



UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL – MENCIÓN EN ESTRUCTURAS



UAC

TESIS

**“ANÁLISIS NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE LA INTERFAZ FIBRA DE
ICHU Y MATRIZ CEMENTICIA POR ARRANCAMIENTO (*PULL-OUT*)”**

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO

EN INGENIERÍA CIVIL

MENCIÓN EN ESTRUCTURAS

PRESENTADO POR: ING. ADAN RENZO AGUILAR HILARI

ASESOR: DR. ING. ELVIS YURI MAMANI VARGAS

CUSCO - PERÚ

2022



DEDICATORIA

A todos los que apoyaron en el desarrollo y
conclusión de esta tesis.



AGRADECIMIENTOS

Mi gratitud para cada una de las personas que aportaron para la realización de esta investigación, en particular al Ing. Elvis Mamani por la oportunidad y su apoyo continuo, a la Prof. Carmen Flores, al Ing. Samuel Charca, al Ing. Carlos Tenazoa, así como a la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC) y al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) por impulsar la presente tesis como parte del Proyecto de Investigación Aplicada y Desarrollo Tecnológico “Fabricación de paneles de fibrocemento utilizando materiales obtenidos a partir de plantas endémicas del Perú” E041-2018-01-BM CONCYTEC-BANCO MUNDIAL.



RESUMEN

Se estudió la interacción mecánica y las propiedades cohesivas que se produce entre la fibra de *Ichu* tratada con hidróxido de sodio y una matriz cementicia, para ello, se realizó el análisis experimental mediante ensayos de arrancamiento (*pull-out*), el análisis numérico con ayuda de un software de elementos finitos y el análisis analítico a través formulaciones matemáticas. Por medio de la prueba de arrancamiento para el caso de una longitud de fibra embebida de 5 mm. se logró obtener los principales parámetros cohesivos, con los cuales se calibró el modelo numérico y se obtuvo la curva fuerza-desplazamiento correspondiente al ensayo experimental, con ello se desarrolló modelos numéricos predictivos para cuatro casos adicionales de longitud de fibra embebida diferente (3 mm., 7 mm., 9 mm. y 11 mm.). Se determinó el tipo de deslizamiento representativo en el ensayo de arrancamiento, resultando del tipo *softening* o llamado deslizamiento suave, en ensayos específicos el tipo de deslizamiento es *hardening* o por endurecimiento; esto debido a diversos factores como por ejemplo el efecto *misfit*.

Palabras clave: Arrancamiento, Matriz cementicia, Interfaz, Fibra de *Ichu*.

ABSTRACT

The mechanical interaction and the cohesive properties that occurs between the *Ichu* fiber treated with sodium hydroxide and a cementitious matrix were studied, for this, the experimental analysis was carried out through pull-out tests, the numerical analysis with the help of finite element software and analytical analysis through mathematical formulations. By means of the pull-out test for the case of an embedded fiber length of 5 mm. It was possible to obtain the main cohesive parameters, with which the numerical model was calibrated and the force-displacement curve corresponding to the experimental test was obtained, with this predictive numerical models were developed for four additional cases of different embedded fiber length (3 mm., 7 mm., 9 mm. And 11 mm.). The representative type of sliding was determined in the pull-out test, resulting in the softening type or called soft sliding, in specific tests the type of sliding is hardening or by hardening; This is due to various factors such as the misfit effect.

Keywords: Pull-out, Cement matrix, Interface, *Ichu* fiber.



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	III
ÍNDICE GENERAL	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
LISTADO DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	XI
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMAS	2
1.2.1 PROBLEMA GENERAL	2
1.2.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS	2
1.3 JUSTIFICACIÓN	2
1.3.1 CONVENIENCIA.....	2
1.3.2 RELEVANCIA SOCIAL	3
1.3.3 IMPLICANCIAS PRÁCTICAS	3
1.3.4 VALOR TEÓRICO	3
1.3.5 UTILIDAD METODOLÓGICA	4
1.4 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN	4
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	4
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.5 DELIMITACIÓN DEL ESTUDIO	5
1.5.1 DELIMITACIÓN ESPACIAL	5
1.5.2 DELIMITACIÓN TEMPORAL.....	5
1.5.3 DELIMITACIÓN CON RESPECTO A LOS MATERIALES.....	5
1.5.4 DELIMITACIÓN DE PRUEBAS	6
1.5.5 DELIMITACIONES SEGÚN LOS EQUIPOS UTILIZADOS	6



CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	7
2.1 ANTECEDENTES DE ESTUDIOS	7
2.1.1 ANTECEDENTES A NIVEL NACIONAL	7
2.1.2 ANTECEDENTES A NIVEL INTERNACIONAL	8
2.2 BASES TEÓRICAS	14
2.2.1 MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS	14
2.2.2 PANELES DE FIBROCEMENTO	16
2.2.3 EL <i>ICHU</i>	20
2.2.4 MATRIZ CEMENTICIA	24
2.2.5 INTERACCIÓN FIBRA – MATRIZ	25
2.2.6 ARRANCAMIENTO (<i>PULL-OUT</i>)	30
2.2.7 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE DATOS	46
2.3 HIPÓTESIS	47
2.3.1 HIPÓTESIS GENERAL	47
2.3.2 HIPÓTESIS ESPECIFICAS	47
2.4 VARIABLES	48
2.4.1 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES	48
2.4.2 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	49
2.5 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	50
CAPÍTULO 3: MÉTODO	51
3.1 ALCANCE DEL ESTUDIO	51
3.1.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	51
3.1.2 NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN	51
3.1.3 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	52
3.2 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	52
3.2.1 DISEÑO METODOLÓGICO.....	52
3.3 POBLACIÓN	52
3.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA POBLACIÓN.....	52
3.3.2 CUANTIFICACIÓN DE LA POBLACIÓN.....	53
3.4 MUESTRA	53
3.4.1 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA.....	53
3.4.2 CUANTIFICACIÓN DE LA MUESTRA.....	54



3.5	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	54
3.5.1	INSTRUMENTOS METODOLÓGICOS O INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	54
3.6	VALIDEZ Y CONFIABILIDAD DE INSTRUMENTOS.....	55
3.7	PLAN DE ANÁLISIS DE DATOS	55
3.8	ANÁLISIS EXPERIMENTAL.....	56
3.8.1	ELABORACIÓN DEL COMPUESTO FIBRA-MATRIZ	56
3.8.2	ENSAYO DE ARRANCAMIENTO (<i>PULL-OUT</i>)	59
3.9	ANÁLISIS NUMÉRICO.....	66
3.9.1	PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES Y PARÁMETROS COHESIVOS	66
3.9.2	MODELO NUMÉRICO	67
3.9.3	PROCESO DE CALIBRACIÓN	71
3.10	ANÁLISIS ANALÍTICO	74
3.10.1	DIAGRAMA FUERZA - DESPLAZAMIENTO	74
3.10.2	ESFUERZO NORMAL MÁXIMO EN LA FIBRA DURANTE EL ARRANCAMIENTO	76
3.10.3	LONGITUD CRÍTICA DE LA FIBRA.....	77
CAPÍTULO 4: RESULTADOS		78
4.1	RESULTADOS EXPERIMENTALES, NUMÉRICOS Y ANALÍTICOS.....	78
4.1.1	PROPIEDADES DE CONTACTO COHESIVO DE LA INTERFAZ FIBRA-MATRIZ.....	78
4.1.2	CURVA FUERZA – DESPLAZAMIENTO POR ARRANCAMIENTO DE FIBRA ÚNICA.....	78
4.1.3	PRECISIÓN DEL MODELO PREDICTIVO	80
4.1.4	ESFUERZO NORMAL EN LA FIBRA DURANTE EL ARRANCAMIENTO.....	80
4.1.5	LONGITUD CRÍTICA DE LA FIBRA DE <i>ICHU</i> EN LA INTERFAZ.....	81
4.1.6	ANÁLISIS MEDIANTE LA PRUEBA NO PARAMÉTRICA KRUSKAL WALLIS DE LA VARIABLE ARRANCAMIENTO.....	82
4.2	RESULTADOS RESPECTO A LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	83
4.3	RESULTADOS RESPECTO AL OBJETIVO GENERAL	85
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN		86
5.1	DESCRIPCIÓN DE LOS HALLAZGOS MAS RELEVANTES Y SIGNIFICATIVOS	86
5.2	LIMITACIONES DEL ESTUDIO.....	86
5.3	COMPARACIÓN CRÍTICA CON LA LITERATURA EXISTENTE	87
5.4	IMPLICANCIAS DEL ESTUDIO	89



CONCLUSIONES.....	89
RECOMENDACIONES.....	91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	98
VALIDACIÓN DE INSTRUMENTOS	150
ANEXOS	152



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: <i>Propiedades de adhesión interfacial de fibras con y sin tratamiento alcalino</i>	7
Tabla 2: <i>Composición de Stipa Obtusa (hoja) cruda, recolectada de Tinta (Cusco)</i>	20
Tabla 3: <i>Error en comparación con resultados analíticos para varias combinaciones de discretización/superficie esclava</i>	40
Tabla 4: <i>Cuadro de operacionalización de variables</i>	49
Tabla 5: <i>Plan de análisis de datos</i>	55
Tabla 6: <i>Dimensiones de diámetro de fibra y longitud embebida en antecedentes</i>	56
Tabla 7: <i>Área seccional de la fibra, fuerza máxima y esfuerzo de enlace friccional</i>	65
Tabla 8: <i>Magnitudes de los parámetros cohesivos de la interfaz</i>	67
Tabla 9: <i>Magnitudes de las propiedades mecánicas de los materiales, según Tenazoa (2020) y Mariscal (2001)</i>	67
Tabla 10: <i>Magnitudes de las dimensiones del compuesto de la interfaz</i>	68
Tabla 11: <i>Número de elementos y nodos usados en el modelo numérico</i>	69
Tabla 12: <i>Factor exponencial para el modelo numérico predictivo</i>	72
Tabla 13: <i>Magnitudes de las propiedades mecánicas de los materiales y de la interfaz utilizadas para el cálculo analítico, según Tenazoa (2020) y Mariscal (2001)</i>	74
Tabla 14: <i>Magnitudes de fuerza máxima y factores obtenidos del análisis analítico</i>	76
Tabla 15: <i>Magnitud de las propiedades de contacto cohesivo de la interfaz</i>	78
Tabla 16: <i>Magnitud de fuerza máxima experimental, aproximación analítica y numérico</i>	80
Tabla 17: <i>Esfuerzo normal máximo en la fibra durante el arrancamiento</i>	81
Tabla 18: <i>Magnitud de fuerzas del ensayo de arrancamiento experimental, numérico y analítico para el caso de 5 mm. De longitud de fibra embebida</i>	82
Tabla 19: <i>Esfuerzos de corte interfacial (IFSS), experimental, analítico y numérico</i>	83



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: <i>Efecto de la naturaleza de la fibra en el ensayo de pull-out.</i>	8
Figura 2: <i>Curvas de ensayos de extracción para las fibras sin aplicación de aceite.</i>	10
Figura 3: <i>Curva de fuerza-desplazamiento de prueba de extracción de fibra única para muestras de fibra tratadas y no tratadas.</i>	11
Figura 4: <i>Curva de extracción experimental versus predicción analítica de la curva de extracción de fibras lisas.</i>	12
Figura 5: <i>Carga máxima de los resultados de pull-out.</i>	14
Figura 6: <i>Estructura de la biomasa lignocelulósica.</i>	21
Figura 7: <i>Imágenes SEM de la superficie de Ichu (Stipa Obtusa) a) sin tratamiento y b) con tratamiento alcalino.</i>	22
Figura 8: <i>Imágenes SEM de la superficie seccional del Ichu (Stipa Obtusa) a) sin tratamiento y b) con tratamiento alcalino.</i>	23
Figura 9: <i>Diagramas de Esfuerzo - deformación de las fibras de Stipa Obtusa.</i>	23
Figura 10: <i>Variación de las propiedades de la fibra Stipa Obtusa (10 mm de longitud de calibre, velocidad de prueba de 0,5 mm / min) con el tiempo de tratamiento con álcali (a) Resistencia, (b) Módulo Elástico y (c) Deformación de falla.</i>	24
Figura 11: <i>Efecto Misfit matriz – fibra.</i>	27
Figura 12: <i>Zona cohesiva de Barenblatt cerca de una punta de grieta</i>	28
Figura 13: <i>Representación sintética de la prueba pull-out.</i>	30
Figura 14: <i>Curva típica de fuerza-desplazamiento para la prueba de extracción de fibra única.</i>	31
Figura 15: <i>Extracción de fibra de una fibra recta. (a) Relación de extracción entre deslizamiento final y carga para una fibra recta (b). La curva completa se muestra en (b) y (c) es un primer plano de la curva durante la etapa de desunión.</i>	34
Figura 16: <i>Efecto del esfuerzo cortante friccional en la interfaz en el proceso de arrancamiento.</i>	35
Figura 17: <i>Perfil de esfuerzos con diferentes condiciones de longitud crítica.</i>	36
Figura 18: <i>Discretización de contacto de nodo a superficie</i>	39
Figura 19: <i>Evolución lineal del daño.</i>	42
Figura 20: <i>Varias configuraciones de muestras utilizadas para medir la resistencia de la unión.</i>	45
Figura 21: <i>Esquema de la prueba de extracción de fibra única.</i>	45
Figura 22: <i>Extendido de fibra tratada en molde de silicona.</i>	57



