert_every 30000 overlapcheck yes all_in yes vel constant 0.0 0.0 -1 &
region bc particles_in_region 250 ntry_mc 10000

#apply nve integration to all particles that are inserted as single particles
fix         integr nve_group nve/sphere

#output settings, include total thermal energy
compute          rke all erotate/sphere
thermo_style    custom step atoms ke c_rke vol
thermo          1000

```

```
thermo_modify      lost ignore norm no
```

```
#insert the first particles so that dump is not empty
```

```
run                1
```

```
dump              dmp all custom/vtk 10000 post/cohesion_*.vtk id type type x y z ix iy iz vx
vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz radius
```

```
#insert particles
```

```
run                200000
```

```
unfix             ins
```

```
#run
```

```
#run                100000
```

ANEXO F: SCRIPT PARA PRUEBA DE ADHESIÓN DEL ACERO Y HORMIGÓN CON VALORES DE DENSIDAD DE ENERGÍA DE COHESIÓN VARIADOS.

```
#Prueba de adhesion
```

```
atom_style        granular
```

```
atom_modify        map array
```

```
boundary          f f f
```

```
newton             off
```

```
echo              both
```

```
communicate        single vel yes
```

```
units              si
```

```
hard_particles     yes
```

```
#Caja de simulacion
```

```
region            reg block -0.125 0.125 -0.125 0.125 0.0 0.7 units box
```

```
create_box        2 reg
```

```
neighbor    0.002 bin
neigh_modifydelay 0
```

```
#Material properties required for new pair styles
```

```
fix          m1 all property/global youngsModulus peratomtype 21e9 210e9
fix          m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.2 0.3
fix          m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 2 0.28
0.38 0.38 0.41
fix          m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 2 0.45 0.4
0.4 0.3
fix          m5 all property/global cohesionEnergyDensity peratomtypepair 2
150314000 240000000 240000000 1576260000
```

```
#New pair style
```

```
pair_style   gran model hertz tangential history cohesion sjkr #Hertzian with
cohesion
pair_coeff    * *
timestep     0.000001
fix          gravi all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0
```

```
#cylinder walls
```

```
fix          zwalls1 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1
zplane 0.0
fix          zwalls2 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1
zplane 0.7
fix          cylwalls all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1
zcylinder 0.125 0. 0.
```

```
#Importar la geometria de la malla desde un cad
```

```
fix          cad all mesh/surface file meshes/varilla_alto.stl type 2
```

```
#use the imported mesh as granular wall
```

```

fix          bucket_wall all wall/gran model hertz tangential history cohesion sjkr
mesh n_meshes 1 meshes cad

#region and insertion
region      bc cylinder z 0.0 0.0 0.014 0.39 0.4 units box
group      nve_group region reg

#distributions for insertion
fix          pts1 all particletemplate/sphere 15485863 atom_type 1 density
constant 2400 radius constant 0.0015
fix          pdd1 all particledistribution/discrete 32452843 1 pts1 1

#particle insertion
fix          ins nve_group insert/pack seed 32452867 distributiontemplate pdd1
&
maxattempt 100 insert_every 30000 overlapcheck yes all_in yes vel constant 0.0
0.0 -1 &
region bc particles_in_region 40 ntry_mc 10000

#apply nve integration to all particles that are inserted as single particles
fix          integr nve_group nve/sphere

#output settings, include total thermal energy
thermo_style custom step atoms ke c_rke vol
thermo          1000
thermo_modify   lost ignore norm no

#insert the first particles so that dump is not empty
run          1

#make a dump of particles and the stl file
dump         dmp1 all custom/vtk 10000 post1/particle_*.vtk id type type x y z ix iy
iz vx vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz radius

```

```
dump          dmp2 all mesh/stl 10000 post1/dump*.stl
```

```
#run with particle insertion
```

```
run          200000
```

```
unfix ins
```

```
run          80000
```

ANEXO G: SCRIPT PARA EL LLENADO DE PROBETAS CON PARTÍCULAS DE HORMIGÓN.

```
#Llenado
```

```
atom_style granular
```

```
atom_modify map array
```

```
boundary f f f
```

```
newton off
```

```
echo both
```

```
communicate single vel yes
```

```
units si
```

```
hard_particles yes
```

```
#Caja de simulacion
```

```
region reg block -0.075 0.075 -0.075 0.075 0.0 0.75 units box
```

```
create_box 2 reg
```

```
neighbor 0.002 bin
```

```
neigh_modify delay 0
```

```
#Material properties required for new pair styles
```

```
fix m1 all property/global youngsModulus peratomtype 21e9 210e9
```

```
fix m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.2 0.3
```

```
fix m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 2 0.28  
0.38 0.38 0.41
```

```
fix          m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 2 0.45 0.4
0.4 0.3
```