Figura 23: Molde con fibras de Ichu y mortero recién vertido.	58
Figura 24: Molde con muestras acondicionado para el proceso de curado.	58
Figura 25: Muestra apta para el ensayo de arrancamiento (pull-out).	59
Figura 26: Prueba de arrancamiento (pull-out).	60
Figura 27: Curva representativa de los ensayos experimentales de arrancamiento.	61
Figura 28: Curvas fuerza – desplazamiento de los ensayos experimentales de arrancamiento (pull-out), grupo 1.	63
Figura 29: Curvas fuerza – desplazamiento de los ensayos experimentales de arrancamiento (pull-out), grupo 2.	64
Figura 30: Dimensiones del compuesto interfaz fibra de Ichu – matriz cementicia.	68
Figura 31: (a) Vista isométrica del modelo axismétrico con condiciones de frontera definidas (b) Enmallado del modelo numérico para el caso de fibra embebida de 5 mm.	70
Figura 32: Campos de esfuerzo cortante en la interfaz fibra – matriz en el instante en que se produce la desunión, en el plano X-Y ó 1-2.	70
Figura 33: Calibración de modelo numérico mediante la curva media experimental Fuerza – Desplazamiento.	72
Figura 34: Comparativa del diagrama Fuerza - Desplazamiento de los resultados Experimental, Numérico y Analítico para el caso de una fibra embebida de 5 mm.	76
Figura 35: Diagrama fuerza – desplazamiento, numérico y experimental.	78
Figura 36: Diagrama fuerza - desplazamiento de los resultados numéricos para los cinco casos de fibra embebida.	79
Figura 37: Comparativa del diagrama fuerza - desplazamiento de los resultados numéricos y analíticos para los cinco casos de fibra embebida.	79
Figura 38: Diagrama de esfuerzo normal para los cinco casos de fibra embebida.	81
Figura 39: Curva media experimental fuerza – desplazamiento con límites de variabilidad.	84



LISTADO DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

- a = Base exponencial
- b_i = Potencia resultante del caso i
- D_f = Diámetro medio de la fibra
- Dt_i = Desplazamiento total del caso i
- E_f = Módulo de elasticidad de la fibra
- E_m = Módulo de elasticidad de la matriz cementicia
- ε = Relación del Módulo elástico de la matriz y fibra
- ε_f = Deformación unitaria de la fibra
- F_{max} = Fuerza máxima en la fibra
- F_b = Fuerza de enlace friccional
- Fe_i = Factor exponencial del caso i
- G_d = Energía de desunión química
- σ_{uf} = Esfuerzo ultimo axial de la fibra
- L_d = Longitud de desunión
- L_e = Longitud de fibra embebida
- L_c = Longitud crítica de la fibra
- r_f = Radio de la fibra
- τ_s = Resistencia al corte interfacial
- AM = Altura de la matriz
- DM = Diámetro de la matriz
- $IFSS$ = Esfuerzo de corte interfacial
- LFL = Longitud de fibra libre
- LFE = Longitud de fibra embebida



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A inicios del siglo XX, el ingeniero austriaco Ludwig Hatschek elaboró las primeras planchas de fibrocemento utilizando fibras de amianto, según indica Cevallos (2011). En los últimos años se emplea una variedad de fibras, como: vidrio, acero, polímeros sintéticos y fibras naturales, es por ello, la necesidad de adaptar la idea a nuestro contexto, el país cuenta con una gran variedad de especies vegetales que tienen potencial para ser usados como fibras naturales en el fibrocemento, una de las más abundantes es el *Ichu*. Recientemente se ha desarrollado estudios numéricos y experimentales como: Bheemreddy et al. (2013), Ferreira et al. (2016), Leung et al (1999) y Li et al. (2009), los cuales caracterizan el potencial de las fibras en materiales compuestos, las fibras actúan interceptando las fisuras que se presenten, atenuando su propagación, evitando que las micro fisuras sigan aumentando. Las mejoras en la resistencia de los compuestos están principalmente relacionadas con el proceso de transferir la carga de la matriz a las fibras en el proceso de fisuramiento.

El arrancamiento de fibras es el principal mecanismo que aporta en la tenacidad del material por su capacidad de redistribuir las tensiones, en un proceso de arrancamiento de fibra se producen fuerzas que resisten el deslizamiento de la misma, estas fuerzas se originan en la adherencia y fricción entre la fibra y matriz, siendo lo recomendable según Shah et al. (1988) que se produzca el deslizamiento de la fibra, pues se produce disipación de energía y esto aporta en la tenacidad o ductilidad del material. Comprender los principales mecanismos que rigen el comportamiento de arrancamiento de una fibra de su matriz, los esfuerzos, los desplazamientos, los probables modos de falla y la longitud embebida de la fibra son muy importantes para generar materiales resistentes y dúctiles. Al utilizar la fibra de *Ichu*, se estaría realizando el valor material estructuralmente de esta planta nativa poco utilizada, pues, evitando el uso de fibras sintéticas se generaría un menor impacto ambiental e incentiva la utilización de materia prima de la zona, reduciendo costos en la fabricación de estos paneles, haciéndolos más accesibles.

La presente tesis aborda el análisis numérico y experimental de la interacción fibra de *Ichu* y matriz cementicia, donde se obtuvo las características de interacción de este compuesto, lo cual es uno de los objetivos específicos del proyecto de investigación “Fabricación de paneles de fibrocemento utilizando materiales obtenidos a partir de plantas endémicas del Perú” como parte del Proyecto de Investigación Aplicada y Desarrollo Tecnológico E041-2018-01-BM CONCYTEC-BANCO MUNDIAL.



1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMAS

1.2.1 Problema general

¿Cuáles son las características del tipo de curva carga - desplazamiento, del modo de falla, y la magnitud del esfuerzo de corte interfacial y de la longitud crítica de la fibra en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia mediante análisis numérico y experimental por arrancamiento (*pull-out*)?

1.2.2 Problemas específicos

PE - 1: ¿Cuál es la magnitud máxima del esfuerzo de corte interfacial generado por el arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia?

PE - 2: ¿Cuál es el tipo de curva carga – desplazamiento generado por el arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia?

PE - 3: ¿Cuál es el principal modo de falla generado por el arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia?

PE - 4: ¿Cuál es la longitud crítica de la fibra resistente a arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia?

1.3 JUSTIFICACIÓN

1.3.1 Conveniencia

Estudiar el comportamiento de paneles de fibrocemento reforzado con fibras de *Ichu*, es conveniente, pues, adapta un material de construcción al contexto de nuestro país, haciendo uso de materias primas de la zona, impulsando su posible fabricación, así como su utilización como material asequible, resistente y durable, lo cual tendría un potencial en la generación del desarrollo socioeconómico.

La presente investigación forma parte del proyecto denominado “Fabricación de paneles de fibrocemento utilizando materiales obtenidos a partir de plantas endémicas del Perú”, proyecto de investigación aplicada y desarrollo tecnológico, en la modalidad multidisciplinario; donde participan diferentes entidades, como la Universidad de Ingeniería y Tecnología, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, la Universidad de Sao Paulo y la Universidad Andina del Cusco, siendo cofinanciada por el CONCYTEC. El proyecto tiene un plazo máximo de ejecución de 30 meses, Habiendo iniciado en enero de 2019. La presente investigación se enfocará en el análisis numérico y experimental de la compatibilidad fibra de *Ichu* y la matriz cementicia en busca de las mejores características del compuesto.



1.3.2 Relevancia social

En la búsqueda de nuevos materiales que tengan un menor efecto contaminante y que cumplan las regulaciones ambientales. Por tanto, este estudio busca evaluar el uso de la planta *Ichu* (*Stipa Obtusa*) endémica del Perú, en diversas aplicaciones industriales vinculadas a la construcción, generando un material con gran potencial biodegradable y sostenible.

A través de diversos estudios se ha identificado que el *Ichu* presenta características que la hacen apta para ser utilizada como adición al cemento y como fibra vegetal para la elaboración de paneles de fibrocemento, de tal forma, se daría valor agregado a esta planta, además de estimular la producción de materiales de construcción, así como la economía de los pobladores de las zonas alto andinas y la generación de puestos laborales. Otro aspecto que favorece a estos pobladores es que tendrían a su disposición un producto de características similares o superiores a los que se comercializan, con la relevancia de que el producto se realizó utilizando materia prima de su región, generando una cadena de valor considerable.

1.3.3 Implicancias prácticas

La investigación estudio un problema real, pues, la necesidad de materiales nuevos y que estos sean elaborados a través de materia prima de la zona. Tiene implicancias que trascienden a nivel internacional, pues, se conoce que la presencia de la planta *Ichu* se extiende por los andes del continente.

1.3.4 Valor teórico

Con la investigación se conoció de manera objetiva, tanto a nivel numérico como experimental, cuáles son las condiciones ideales para la compatibilización de la fibra de *Ichu* con la matriz cementicia, por lo tanto, se podrá conocer de mejor manera el comportamiento de las fibras naturales en una matriz cementicia, esto se podrá replicar, la elaboración de estos paneles de fibrocemento se dará con la intención de que se pueda producir de manera comercial. La información obtenida servirá como antecedente para futuros estudios sobre la compatibilización de fibras naturales en paneles de fibrocemento. El proceso en la simulación numérica del ensayo de arrancamiento (*pull-out*) será también un aporte importante, pues, no se tiene conocimiento de antecedente alguno sobre una simulación numérica para esta fibra en particular.



1.3.5 Utilidad metodológica

Para el estudio fue necesario realizar análisis numéricos y experimentales que ayudaran a validar los resultados, al finalizar el estudio se obtendrá el conocimiento primordial que ayudara a elaborar un panel de fibrocemento resistente y duradero, el cual podrá ser replicado para su fabricación, es necesario mencionar que las propiedades mecánicas a utilizar para el procesamiento numérico, serán obtenidas del análisis experimental que se realiza a los compuestos en el proyecto “Fabricación de paneles de fibrocemento utilizando materiales obtenidos a partir de plantas endémicas del Perú”, donde, una de los objetivos del referido proyecto es obtener las propiedades físico mecánicas de los compuestos de la interfaz matriz cementicia – fibra de *Ichu*.

1.4 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo general

Determinar las características del tipo de curva carga - desplazamiento, del modo de falla, y la magnitud del esfuerzo de corte interfacial y de la longitud crítica de la fibra en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia mediante análisis numérico y experimental por arrancamiento (*pull-out*).

1.4.2 Objetivos específicos

OE - 1: Determinar la magnitud máxima del esfuerzo de corte interfacial generado por el arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia.

OE - 2: Determinar el tipo de curva carga – desplazamiento generado por el arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia.

OE - 3: Determinar el principal modo de falla generado por el arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia.

OE - 4: Determinar la longitud crítica de la fibra resistente a arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia.

Nota 1: Las propiedades mecánicas de la fibra y matriz, en cuanto al esfuerzo normal último de la fibra, módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson fueron obtenidos del reporte de resultados de Tenazoa (2020) que pertenece a los estudios previos del proyecto general de investigación, del cual también forma parte el presente estudio. Otras de las propiedades mecánicas necesarias para realizar la calibración del modelo numérico son



las propiedades de la interfaz; el esfuerzo de corte interfacial y la rigidez cohesiva de la interfaz, las cuales fueron obtenidas a partir de las pruebas experimentales.

Nota 2: La razón para determinar la curva carga – desplazamiento, es para demostrar el tipo de respuesta no lineal de la interfaz de matriz cementicia y fibra de *Ichu*, así como identificar los principales puntos clave, tales como límite de proporcionalidad, límite elástico, fuerza máxima y modo de falla en el deslizamiento.

1.5 DELIMITACIÓN DEL ESTUDIO

Las limitaciones de la investigación se clasifican en limitaciones espacial, temporal, de materiales, de pruebas y según los equipos utilizados.

1.5.1 Delimitación espacial

La investigación se desarrolló en diferentes ciudades del Perú; en los laboratorios de la Universidad de Ingeniería y Tecnología de ciudad de Lima se desarrolló la producción de los paneles de fibrocemento, así como los respectivos ensayos experimentales *pull-out* y en la ciudad de Cusco se dio el procesamiento numérico.

1.5.2 Delimitación temporal

La investigación se desarrolló en el transcurso de quince meses, comprendido entre noviembre del 2019 y marzo del 2021.

- Se limita a realizar un curado de las muestras hasta los 7 días.
- Se limita a la obtención de la curva carga - desplazamiento de las muestras de concretos curados durante 7 días.

1.5.3 Delimitación con respecto a los materiales

- Se limita al uso de cemento portland tipo I de la marca CEMENTOS SOL.
- Se limita al uso de Cal molida de la marca COMACSA.
- Se limita al uso de agua destilada
- Se limita al uso de solución de Hidróxido de Sodio al 0.5 Molar.
- Se limita al uso de Fibra de *Ichu* tratado



1.5.4 Delimitación de pruebas

- Se limita a realizar el test de arrancamiento (*pull-out*) según Redon et al. (2001).

1.5.5 Delimitaciones según los equipos utilizados

- Se limita al uso de una maquina universal para el ensayo de arrancamiento (*pull-out*).
 - ✓ Celda de carga: 10 N.
 - ✓ Velocidad de desplazamiento: 0.02 mm/s.
- Se limita al uso de la cámara climática modelo TT-5566 de la marca Asli, que permite controlar las condiciones ambientales.
 - ✓ Temperatura: 60°C.
 - ✓ Humedad relativa: 90%.



CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE ESTUDIOS

2.1.1 Antecedentes a nivel nacional

a) En el informe de Tenazoa et al. (2018), se resume lo siguiente:

El estudio consistió en evaluar las propiedades de adherencia interfacial de fibras como el *Ichu* y la cabuya utilizando una matriz cementicia, para ello, se realizaron pruebas de arrancamiento (*pull-out test*) de la fibra usando un texturómetro. Las probetas fueron elaboradas en un molde especialmente diseñado para este tipo de análisis, posteriormente, estas fueron curadas en un baño térmico a 60 °C. Las pruebas de arrancamiento fueron realizadas tanto para fibras sin tratamiento como para las fibras tratadas con hidróxido de sodio a condiciones óptimas, esto con la finalidad de comparar si el tratamiento mejoró o no, la adhesión de la fibra a la matriz. Los resultados muestran que las fibras de *Ichu* sin tratamiento presentan altas propiedades de adhesión, comparadas a las fibras de *Ichu* tratadas, ver Tabla 1.

Tabla 1: *Propiedades de adhesión interfacial de fibras con y sin tratamiento alcalino*

Fibras	Esfuerzo de enlace friccional (EEF)		Energía de enlace químico	
	Promedio (MPa)	Desviación Estándar (MPa)	Promedio (N/mm)	Desviación Estándar (N/mm)
<i>Ichu</i> sin tratamiento	0.39	0.03	25.31	1.35
<i>Ichu</i> con tratamiento	0.09	0.03	8.76	1.60

Fuente: Adaptado de Tenazoa et al. (2018)

Tenazoa et al. (2018) llegaron a las siguientes conclusiones: En el caso del *Ichu*, la fibra sin tratamiento presenta mejores propiedades de interfase, es decir, se obtuvo una mayor resistencia al esfuerzo cortante de enlace friccional, así como una mayor energía de enlace químico en comparación a la fibra de *Ichu* que fue tratada con hidróxido de sodio. Los resultados obtenidos por Tenazoa et al. (2018) son muy relevantes como referencia para la presente tesis, pues, es el único antecedente respecto a la ejecución de la prueba de arrancamiento para la fibra de *Ichu*.

2.1.2 Antecedentes a nivel internacional

a) En el artículo de investigación de Pacios et al. (1997), se resume lo siguiente:

El trabajo investiga el efecto de la variación del tipo de fibra, su geometría, su dimensión, las modificaciones de la matriz y la velocidad de desplazamiento en el comportamiento de la interfase. Se utilizó una técnica experimental que permite utilizar la misma configuración del ensayo de *pull-out* en una prensa universal quasi-estática y un péndulo Charpy. En el estudio analiza la diferencia entre una fibra de acero y otra de nylon, en la Figura 1 se observa la comparación de los resultados obtenidos.

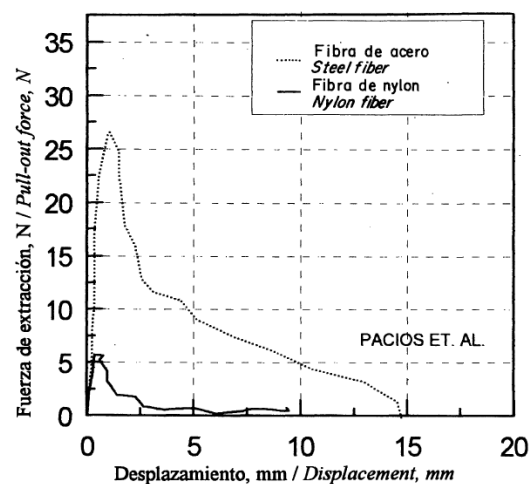


Figura 1: Efecto de la naturaleza de la fibra en el ensayo de *pull-out*.

Fuente: Pacios et al. (1997).

Pacios et al. (1997) llegaron a las siguientes conclusiones:

La caracterización de la interfase debe ser conocida para evaluar el comportamiento mecánico de los hormigones reforzados con fibras.

Se ha utilizado probetas con fibras metálicas y con fibras de nylon, observándose que dada la menor adherencia que las fibras sintéticas tienen con matrices de cemento, se recomienda aumentar la rigidez de la probeta, mejorando la naturaleza de la matriz o utilizando siempre grupos de fibras. La carga máxima es menor para las fibras de nylon, la deformación correspondiente a ese punto es mayor, dada la alta deformabilidad de la fibra.

La adherencia se puede mejorar modificando la composición de la propia matriz o actuando sobre el elemento de refuerzo. Si mejoramos la matriz con la incorporación de una adición mineral que da lugar a una matriz más densa y, por



consiguiente, con una mejor adherencia, se consiguen aumentar las resistencias hasta en un 100%. Al aumentar la inclinación de la fibra y la velocidad de carga, también se modifican las fuerzas de adherencia.

El estudio de Pacios et al. (1997) muestra la variación de la respuesta carga - desplazamiento en función de la naturaleza de la fibra evaluada y nos establece referencias respecto a las magnitudes de resistencia de la interfaz fibra – matriz.

b) En el artículo de investigación de Redon et al. (2001), se resume lo siguiente:

Se realizó una prueba de extracción de fibra única para medir las propiedades de unión de la interfaz de las fibras de alcohol polivinílico (PVA) de varios diámetros en una matriz de mortero. A pesar de las longitudes cortas de empotramiento de las fibras, todavía es posible determinar una energía de desunión química, y el esfuerzo interfacial inicial de unión por fricción. Durante la extracción de la fibra, se presentó un fuerte efecto de endurecimiento en el deslizamiento, caracterizado por los altos valores de la carga en el deslizamiento, generando daño por abrasión.

Las fibras no se rompieron durante el desprendimiento químico de la fibra, pero si durante la extracción de la fibra, un fuerte efecto de endurecimiento en el deslizamiento (ver Figura 2) y daño por abrasión severa; visible bajo microscopio electrónico de barrido en la superficie de la fibra. Como consecuencia, cuando se excedió la resistencia a la tracción aparente de la fibra, las fibras se rompieron por delaminación. Finalmente, se intentó reducir los valores de las propiedades de unión para minimizar la rotura de la fibra durante la extracción. Este objetivo se logró parcialmente aplicando una capa de aceite para reducir cualquier interacción fuerte entre fibra y mortero.

En la Figura 2 de Redon et al. (2001) nos presenta siete curvas de ensayos experimentales correspondiente a compuestos de las mismas características, con la particularidad de que las fibras tienen una longitud embebida de 5 mm., se observa la variabilidad en la respuesta durante el deslizamiento, sin embargo, en la totalidad de curvas es evidente un deslizamiento por endurecimiento o *hardening*.

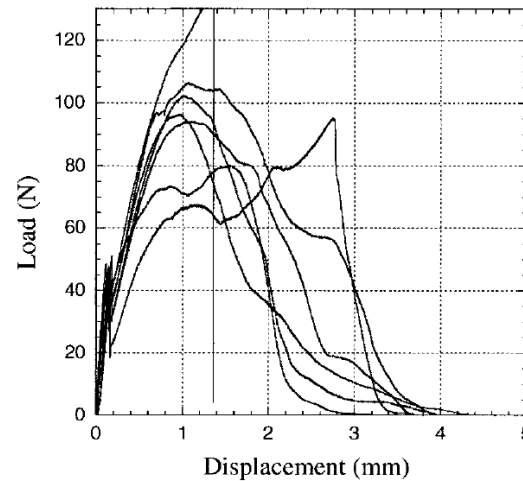


Figura 2: Curvas de ensayos de extracción para las fibras sin aplicación de aceite.

Fuente: Redon et al. (2001).

En el estudio de Redon et al. (2001) se llegaron a las siguientes conclusiones: Las mediciones de las propiedades de enlace interfacial de las fibras de PVA en la matriz de mortero cementicio o *Engineered Cementitious Composites* (ECC) han demostrado que el enlace químico en PVA/mortero es fuerte. La fuerza de unión por fricción inicial no causa ninguna rotura de fibra en estas muestras de extracción, de hecho, la unión fibra/matriz más dañina ocurre durante el régimen de deslizamiento por endurecimiento. El efecto de endurecimiento durante el deslizamiento podría ser tan fuerte que las tensiones generadas en la fibra de PVA pueden exceder su aparente resistencia a la tracción y evita que toda la fibra se desprenda, incluso para longitudes de empotramiento tan bajas como 0.80 mm.

El efecto de endurecimiento se produce durante el deslizamiento cuando se registra fuerzas superiores a la fuerza máxima de adherencia química, esto debido a diversos factores, como el estrechamiento de la matriz o la abrasión de la matriz lo que conduce a un atascamiento de la fibra con las partículas sueltas de la matriz.

Se debe garantizar el despegado completo de la fibra para obtener un compuesto tan dúctil como sea posible. Es necesario entender cómo y por qué el proceso de abrasión dañaría a la fibra de PVA para evitar la delaminación a través de todo el espesor de las fibras de pequeño diámetro.

c) En el artículo de investigación de Li et al. (2009), se resume lo siguiente:

El estudio analiza la fibra de cáñamo, polipropileno (PP) y polipropileno tratado con hongos de pudrición blanca (MAPP), para ello, se elaboró probetas



compuestas para su ensayo a tracción. Se midieron las propiedades de resistencia de las fibras tratadas y no tratadas y sus compuestos. Las distribuciones de longitud de fibra en el compuesto se obtuvieron utilizando la matriz PP/MAPP en xileno hirviendo para poder extraer la fibra, tanto la prueba de extracción de una sola fibra como la prueba de Bowyer y Bader, se determinó la resistencia al corte interfacial (IFSS) de estos compuestos, se encontró que para la prueba de extracción de fibra única, la resistencia al corte interfacial es menor, se consideró que se debía en gran medida a la carga de la fibra y la contracción de Poisson resultante que se produce durante esta técnica. Esto sugiere que el modelo de Bowyer y Bader proporciona un valor más relevante de IFSS para compuestos. Los resultados obtenidos de ambos métodos demostraron que el IFSS de los compuestos de fibra tratados fue de mayor magnitud que el obtenido para compuestos de fibra sin tratar. Esto respalda que la unión interfacial de la fibra de cáñamo con PP fue mejorada por el tratamiento de hongos de pudrición blanca.

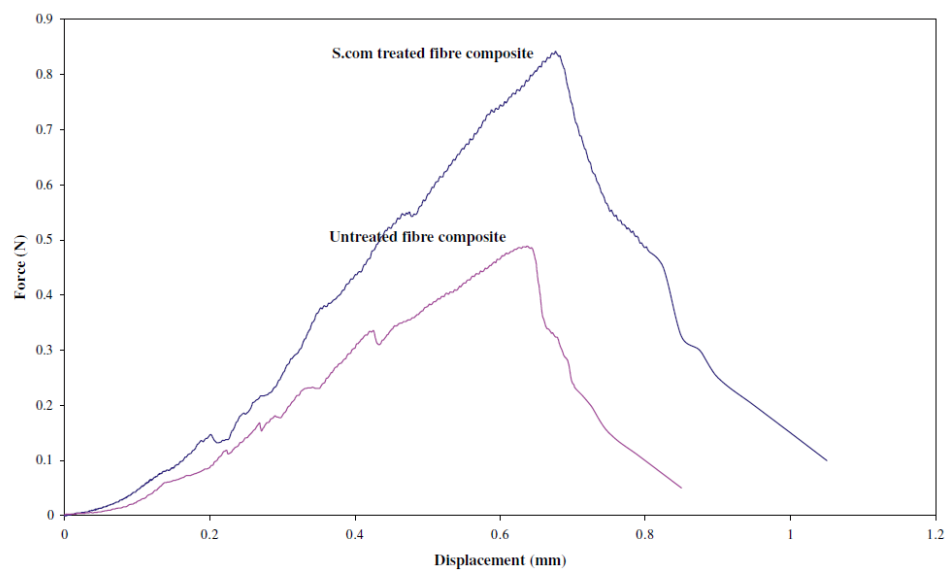


Figura 3: Curva de fuerza-desplazamiento de prueba de extracción de fibra única para muestras de fibra tratadas y no tratadas.

Fuente: Li et al. (2009).

Li et al. (2009) llegaron a las siguientes conclusiones: Aunque la prueba de extracción de fibra única y el método Bowyer y Bader arrojó resultados diferentes, esto no es sorprendente considerando las diferentes condiciones y supuestos de estas pruebas, sin embargo, tanto la prueba de extracción de fibra única como el modelo de Bowyer y Bader proporciona un IFSS más alto para compuestos de fibra tratados con



hongos de pudrición blanca que el de los compuestos de fibra sin tratar. Esto respalda que el tratamiento de hongos de pudrición blanca aumenta la unión interfacial entre la fibra y la matriz, lo que probablemente se deba a la eliminación de sustancias no celulósicas y compuestos como cera, pectina y lignina, así como el aumento de la rugosidad de las superficies de las fibras.

El estudio de Li et al. (2009) es un referente muy importante, pues evalúa el esfuerzo de corte interfacial para fibras tratadas, en este caso en particular con una sustancia natural, además, realiza la comparación de este esfuerzo obtenido mediante el ensayo de *pull-out* y el método de Bowyer y Bader.

d) En el artículo de investigación de Naaman et al. (1991), se resume lo siguiente:

El estudio analiza la relación adherencia-tensión-deslizamiento entre fibras de acero y matrices a base de cemento. El problema en consideración es el de una prueba de extracción donde una fuerza se aplica en la punta de la fibra incrustada en una longitud de un cuerpo de cemento. El aumento en el valor de la carga conduce a una progresiva desunión a lo largo de la interfaz fibra-matriz. Una vez que la desunión alcanza el extremo incrustado de la fibra, se observa un mecanismo dinámico de extracción, un desplazamiento en el extremo libre y también se acompaña de un desplazamiento en el extremo integrado. En la Figura 4 se presenta una comparación entre el modelo analítico y el resultado experimental obtenido por Naaman et al. (1991).