```
#New pair style
```

```
pair_style   gran model hertz tangential history #Hertzian without cohesion
pair_coeff    * *
```

```
timestep     0.000001
```

```
fix          1 all nve/sphere
```

```
fix          gravi all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0
```

```
#cylinder walls
```

```
fix          zwalls1 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1
zplane 0.0
```

```
fix          zwalls2 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1
zplane 0.45
```

```
fix          cylwalls all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1
zylinder 0.075 0. 0.
```

```
#Importar la geometria de la malla desde un cad
```

```
fix          cad all mesh/surface file meshes/varilla_alto.stl type 2
```

```
#use the imported mesh as granular wall
```

```
fix          bucket_wall all wall/gran model hertz tangential history mesh n_meshes
1 meshes cad
```

```
#region and insertion
```

```
region       bc cylinder z 0.0 0.0 0.075 0.40 0.45 units box
```

```
region       in2 cylinder z 0.0 0.0 0.075 0.30 0.45 units box
```

```
#distributions for insertion
```

```
fix          pts1 all particletemplate/sphere 15485863 atom_type 1 density
constant 2400 radius constant 0.0015

fix          pts2 all particletemplate/sphere 15485867 atom_type 1 density
constant 2400 radius constant 0.004

fix          pdd1 all particledistribution/discrete 32452843 2 pts1 0.8 pts2 0.2

#particle insertion

fix          ins all insert/pack seed 32452867 distributiontemplate pdd1 &
maxattempt 100 insert_every 350000 overlapcheck yes all_in yes vel constant 0.0
0.0 -2.0 & region bc particles_in_region 13300 ntry_mc 10000

compute cpjl all pair/gran/local pos vel force

#output settings, include total thermal energy
compute      rke all erotate/sphere
thermo_style custom step atoms ke c_rke vol
thermo       1000
thermo_modify lost ignore norm no

#insert the first particles so that dump is not empty
run          1

#make a dump of particles and the stl file
dump         dmp1 all custom/vtk 100000 post/particle_*.vtk id type type x y z ix iy
iz vx vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz radius
dump        dmp2 all mesh/stl 100000 post/dump*.stl

#run with particle insertion
run         5700000 upto
unfix      ins

#run to let particle settle
```

```
run          6999999 upto
```

```
#delete particle in region
```

```
delete_atoms region in2 compress yes mol no
```

```
run          7000000 upto
```

ANEXO H: SCRIPT CON VELOCIDAD DE EXTRACCIÓN DE VARILLA

```
#Extraccion de varilla
```

```
atom_style  granular
```

```
atom_modify map array
```

```
boundary    f f f
```

```
newton      off
```

```
echo        both
```

```
communicate single vel yes
```

```
units       si
```

```
read_data  data/particle.data
```

```
hard_particles yes
```

```
neighbor    0.002 bin
```

```
neigh_modify delay 0
```

```
#Material properties required for new pair styles
```

```
fix         m1 all property/global youngsModulus peratomtype 21e9 210e9
```

```
fix         m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.2 0.3
```

```
fix         m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 2 0.28  
0.38 0.38 0.41
```

```
fix         m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 2 0.45 0.4  
0.4 0.3
```

```
fix         m5 all property/global cohesionEnergyDensity peratomtypepair 2  
150314000 240000000 240000000 1576260000
```

#New pair style

pair_style gran model hertz tangential history cohesion sjkr #Hertzian with cohesion

pair_coeff * *

timestep 0.000001

#fix 1 all nve/sphere

fix gravi all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0

#cylinder walls

fix zwalls1 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 zplane 0.0

fix zwalls2 all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 zplane 0.3039

fix cylwalls all wall/gran model hertz tangential history primitive type 1 zcylinder 0.075 0. 0.

#Importar la geometria de la malla desde un cad

fix cad all mesh/surface file meshes/varilla_alto.stl type 2

#use the imported mesh as granular wall

fix bucket_wall all wall/gran model hertz tangential history cohesion sjkr mesh n_meshes 1 meshes cad

compute cppl all pair/gran/local pos force_normal

#apply nve integration to all particles that are inserted as single particles

fix integr all nve/sphere

#output settings, include total thermal energy

compute rke all erotate/sphere

```
thermo_style custom step atoms ke c_rke vol
```

```
thermo          1000
```

```
thermo_modify   lost ignore norm no
```

```
#insert the first particles so that dump is not empty
```

```
run            1
```

```
#make a dump of particles and the stl file
```

```
dump          dmp1 all custom/vtk 10000 post/particle_*.vtk id type type x y z ix iy  
iz vx vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz radius
```

```
dump          dmp2 all local/gran/vtk 10000 post/forcechain*.vtk cppl
```

```
dump          dmp3 all mesh/stl 10000 post/dump*.stl
```

```
#moving mesh
```

```
fix          move all move/mesh mesh cad linear 0. 0. 1e-6
```

```
run          5000000
```