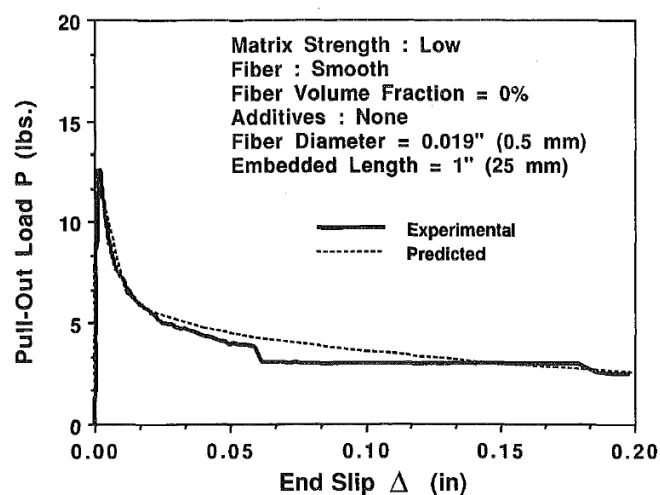


Figura 4: Curva de extracción experimental versus predicción analítica de la curva de extracción de fibras lisas.

Fuente: Naaman et al. (1991).



Naaman et al. (1991) llegaron a las siguientes conclusiones: Se observó una buena concordancia entre el resultado experimental y lo previsto, las curvas predichas sugieren que la contribución de la porción ascendente de la curva de tenacidad o absorción de energía es muy pequeña en comparación a la contribución de la porción descendente. Esto enfatiza la significativa contribución a la energía de extracción del mecanismo de fricción de extracción y sugiere que se preste especial atención a su comprensión y modelado en el futuro. Las curvas de tensión versus deslizamiento dieron como resultado valores muy altos del módulo de adherencia, indicando que el deslizamiento interfacial correspondiente al esfuerzo cortante máximo es muy pequeño. Esto implica que la interfaz sólo puede soportar un diferencial muy pequeño antes de que se rompa el componente de adhesión de la unión.

El estudio de Naaman et al. (1991) nos describe el comportamiento hallado en la curva carga – desplazamiento, además de realizar la comparativa del resultado experimental con su formulación analítica.

e) En el artículo de investigación de Gray (1984), se resume lo siguiente:

En el estudio se obtienen resultados experimentales de pruebas de extracción de una sola fibra en muestras con diferentes longitudes de empotramiento de fibra, que consisten en un alambre de acero revestido de latón como fibra y un mortero cementoso como matriz, la fibra tenía un diámetro de 0.38 mm y una resistencia a la tracción de 2550 MPa. la cual se limpió con tricloroetano.

La matriz de mortero cementoso está constituida por cemento Portland normal y agregado natural fino. Las muestras se moldearon horizontalmente, con la fibra incrustada perpendicular a la dirección de colada, cada una de las cinco longitudes de empotramiento de fibra examinados, se prepararon ocho especímenes y fueron probadas después de curar en agua durante 28 días.

El estudio de Gray (1984) concluye con lo siguiente: Para esta combinación de fibra/matriz, la resistencia total a la separación interfacial aparentemente consiste en uniones adhesivas. Los resultados indican que no hay resistencia a la fricción en el deslizamiento para fibras de longitudes embebidas inferiores de 2 a 3 mm. Los resultados muestran una considerable dispersión, como se observa comúnmente en la prueba de extracción para muestras de matriz cementosa, por lo tanto, la relación entre carga máxima de extracción y la longitud de empotramiento de la fibra representada

por estos resultados, está abierto a varias interpretaciones. La carga máxima de extracción parece ser directamente proporcional a longitud de fibra incrustada.

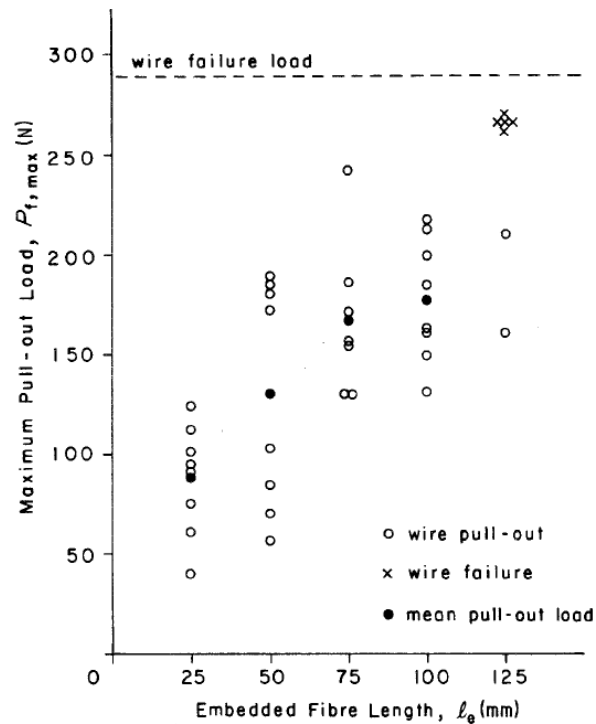


Figura 5: Carga máxima de los resultados de pull-out.

Fuente: Gray (1984).

El estudio de Gray (1984) no muestra que cuando se incrementa la longitud de fibra embebida en una matriz cementicia, la magnitud de la carga máxima de la curva fuerza – desplazamiento se incrementa proporcionalmente a dicha longitud.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Materiales compuestos reforzados

Para Gay et al. (2002) un material compuesto revela un material que es diferente a materiales heterogéneos comunes. Actualmente los materiales compuestos se refieren a materiales que contienen fibras fuertes, continuas o no continuas, rodeadas por un material más débil llamado matriz. La matriz sirve para distribuir las fibras y también para transmitir la carga a las fibras.

Gay et al. (2002) indica: Los materiales compuestos no son nuevos. Se han utilizado desde la antigüedad. La madera y la mazorca han sido compuestos cotidianos. También se han utilizado compuestos para optimizar el rendimiento de algunas armas



convencionales. Por ejemplo: En los arcos de los mongoles, los elementos comprimidos están hechos de maíz y los elementos sometidos a esfuerzos de tracción están hechos de madera y tendones de las vacas pegados entre sí.

Un material compuesto según Gonzalez et al. (2010) se considera como un material multifase; donde se compone por fases químicas distintas, divididas por una superficie. El material compuesto puede obtener propiedades que sus materiales independientemente no obtendrían, la fase continua corresponde a la matriz y la fase dispersa compete al material de refuerzo o fibras. En un material compuesto, la matriz transmite la fuerza hacia el refuerzo, el cual también colabora en retardar la propagación de fisuras y grietas, proveyendo una mayor resistencia mecánica.

Para Gonzalez et al. (2010) las principales características de un material compuesto son las propiedades físicas de los materiales que la compongan y la fuerza de adherencia entre ambos, otro de los agentes que inciden en la obtención de las magnitudes de las propiedades de adhesión son los métodos de ensayo utilizados, así como el volumen de material de refuerzo contenido en la fase continua, la orientación de la fase dispersa y su longitud.

Según Uberti (2012) los materiales compuestos se utilizan en diferentes campos de la industria, especialmente su uso se expandió en el área de la construcción. Sus principales usos se dan en la fabricación de planchas de fibrocemento, materiales plásticos reforzados, estructuras de concreto, pavimentos, etc.

Para Uberti (2012) el incremento de la tenacidad en un material compuesto se basa en diversos procesos y efectos como: *debonding* (despegue de la interfaz fibra-matriz), *pull-out* (extracción de fibra de la matriz), *slip* (deslizamiento), *spalling* (fragmentación de la matriz en la zona de salida de la fibra de la matriz) y *aparent strength* (fuerza de ruptura de la fibra).

Los materiales compuestos según Arias et al. (2004) están conformados por materiales insolubles el uno en el otra, al generar un material compuesto puede adquirir propiedades mejoradas como, por ejemplo: mayor relación resistencia-densidad o rigidez-densidad. El ejemplo más conocido de material compuesto es el concreto armado; conformado por una matriz de naturaleza silíceo y reforzada con varillas de acero que suministran al compuesto resistencia a la tracción y tenacidad. El refuerzo del compuesto por lo general es el material rígido, mientras que la matriz suele tener una resistencia menor.



2.2.2 Paneles de fibrocemento

La norma NTP-ISO 8336 (1999) indica: Las planchas planas de fibro-cemento consisten esencialmente de un aglomerante hidráulico inorgánico o un aglomerante de silicato cálcico formado por la reacción química de un material silíceo y un material calcáreo reforzado por fibras orgánicas y/o fibras sintéticas inorgánicas. Pueden añadirse: auxiliares de proceso, cargas y pigmentos los cuales son compatibles con el cemento reforzado con fibra.

Para Gonzalez et al. (2010) un material compuesto es; donde las fibras se pueden disponer en forma difusa, podría contener más de un tipo de fibra. La longitud de las fibras varia de 1 a 40 mm.

Los materiales de origen cementicia según Gonzalez et al. (2010) poseen baja resistencia a la tracción en comparación con su resistencia a compresión, es por ello, que se ha venido buscando incorporar materiales que ayuden a mejorar su tenacidad, actualmente se han utilizado refuerzos de origen inorgánico (aluminio, asbestos, vidrio, carbón, nylon, polipropileno y acero) y orgánico (cáscara de arroz, sisal, madera, maíz, etc.).

Para Cevallos (2011) la idea del fibrocemento se origina en el año 1900 por el Ing. Ludwig Hatschek, cuando elaboro una mezcla de cemento portland y fibras de amianto para fabricar planchas ligeras y resistencias.

Cevallos (2011) indica: La construcción de paredes conformadas por paneles no portantes montados sobre una estructura o esqueleto de sostén, es una solución que tiene gran acogida, las principales razones son las siguientes:

- Rapidez de montaje y desmontaje
- Características térmicas y acústicas
- Bajo peso y adaptabilidad al diseño
- Fácil manejo y trabajabilidad.

La norma ASTM C1186 (2002) describe las especificaciones estándar para láminas planas de fibrocemento sin asbesto, uno de los aspectos a considerar para el desarrollo experimental es la tolerancia en la dimensión de las muestras, la norma menciona lo siguiente al respecto:

Tolerancia de espesor: la diferencia máxima entre valores extremos de la medición del espesor dentro de una no excederá el 15% del valor máximo medido.



2.2.2.1 Cemento

El cemento es el componente básico para la preparación de paneles de fibrocemento.

Pasquel (1998) lo define de la siguiente manera: Es un aglomerante hidrófilo, derivado de la calcinación de rocas calizas, areniscas y arcillas, para obtener a través de moliendas un polvo muy fino que en presencia de agua y un proceso químico se solidifica adquiriendo propiedades resistentes y adherentes.

Cemento Portland

Para Rivva (2000) el cemento portland se genera por la trituración del Clinker Portland y la adición de sulfato de calcio y otros materiales que no superan el 1% en peso total.

a) Características

Según Abanto (2009) es un polvo de color gris a verdoso. Su venta comercial se da mediante bolsas que tienen un peso neto de 42.5 kg. o un pie cúbico en volumen.

b) Composición

Portugal (2007) indica: Los principales componentes del cemento son: cal, sílice, alúmina y óxido de hierro. Durante la fabricación, estos materiales generan productos como: silicatos cálcicos, aluminatos cálcicos y ferritos, hasta alcanzar un equilibrio químico.

Para Abanto (2009) el cemento portland está compuesto esencialmente de silicatos de calcio hidráulicos que conforman más 90% en peso del cemento. Estos compuestos influyen en el comportamiento del cemento.

- Silicato tricálcico ($3CaO.SiO_2$)
- Silicato dicálcico ($2CaO.SiO_2$)
- Aluminato tricálcico ($3CaO.Al_2O_3$)
- Aluminato ferrita tricálcica ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$)

Cemento Portland Tipo I

Kosmatka et al. (2004) indica: Existen diversos tipos de cemento Portland para diferentes aplicaciones. Los cementos Portland se fabrican según las especificaciones ASTM C150, AASHTO M85 o ASTM C1157. La norma ASTM C150 (*Standard Specification for Portland Cement*), clasifica en ocho a los cementos Portland, como: Tipo I, Tipo IA, Tipo II, Tipo IIA, Tipo III, Tipo IIIA, Tipo IV y Tipo V.



Según Kosmatka et al. (2004) el tipo I es un cemento para uso general, adecuado para todos los usos. Se emplea para para la elaboración de pavimentos, pisos, edificios en concreto armado, puentes, tanques, embalses, tubería, unidades de mampostería y productos de concreto prefabricado y precolado.

2.2.2.2 Agua

Definición

Según ASOCRETO (2010) el agua es la sustancia que produce el desarrollo de las propiedades conglomerantes del cemento además de generar la hidratación de sus moléculas, una vez conformada la mezcla se genera la pasta o mortero.

Para Torre (2004) el agua potable y las aguas que carezcan de sabor y olor tienen potencial para ser utilizadas para preparar concreto o morteros.

Tipos de agua

a. Agua de amasado

Según Torre (2004) el agua de amasado cumple dos competencias en el mortero, primero interviene en la reacción de hidratación del cemento y según la cantidad otorga el nivel de trabajabilidad. La porción de agua debe restringirse al mínimo necesario, pues, el exceso de agua genera una trama de poros capilares que harán disminuir la resistencia del mortero.

b. Agua de curado

Según ASOCRETO (2010) en el momento que el mortero ha fraguado, este requiere una provisión de agua para asegurar la hidratación de las partículas de cemento. Las condiciones ideales contemplan sostener el mortero en condición saturada.

Requisitos de calidad

Para Portugal (2007) la calidad del agua utilizada debe satisfacer los requisitos solicitados en la norma NTP 339.088 y de preferencia agua potable. En caso de utilizar agua no potable se deben realizar análisis.



2.2.2.3 Fibras

Para Irías (2013) las fibras son materiales de refuerzo de corta longitud y reducida sección que se integra a una masa continua o matriz. Se pueden clasificar como fibras estructurales (proporcionan una mayor energía de rotura al concreto), o como fibras no estructurales (no se considera en el cálculo la mejora que otorgan, como: control de la fisuración, resistencia al fuego, resistencia a la abrasión, impacto y otros).

Según Uberti (2012) la fibra tiene una función de valla contra la difusión de grietas, algunas fibras pueden llegar a fallar antes que se produzca la fractura del compuesto, lo cual no se produce hasta que un gran número de fibras hayan fallado, por ello, la resistencia final del compuesto dependerá de la resistencia de unión entre la fibra y la matriz.

Para Pacios et al. (1997) una fibra con forma recta tiene una menor resistencia a la extracción a diferencia de fibras con ganchos, donde además de la adherencia superficial se genera un anclaje mecánico en los extremos. Cuando la carga aplicada supera la carga máxima resistente de la interfaz, el comportamiento en la curva carga desplazamiento es similar al de fibras con ganchos, puesto que la adherencia se debe a las fuerzas de fricción. Cuando se usan fibras con forma ondulada o con ganchos en sus extremos la tenacidad del compuesto se incrementa considerablemente.

2.2.2.3.1 Clasificación

Isla (2014) y MACCAFERRI (2007) mencionan que existen diferentes tipos de fibras y se pueden clasificar en función de la materia prima por la cual están producidas, por sus propiedades mecánicas, propiedades físico/químicas, por su longitud y también según su forma geométrica. La clasificación de BISFA (*the international bureau for the standardisation of man-made fibres*) se da a continuación:

- **Por material:** Naturales (amianto (asbesto), celulosa, carbón). Metálicas (Aceros de carbono y ligados, aluminio). Sintéticas (nylon, polipropileno, poliacrilo nitrilo, polivinil alcohol).
- **Por sus propiedades físico/químicas:** Rugosidad superficial, densidad, estabilidad química, no-reactividad con la matriz cementicia, resistencia al fuego, etc.
- **Por sus propiedades mecánicas:** Módulo de elasticidad, resistencia a tracción, rigidez, ductilidad, etc.
- **Por su geometría:** forma en la dirección longitudinal y la forma de la sección.



2.2.3 El Ichu

Según Frías et al. (2020) el pasto *Ichu* es una planta lignocelulósica (compuesta principalmente de lignina, celulosa y hemicelulosa), que crece profusamente en la región altoandina, zonas de países como Perú, Bolivia y Ecuador. La hierba *Ichu* tiene multitud de atributos, como: Es una planta endémica de la zona que crece abundantemente en forma natural sin competir con otros cultivos y cuyo costo de cosecha es muy bajo.

Para Mori et al. (2018) de todos los componentes, la cantidad de celulosa es la más importante, porque las propiedades mecánicas de las fibras dependen de él. La muestra de *Ichu* (*Stipa Obtusa*) cruda tiene un contenido de celulosa de ~ 38%, que puede considerarse alto (de las materias primas). No obstante, niveles de contenido de celulosa similares puede observarse en fibras procesadas / tratadas como bambú, bonote y paja de trigo. Por otro lado, el contenido de lignina del material foliar probado es algo bajo si se compara al de otras fibras procesadas, el componente resistente de la fibra de *Ichu* lo otorga la celulosa y la lignina cumple el papel de cementante y de relleno entre las fibras de celulosa. La muestra de hoja de *Ichu* probada tiene una cantidad considerable de fibra internamente con diámetros de entre 10 y 20 μm .

La composición química del pasto *Ichu* según Mori et al. (2018), se muestra en la Tabla 2.

Según Albarracín et al. (2015) las hojas del *Ichu* (*Stipa Obtusa*) tienen la siguiente composición: celulosa 45.9% y lignina 18.2%, además, declara que dicha composición no es exacta pues estas características dependerán de la parte de la planta evaluada, de su origen y las condiciones durante su desarrollo.

Tabla 2: *Composición de Stipa Obtusa (hoja) cruda, recolectada de Tinta (Cusco)*

Componentes	Stipa Obtusa	
	Promedio (%)	DS (%)
Celulosa	38.07	0.91
Hemicelulosa	26.52	1.21
Lignina	15.56	0.72
Otros extractivos	14.57	0.06
Despojos	4.36	0.17
Total	99.08	-
Humedad	9.33	0.12

Fuente: Adaptado de Mori et al. (2018)



2.2.3.1 Fibra de *Ichu*

En Tenazoa et al. (2019) mencionan que el *Ichu* (*Stipa obtusa*) es una especie de hierba que crece abundantemente en las alturas o zonas andinas, que se ha utilizado como material de construcción y se utiliza como alimento para animales. La Figura 6 muestra la estructura de una fibra natural, las fibras lignocelulósicas se componen principalmente de lignina, hemicelulosa, celulosa y de extractos que pueden ser sales, azúcares, polisacáridos, grasas, ceras, cenizas y resinas en el exterior de la pared celular. La capa interna contiene celulosa, que proporciona fuerza, rigidez y estabilidad a las plantas. En contraste con las estructuras de la lignina y la hemicelulosa, que son amorfas.

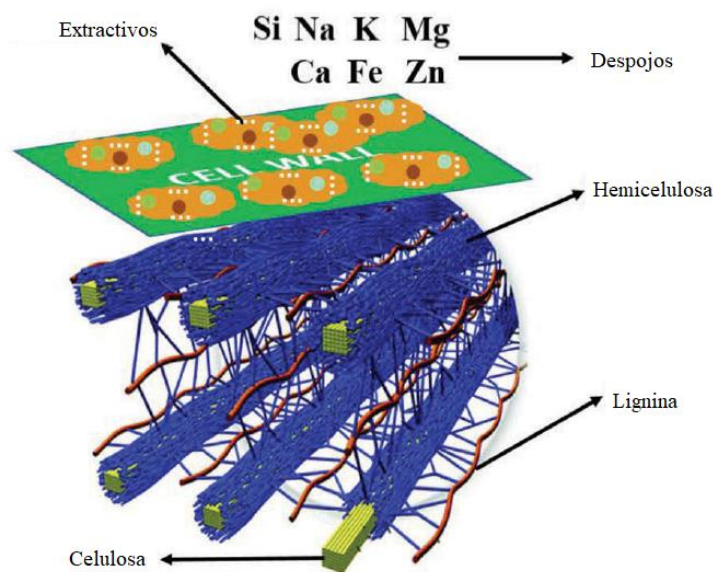


Figura 6: Estructura de la biomasa lignocelulósica.

Fuente: Adaptado de <http://genomics.energy.gov>

Para Tenazoa et al. (2019) las fibras naturales extraídas tienen poca compatibilidad con diferentes materiales, por lo tanto, antes de adicionarlo en una matriz, deben tratarse para eliminar extractos superficiales, lignina y hemicelulosa. Esto aumenta el porcentaje de celulosa, mejora las propiedades mecánicas de las fibras y la compatibilidad con la matriz. Existen diferentes métodos para tratar la fibra, donde los procesos mecánicos, químicos, físico-químicos y los tratamientos biológicos son los principales medios de preparación. Uno de los más estudiados es el tratamiento químico conocido como "mercerización" o tratamiento alcalino, que consiste en tratar fibras lignocelulósicas en una solución alcalina.

Según Tenazoa et al. (2019) el tratamiento alcalino de fibras lignocelulósicas conduce a la eliminación parcial de componentes no celulósicos y sustancias

hidrofóbicas, tales como lignina, pectina y resinas, además de las ceras naturales que cubren la superficie externa de la pared celular de la fibra. El tratamiento con álcalis cambia drásticamente la superficie de estas fibras se vuelven más ásperas y limpias. Los resultados demuestran que las fibras tratadas de *Ichu* tienen potencial para tener compatibilidad química si se utilizan como refuerzo en materiales compuestos.

En Mori et al. (2019) nos muestran mediante imágenes SEM la superficie del *Ichu* (*Stipa Obtusa*) sin tratamiento y con tratamiento alcalino (ver Figura 7), en la Figura 8 nos presenta la vista seccional de la fibra de *Ichu* sin tratamiento y con tratamiento alcalino.

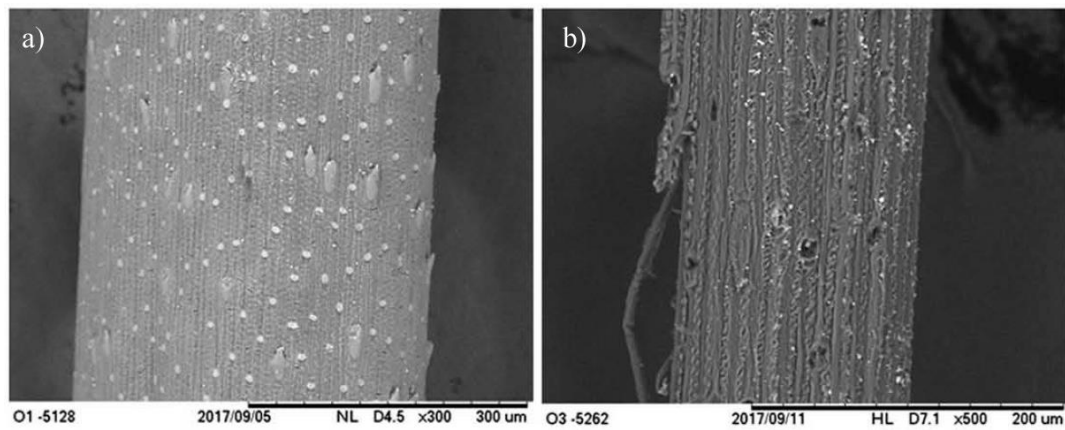


Figura 7: Imágenes SEM de la superficie de *Ichu* (*Stipa Obtusa*) a) sin tratamiento y b) con tratamiento alcalino.

Fuente: Adaptado de Mori et al. (2019).

Candiotti et al. (2020) describe el procedimiento para realizar el tratamiento alcalino a hojas de *Ichu* a continuación: El tratamiento alcalino de la materia prima se realiza utilizando una solución de hidróxido de sodio (0,5 M NaOH, diluido en agua destilada), manteniendo una temperatura constante de 70 °C. Después del proceso del tratamiento y limpieza, las fibras se mantuvieron en el agua destilada para separar fácilmente las fibras utilizando pinzas quirúrgicas. Después, las fibras se mantuvieron a 60 °C dentro de un horno durante 24 h con el fin de eliminar el contenido de humedad. Las fibras secas se pegaron en lengüetas de papel con el adhesivo Loctite 495 y se deja curar durante 24 horas a condiciones de laboratorio (65% HR y 21 °C), donde el promedio del contenido de humedad fue de alrededor del 7.96%.

Las magnitudes de las propiedades mecánicas de la fibra de *Ichu* tratada obtenidas por Candiotti et al. (2020) se observan en la Figura 10, a continuación se describe como se obtuvieron dichas propiedades:

Los ensayos de tracción se realizaron de acuerdo con ASTM C1557-14 y ASTM D3822 – 14 en una muestra de 40 fibras para cada condición estudiada, en la Figura 9 se muestra el diagrama esfuerzo – deformación resultante de los ensayos de tracción, donde las curvas rojas muestran un comportamiento no lineal debido al excesivo tiempo de tratamiento con álcali (5 h). Utilizando una máquina universal MTS *Exceed* modelo E42 con una celda de carga de 10 N. siguiendo las pautas de los estándares, el módulo inicial se determinó a partir de la línea lineal inicial. región en el rango de deformación de 0,1 a 0,3%. El área de sección transversal (CSA) de las fibras naturales son muy irregulares, por lo que se midió la CSA de las fibras probadas. después del ensayo de tracción con un microscopio óptico (*Olympus GX51*, y su propio software de medición *OLYMPUS Stream*).

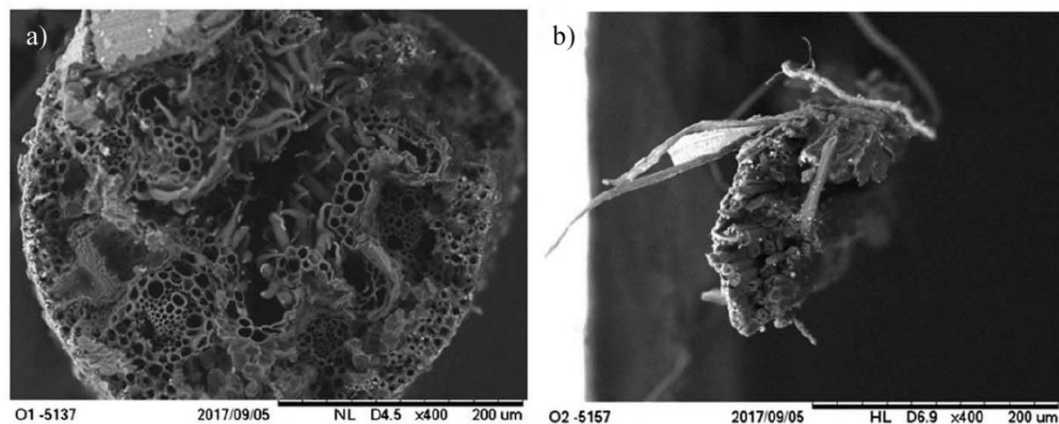


Figura 8: Imágenes SEM de la superficie seccional del Ichu (*Stipa Obtusa*) a) sin tratamiento y b) con tratamiento alcalino.

Fuente: Adaptado de Mori et al. (2019).

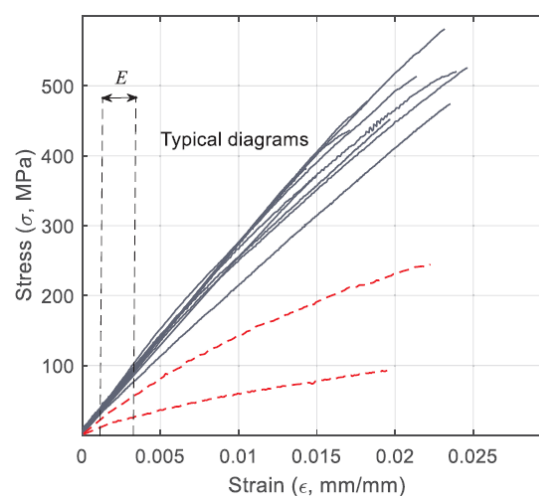


Figura 9: Diagramas de Esfuerzo - deformación de las fibras de *Stipa Obtusa*.

Fuente: Candiotti et al. (2020).

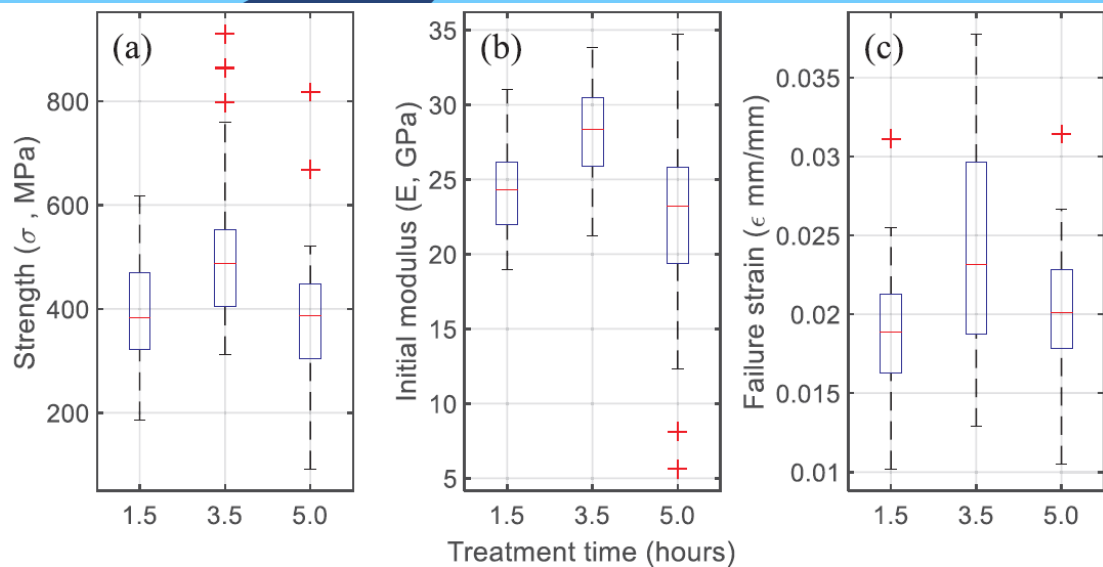


Figura 10: Variación de las propiedades de la fibra *Stipa Obtusa* (10 mm de longitud de calibre, velocidad de prueba de 0,5 mm/min) con el tiempo de tratamiento con álcali (a) Resistencia, (b) Módulo Elástico y (c) Deformación de falla.

Fuente: Candiotti et al. (2020).

El diámetro obtenido de las fibras de Ichu estudiadas por Candiotti et al. (2020) es $d_1 = 71,11 \pm 13,49 \mu\text{m}$, mientras que el diámetro de las fibras incrustadas es $d_2 = 71,38 \pm 16,42 \mu\text{m}$, demostrando una pequeña variación en el diámetro de la sección de la fibra una vez ensayada a la prueba de tracción.

Según Mori et al. (2019) la rugosidad de las superficies de las hojas crudas de *Stipa Obtusa* después del tratamiento alcalino obtuvo un mayor grado de desfibrilación (RMS de $28,78 \pm 6 \text{ nm}$). Estas rugosidades se obtuvieron estableciendo el área escaneada a $10 \mu\text{m}^2$, en esta área ($10 \mu\text{m}^2$) la rugosidad termina de aumentar y comienza a estabilizarse.

2.2.4 Matriz cementicia

Para Uberti (2012) la matriz cementicia denominada fase continua, es la que alberga a la fibra o fase dispersa. Para que el compuesto tenga una mejor eficiencia será necesario que la matriz posea un módulo de elasticidad menor al de la fibra, con el fin de evitar que durante el arrancamiento las fibras fallen antes que su adherencia con la matriz.

Según Martínez (2016) una de las normas para guía en la elaboración de mortero es la ASTM C 270. La cantidad mínima para determinar la resistencia a la compresión de la matriz cementicia son por lo menos cinco especímenes.



Curado o Hidratación

Para Neville (2013) el curado es el proceso que promueve la hidratación de las partículas de cemento; radica en el control de la temperatura y humedad desde la superficie hacia dentro del mortero mediante la saturación del elemento cementicio.

La norma NTP 339.033 (1999) nos describe el procedimiento del curado: En las primeras 24 horas, las muestras deberán almacenarse en un entorno con la temperatura entre los 16 °C y 27 °C y se evite la disminución de humedad.

2.2.5 Interacción fibra – matriz

Según Tenazoa et al. (2018) las propiedades de los compuestos reforzados con fibras lignocelulósicas están relacionadas con las propiedades individuales de sus componentes, sin embargo, la interfase fibra-matriz también juega un rol importante. En general, las fallas mecánicas de estos compuestos se deben principalmente al arrancamiento, desprendimiento y rotura de la fibra. El desprendimiento y arrancamiento de la fibra en la interfase, tiene una influencia significativa en la absorción total de energía durante la propagación de grietas. De hecho, el rol de la matriz en un compuesto reforzado con fibra, es transferir la carga a las fibras rígidas a través de esfuerzos cortantes en la interfase. Este proceso requiere de una buena interacción entre la matriz cementicia y las fibras, ya que una mala adherencia con la interfase, significa que no se pueden explotar todas las capacidades del material compuesto, además, lo deja vulnerable a ataques medioambientales que podrían debilitarlo, lo cual reduciría su tiempo de vida.

En el caso del *Ichu*, para Tenazoa et al. (2018) la fibra sin tratamiento presenta mejores propiedades de interfase en comparación a la que fue tratado con hidróxido de sodio. De acuerdo a las imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) (ver Figura 7 y Figura 8), partículas de sílice amorfa fueron encontradas en la superficie del *Ichu* sin tratamiento. Durante la hidratación del cemento Portland se genera silicato tricálcico, este compuesto colma los poros intersticiales, reduciendo la permeabilidad de la matriz cementicia, lo cual ayuda en la compatibilidad fibra-matriz.

Según Pacios et al. (1997) el comportamiento de los compuestos dependerá del tipo de matriz, ya sea cementicia u orgánica. En los materiales compuestos con matriz de cemento, la matriz es la primera en fallar, pues tiene la menor deformación en la fractura. Con este tipo de matriz o matrices una buena adherencia entre las fibras y la matriz no es necesariamente deseable. Se ha demostrado que la resistencia mecánica y la tenacidad del material compuesto aumentan significativamente cuando la adherencia falla y se produce el arrancamiento de la fibra.



Para Paniagua et al. (2008) la magnitud del nivel de refuerzo que aporta una fibra en un compuesto está en función de las propiedades de adhesión en la interfaz fibra-matriz, pues esta cumple el cometido de transferir la carga de la matriz hacia las fibras.

Según Li et al. (1997) una de las primeras técnicas utilizadas para modificar el enlace interfacial entre fibra polimérica y la matriz cementosa se realiza mediante fibrilación de fibras. El proceso de fibrilación logra dos objetivos: aumenta la superficie específica de contacto y mejora el anclaje mecánico de la matriz de cemento. Un factor de 3 o más puede ser logrado en la mejora de la fuerza de unión cuando la fibra ha sido fibrilada

Modelo de Naaman para fibras lisas alineadas

En Isla (2014) se describe el modelo propuesto por Naaman et al. (1991) a continuación:

Tiene en cuenta dos procesos, en la primera etapa se produce la separación de la fibra y se producen deformaciones elásticas y deslizamiento en la interfaz. En la segunda etapa se produce el deslizamiento de la fibra, donde se considera un movimiento de cuerpo rígido.

Proceso de despegue fibra-matriz

En Isla (2014), Naaman et al. (1991) obtienen un modelo de despegue para fibras lisas a partir de la formulación que considera lo siguiente: la transferencia de fuerza se produce de la fibra hacia la matriz, comportamientos elásticos y el diferencial en la deformación fibra y matriz.

Proceso de deslizamiento fibra-matriz

En Isla (2014), Naaman et al. (1991) menciona que en la interfaz fibra – matriz se producen deformaciones y presiones laterales, las cuales influyen en la transferencia de esfuerzos, valora tres tipos de efectos laterales:

- Confinamiento de la fibra por parte de la matriz por la retracción de fragua y deformaciones por cambios de temperatura.
- Efecto Poisson originado por el confinamiento de la fibra por la matriz adyacente.
- Deformaciones en la fibra producidas por la deformación de la matriz.

Para Isla (2014) de los tres efectos mencionados, el que tiene mayor influencia es la contracción de la matriz alrededor de la fibra, ello genera una presión que logra fijarla, este efecto suele ser llamado *misfit* y se define como: La diferencia entre el radio de la abertura de la matriz sin la fibra y el radio de la propia fibra. En la Figura 11 se sintetiza el efecto *misfit*, donde α es la profundidad que invade la matriz y $\varnothing f$ corresponde al diámetro de la fibra.

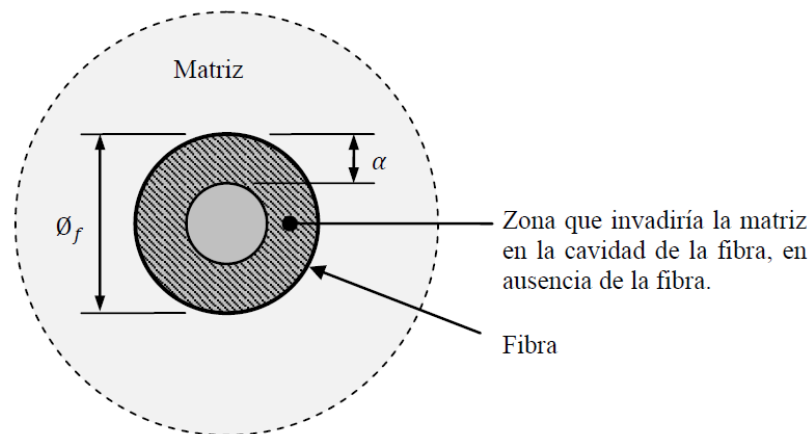


Figura 11: *Efecto Misfit matriz – fibra.*

Fuente: Isla (2014).

Según Isla (2014) durante la extracción de la fibra, el efecto *misfit* va reduciéndose debido a la abrasión, compactación del mortero y las partículas en la superficie de la fibra. Generalmente se produce en fibra de acero, por su mayor rigidez frente a una matriz cementicia.

Modelo de Barenblatt

- Según Sun et al. (2012), Barenblatt propuso un concepto de zona cohesiva para estudiar la fractura de materiales frágiles, con el objetivo de introducir un mecanismo de separación a nivel atómico para describir la separación real de materiales, y para eliminar la singularidad de tensión de la punta de la grieta. Barenblatt creía que las superficies de grietas en la región de la punta están tan cerca que puede tratarse como dos capas atómicas sostenidas por las fuerzas de unión atómicas, como se muestra en la Figura 12.

Para Sun et al. (2012) la teoría de la fractura frágil de Barenblatt se basa en las siguientes tres hipótesis básicas:

- Existe una zona cohesiva cerca de la punta de la grieta donde las caras superior e inferior están sostenidas por la llamada tracción cohesiva, que tiene una magnitud del orden de hasta la resistencia teórica del sólido. El tamaño de la zona cohesiva es mucho más pequeño que la longitud de la grieta.
- El tamaño de la zona cohesiva y la distribución y magnitud de la tracción cohesiva al inicio del crecimiento de la grieta son independientes de la geometría de la grieta y de las cargas externas.
- Las tensiones son finitas en todas partes, incluida la punta de la grieta, es decir, no existe ninguna singularidad de tensión en la punta de la grieta.

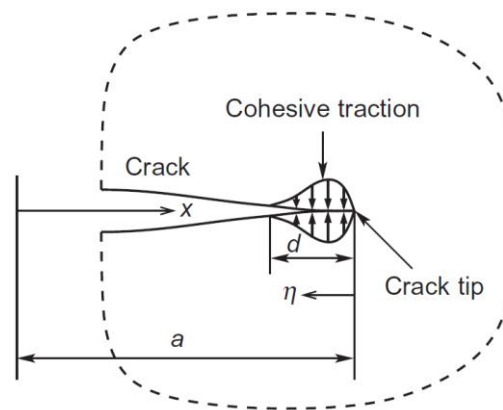


Figura 12: Zona cohesiva de Barenblatt cerca de una punta de grieta

Fuente: Sun & Jin (2012).

Modelo de zona Cohesiva

El modelo de zona cohesiva para Ferreira et al. (1943) consiste en una relación constitutiva entre las tracciones que actúan sobre el interfaz y las distancias de separación correspondientes, es decir, salto de desplazamiento a través de la interfaz. El uso de zona cohesiva permite un mejor control sobre el proceso de despegado. Tan pronto como se complete la separación final, comenzará el proceso de extracción.

Para Sun et al. (2012) El concepto más difícil de aceptar en la mecánica de fractura elástica lineal (LEFM) es el hecho de que las tensiones en la punta de la grieta son infinitamente grandes o singulares. Esta singularidad de tensión resulta de la representación del continuo elástico lineal de los materiales y del supuesto de una grieta perfectamente afilada. Dado que la singularidad de la tensión contradice nuestra intuición sobre la falla de los materiales, se han realizado esfuerzos para introducir formas de eliminar la singularidad de la tensión en la punta de la grieta. Adoptar un comportamiento inelástico en sólidos es una extensión natural de la LEFM para evitar la singularidad de



la tensión. Un enfoque algo diferente hacia el mismo objetivo es el modelo de zona cohesiva, que agrega una zona de espesor de fuga por delante de la punta de la grieta con la intención de describir de manera más realista el proceso de fractura sin el uso de la singularidad de tensión. La zona cohesiva se idealiza como dos superficies cohesivas, que se mantienen juntos por una tracción cohesiva. La rotura del material se caracteriza por la separación completa de las superficies cohesivas y el proceso de separación se describe mediante una ley cohesiva que relaciona la tracción cohesiva y el desplazamiento relativo de las superficies cohesivas. Por lo tanto, se produce una extensión de la grieta física cuando el desplazamiento de separación en la cola de la zona cohesiva (punta de la grieta física) alcanza un valor crítico. Una de las ventajas clave que ofrece el modelo de zona cohesiva es que tiene un mecanismo intrínseco de disipación de energía de fractura en contraste con la mecánica de fractura clásica basada en un continuo para la cual tal mecanismo está ausente.

Según Roshdestwensky et al. (2013) La falla en materiales compuestos se puede representar mediante leyes cohesivas, específicamente por la ley de tracción – separación, que explica la capacidad de carga en función de la separación, independientemente de los daños que se puedan producir en la matriz o fibra.

2.2.5.1 Pruebas

Para estudiar la interacción fibra-matriz se puede realizar diferentes pruebas, a continuación, Paniagua et al. (2008) mencionan lo siguiente al respecto:

Métodos directos: Ensayos de pull-out (ver Figura 13), de flexión, de compresión, de microindentación. Mediante estos ensayos se puede medir la adhesión en la interfaz fibra – matriz, la energía necesaria para la fractura de la interfaz y además evidenciar el tipo de falla. Estos ensayos se encuentran en la categoría de pruebas micromecánicas.

Según Paniagua et al. (2008) los métodos indirectos comprenden: ensayos de compresión en rebanadas, pruebas de compresión con esfera, fabricación y ensayo mecánico de compuestos laminares. Estos ensayos realizan un análisis cualitativo.

Para Pacios et al. (1997) experimentalmente, se han utilizado para su caracterización ensayos de compresión en una probeta entallada, ensayos de flexión y ensayos de pull-out (extracción) y push-out (introducción) de las fibras. Cada uno de ellos presenta una serie de ventajas y desventajas. El ensayo de compresión, por ejemplo, requiere técnicas acústicas de detección de fallos o inspección visual, el de flexión no proporciona una medida real de la resistencia de la interfase y es, de entre todos, el ensayo de extracción de fibras el más representativo y, por lo tanto, el más desarrollado.

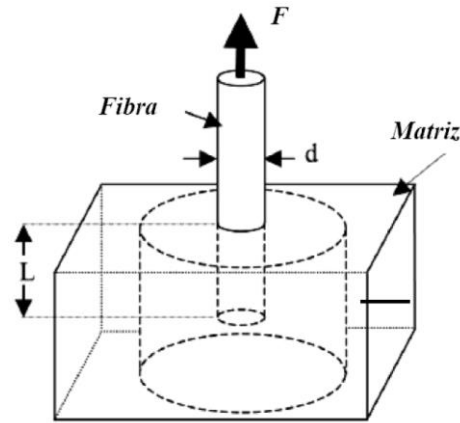


Figura 13: Representación sintética de la prueba pull-out.

Fuente: Paniagua et al. (2008).

2.2.6 Arrancamiento (*Pull-out*)

La prueba de extracción de una sola fibra según Li et al. (2009) es una técnica comúnmente utilizada para medir la resistencia al corte interfacial (IFSS), en la que el extremo de una fibra está incrustado en un bloque de matriz que se sostiene mientras se tira de la fibra mientras se registra la carga versus el desplazamiento para dar la curva "pull-out". La prueba de extracción de fibra única ofrece una serie de importantes ventajas prácticas: en primer lugar, es una medida directa de la resistencia interfacial, en segundo lugar, solo requiere pequeñas cantidades de fibra y matriz, y, en tercer lugar, la fuerza de desprendimiento se puede graficar como una función de desplazamiento y recopilar información sobre el proceso de falla, por ejemplo: una caída repentina en la carga aplicada indica una falla frágil, sin embargo, la prueba de extracción de fibra se basa en muestras de fibra única y no refleja el proceso de falla dentro de un compuesto. Sin embargo, en general, el valor de IFSS de la prueba de extracción se considera que da una buena indicación de la adhesión interfacial para compuestos de fibras naturales.

En la Figura 14 se puede ver una curva típica de fuerza-desplazamiento, donde según Li et al. (2009) se puede considerar en tres partes ($F < F_d$, $F_d < F < F_{max}$ y $F > F_{max}$) correspondiente a las diferentes etapas involucradas en la extracción, donde F es la fuerza aplicada, F_d es la fuerza crítica a la que se inicia el desprendimiento, y F_{max} es la carga máxima. Durante la primera parte ($0 < F < F_d$), se considera que la curva representa elástico lineal comportamiento del sistema fibra-matriz y de la interfaz fibra-matriz permanece intacta. Para la segunda etapa ($F_d < F < F_{max}$), después del inicio, el desprendimiento se produce mediante la propagación de grietas a lo largo de la longitud de la fibra. La fuerza aplicada sigue aumentando debido a la adherencia restante de la

parte intacta de la interfaz y la presencia de fuerzas de fricción entre la fibra y la matriz. Después de alcanzar una carga máxima (F_{max}), la propagación de grietas se vuelve inestable y la toda la longitud de la fibra incrustada se despega por completo. La tercera parte se produce después de que ha tenido lugar el despegado completo, donde la fuerza restante se debe a interacciones de fricción entre la fibra y la matriz (F_b). La aparente resistencia al cizallamiento interfacial IFSS se pueden calcular utilizando la Ecuación (1):

$$\tau_s = \frac{F_{max}}{2\pi r L_e} \quad (1)$$

Donde: F_{max} fuerza máxima, r radio de la fibra, L_e Longitud de fibra embebida.

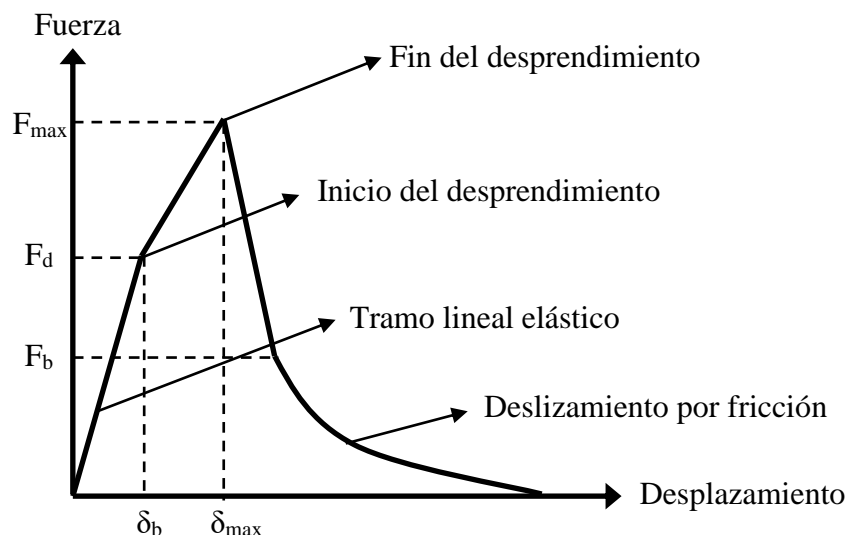


Figura 14: Curva típica de fuerza-desplazamiento para la prueba de extracción de fibra única.

Fuente: Adaptado de Li et al. (2009).

Diversas investigaciones predicen la curva del ensayo *pull-out*, en particular Alwan et al. (1991), quienes la clasifican en tres regiones: I) Región precrítica, durante la cual la fibra se asume unida elásticamente a la matriz, la carga es menor a la carga crítica. II) Región de desprendimiento parcial, durante la cual solo una parte de la fibra está unida y el comportamiento se rige principalmente por el máximo esfuerzo cortante de adherencia y el esfuerzo cortante por fricción inicial. III) Región de extracción, durante la cual la fibra está completamente desunida y prevalece el mecanismo de fricción; esta región está controlado por cizallamiento de fricción que podría asumirse constante o en



descomposición mediante la introducción de un adecuado coeficiente de daño. Es importante mencionar que solo en esta etapa se desprecia la deformación de la matriz y el deslizamiento relativo entre la fibra y la matriz se puede tomar como aproximadamente igual al desplazamiento final de la fibra.

La curva carga – desplazamiento según Li et al. (1995) incluyen una parte lineal correspondiente al proceso de desunión en el mismo principio y una parte no lineal, que cubre la mayor parte de una curva de extracción, que representa el proceso de extracción. La forma cóncava hacia abajo de la rama no lineal indica un comportamiento de endurecimiento por deslizamiento del desprendimiento de fibras causado por el efecto de abrasión. Debido al efecto de abrasión entre las fibras y la matriz de cemento, la superficie de la fibra está dañada y pelada en pequeñas fibrillas. Estas pequeñas fibrillas contribuyen a su vez a la resistencia contra la fibra de ser arrancada. Debido a este mecanismo, la unión por fricción promedio por lo tanto aumenta con la distancia de extracción.

Según Pira (2016) para el arrancamiento de la fibra se tienen diversos criterios que puede clasificar en los siguientes planteamientos: I) Teoría basado en el rezago de cortante, asume que la falla comienza cuando la resistencia a cortante es excedida. II) Teoría basado en la mecánica de la fractura, asume que la ruptura de la interface se propaga tan pronto la energía alcanza un valor crítico de disipación.

Para Roshdestwensky et al. (2013) la falla más importante se produce en la interfaz, pues si la adherencia es frágil la transmisión de cargas disminuye. La resistencia de la adhesión entre la fibra y la matriz se puede evaluar a través de ensayos de extracción de fibra, estas pruebas tienen una alta complicación para su realización, pues se dan a nivel micro mecánico y se requieren instrumentos de precisión.

Li et al. (1997) menciona: Si en la interfaz fibra-matriz hay un desajuste debido a la contracción de la matriz y produce tensiones de fricción relacionadas con la presión de contacto, La compactación de la microestructura interfacial conducirá a decadencia gradual y, por tanto, una decadencia gradual de las tensiones de fricción.

Efecto de la longitud de fibra

El efecto de la longitud de la fibra según Li et al. (1998) muestra que a medida que aumenta la longitud de la fibra la fuerza de extracción aumenta. La rigidez inicial de adhesión de la interfaz es independiente de la longitud de la fibra. El desprendimiento de la fibra se produce al mismo nivel de fuerza de extracción, y la respuesta se vuelve no lineal a partir de entonces. La capacidad de carga más allá de este nivel aumenta en función de la longitud de la fibra. Después de la interfaz completamente desunida, la



fuerza de extracción cae a una constante de esfuerzo cortante por fricción, definido por la ley de fricción de Coulomb clásico.

Para longitudes embebidas mayores que un cierto valor crítico según Pacios et al. (1997) la fibra se fracturará. Para longitudes menores de la longitud crítica la fibra se arrancará y la resistencia a cortante de la interfase se puede calcular por un sencillo equilibrio de fuerzas. Durante el ensayo se registra la evolución de la carga frente al desplazamiento.

Para Isla (2014) el ensayo *pull-out* está compuesto por dos etapas, primeramente, la fibra se desune de la matriz por pérdida de adherencia, la interfaz se comporta elásticamente en toda su longitud, luego se desarrolla un comportamiento plástico y se produce en un rango corto de desplazamiento y es donde se logra llegar a la carga máxima, para luego producirse una caída en la magnitud de la carga que corresponde a la fuerza de enlace friccional, producida la caída de carga, una vez que toda la interfaz se rompe inicia la segunda etapa que consiste en la extracción de la fibra, esta se desliza y la transferencia de tensiones se da por la fricción y va disminuyendo a medida que la fibra es extraída. En la primera etapa se puede considerar que hay un pequeño deslizamiento en las regiones con la interfaz rota producto de la deformación axial de la fibra, este deslizamiento se considera despreciable comparado con el de la segunda etapa.

En la Figura 15 se muestra una curva de extracción típica para una fibra recta. Según Löfgren (2005) la parte ascendente (OA) está asociado con la unión elástica o adhesiva. En parte de la curva (AB), el desprendimiento se inicia y progresa hasta que ocurre el desprendimiento completo (B). Posteriormente, la fibra se desliza (B-F) y la única resistencia ofrecida es la unión por fricción; La carga disminuye al aumentar el deslizamiento como resultado de la disminución de la longitud de la fibra incrustada y debido a la fricción que se descompone por deslizamiento. La energía disipada es igual al área bajo la curva de carga-desplazamiento; ver Figura 15b. Por lo tanto, la energía de extracción (tanto desunión y fricción) aumenta en función de la longitud embebida de la fibra, a menos que la longitud embebida sea demasiado larga y la fibra se rompe.

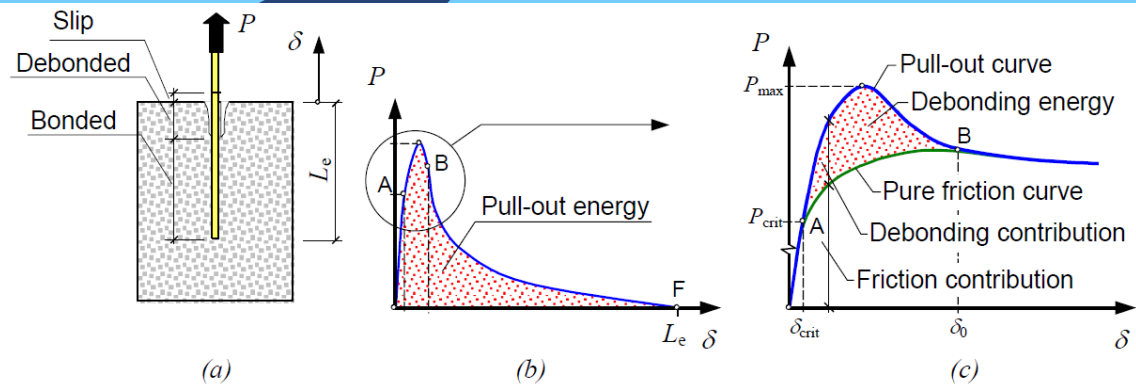


Figura 15: Extracción de fibra de una fibra recta. (a) Relación de extracción entre deslizamiento final y carga para una fibra recta (b). La curva completa se muestra en (b) y (c) es un primer plano de la curva durante la etapa de desunión.

Fuente: Löfgren (2005).

Fricción

Durante el deslizamiento de la fibra según Pira (2016) se produce el esfuerzo de fricción a causa de la abrasión y el proceso de compactación. En la Figura 16 se muestra tres posibles casos de comportamiento de la carga en función del desplazamiento, en la Figura 16a se asume que el esfuerzo de corte interfacial es igual al esfuerzo de enlace friccional, anulando la transferencia de esfuerzos y generándose la falla o arrancamiento. En el caso de la Figura 16b el esfuerzo de enlace friccional es menor al esfuerzo de corte interfacial. El deslizamiento inicia al alcanzar el esfuerzo de enlace friccional y se produce transferencia de esfuerzos generando disipación de energía dentro del rango inelástico. En la Figura 16c, la resistencia de enlace friccional es nulo se produce por la fragilidad de la capa de adherencia química lo que produce una falla súbita, no existe disipación de energía o transferencia de esfuerzos, después de alcanzar la carga máxima.

En general, según Lin et al. (1996) el esfuerzo cortante de la interfaz dependiente del deslizamiento se puede atribuir a la abrasión de la superficie de la fibra, desgaste por aspereza, fragmentación de recubrimientos de la fibra en la interfaz desunida, debido a la dureza relativamente baja de las fibras poliméricas, la abrasión puede ocurrir cuando las fibras intentan deslizarse contra la matriz circundante rugosa con mayor dureza. Los restos de fibra, que a menudo se observan en forma de fibrillas desnudas, se acumulan en la interfaz desvinculada a medida que aumenta el deslizamiento y crean un efecto "bloqueo" que dificulta el deslizamiento de la fibra y, por lo tanto, aumenta el cizallamiento de la interfaz.

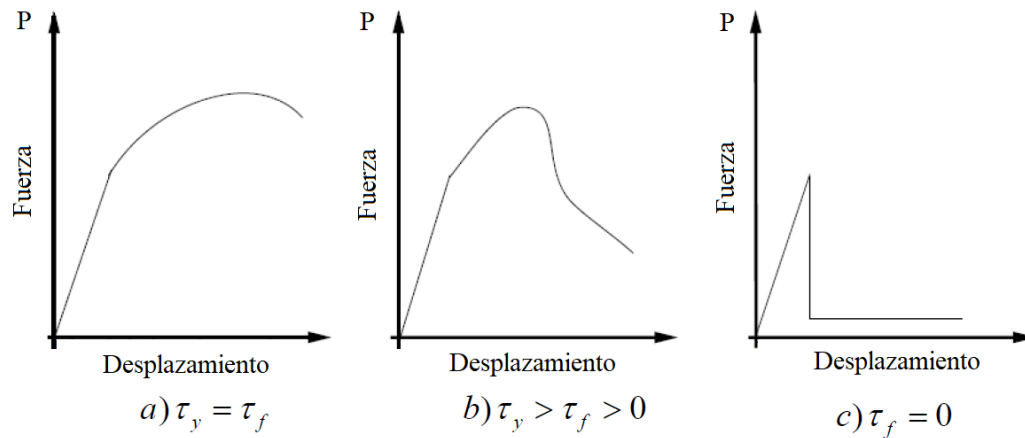


Figura 16: Efecto del esfuerzo cortante friccional en la interfaz en el proceso de arrancamiento.

Fuente: Adaptado de Pira (2016).

El porcentaje de esfuerzo de fricción residual según Li et al. (1997) generalmente se ha asumido para ser una constante, lo que resulta en una línea descendente post-pico correspondiente a la extracción de fibra. Sin embargo, cada vez hay más evidencia que sugiera que este parámetro puede ser modificado por procesos de daño ya sea en la fibra o en la matriz a medida que la fibra se desliza en la etapa posterior a la desunión. El daño de la fibra puede ocurrir durante el deslizamiento por abrasión superficial. Este proceso de fibrilación in situ durante la extracción de la fibra provoca el atasco de la fibra y da como resultado una mayor carga de extracción.

Longitud crítica

A cierta distancia de la fibra según Pira (2016) el esfuerzo normal se hace máximo y coincide con la distancia donde el esfuerzo cortante de la interfaz es nulo.

Para Mármol (2010) la longitud de fibra crítica depende del diámetro de la fibra, de la resistencia a la tracción y de la resistencia de la interfaz fibra-matriz.

En la Figura 17 según Pira (2016) cuando la longitud de la fibra es igual a la longitud crítica, se logra alcanzar la carga máxima. Si la longitud de fibra es mayor a la longitud crítica, el esfuerzo normal de la fibra llega al máximo y se sostiene constante, haciendo al refuerzo más efectivo. Si la longitud de la fibra es menor a la longitud crítica la transmisión de esfuerzos normales será mínima. Para obtener la ecuación de la longitud crítica se iguala la fuerza última de la fibra con la fuerza cortante de la interfaz fibra-matriz.

Para Huang et al. (2015) las fibras pueden romperse en su etapa de desprendimiento o extracción, siempre que en la fibra la tensión supera la resistencia a la tracción de la fibra.

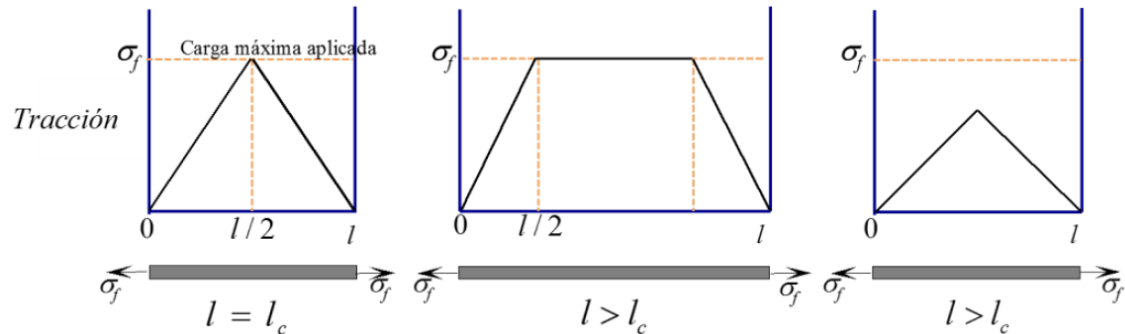


Figura 17: Perfil de esfuerzos con diferentes condiciones de longitud crítica.

Fuente: Adaptado de Mármol (2010).

Según Bowyer et al. (1972) la longitud de fibra crítica L_c , siendo esta longitud la necesaria para el máximo esfuerzo en la fibra y alcanzar el esfuerzo de fractura de la fibra σ_{uf} , r corresponde al radio de la fibra, τ_s es el esfuerzo de corte interfacial, E_f Módulo de elasticidad de la fibra y ε_{uc} la deformación unitaria de la fibra, esto puede escribirse en forma de la Ecuación (2).

$$L_c = \frac{\sigma_{uf}r}{\tau_s} = \frac{E_f \varepsilon_{uc}r}{\tau_s} \quad (2)$$

Para Bowyer et al. (1972) si la longitud de la fibra es menor que la longitud crítica, entonces el esfuerzo promedio de falla en la fibra está dado por la Ecuación (3) y esto es la mitad del esfuerzo máximo en la fibra.

$$\bar{\sigma}_f = \frac{L\tau_s}{2r} \quad (3)$$

Si la longitud de la fibra es mayor que la longitud crítica, según Bowyer et al. (1972) entonces el esfuerzo promedio en la fibra es dado por la Ecuación (4).

$$\bar{\sigma}_f = E_f \varepsilon_c \left(1 - \frac{E_f \varepsilon_c r}{2L\tau_s}\right) \quad (4)$$



Energía de fractura y de enlace químico

La energía de fractura según Merta et al. (2013) se define como la absorción de energía posterior a la fisura. Representa la energía que la estructura absorberá durante la falla. La energía de fractura específica, se calcula como el área bajo la curva fuerza - desplazamiento hasta un desplazamiento definido.

En Redon et al. (2001) se encuentra la formulación para obtener la energía de enlace químico y menciona que si la carga disminuye de F_{max} a F_b y la caída de carga es significativa, revela que el enlace químico entre la fibra y la matriz se rompió, si la caída de carga es distinta y ocurre muy repentinamente, significa que la desunión en la interfaz se rige por un criterio de fractura en lugar de un criterio de resistencia. El valor de la energía de desunión química, G_d se calcula con la siguiente Ecuación (5).

$$G_d = \frac{2(F_{max} - F_b)^2}{\pi^2 E_f D_f^3} \quad (5)$$

Donde: F_{max} : Fuerza máxima, F_b Fuerza de enlace friccional, D_f : Diámetro medio de la fibra, E_f : Módulo de elasticidad de la fibra.

2.2.6.1 Análisis numérico

Para López et al. (2010) cuando se emplean métodos numéricos, la solución que se obtiene es aproximada. Por este motivo los modelos numéricos tienen que someterse a un proceso de calibración matemática y física. La calibración matemática garantiza una aproximación adecuada y estabilidad de la solución obtenida. Por su parte, la calibración física garantiza que el modelo implementado tenga correspondencia con el fenómeno físico que se estudia. Es por esta razón que el proceso de calibración física necesita disponer de ensayos previos del fenómeno estudiado.

2.2.6.1.1 Análisis numérico mediante el software Abaqus

El análisis numérico de la presente investigación se realizará mediante el software Abaqus CAE en su versión 2017; programa especializado en el análisis de elementos finitos de Dassault Systèmes.



A. Formulación de Contacto

En Abaqus (2016) menciona que el software Abaqus proporciona varias formulaciones de contacto. Cada formulación se basa en la elección de una discretización de contacto, un enfoque de seguimiento y la asignación de roles de "maestro" y "esclavo" a las superficies de contacto. La formulación de contacto predeterminada es aplicable en la mayoría de las situaciones, pero puede ser conveniente elegir otra formulación en algunos casos.

Para Abaqus (2016) la elección de un enfoque de seguimiento tendrá un impacto considerable en cómo interactúan las superficies de contacto. En Abaqus/Standard hay dos enfoques de seguimiento para tener en cuenta el movimiento relativo de dos superficies que interactúan en simulaciones de contacto mecánico: Deslizamiento finito, que es el más general y permite cualquier movimiento arbitrario de las superficies y Deslizamiento pequeño, lo que supone que, aunque dos cuerpos pueden sufrir movimientos grandes, habrá un deslizamiento relativamente pequeño de una superficie a lo largo de la otra.

Discretización de superficies de par de contacto

En Abaqus (2016), Abaqus/Standard aplica restricciones condicionales en varias ubicaciones en superficies que interactúan para simular condiciones de contacto. Las ubicaciones y condiciones de estas restricciones dependen de la discretización de contacto utilizada en la formulación general del contacto. Abaqus/Standard ofrece dos opciones de discretización de contacto: una discretización tradicional de "nodo a superficie" y una verdadera discretización de "superficie a superficie".

Discretización de contacto de nodo a superficie

Según Abaqus (2016) con la discretización tradicional de nodo a superficie, las condiciones de contacto se establecen de manera que cada nodo "esclavo" de una interfaz de contacto interactúa efectivamente con un punto de proyección en la superficie "maestra" en el lado opuesto de la interfaz de contacto. Por lo tanto, cada condición de contacto involucra un solo nodo esclavo y un grupo de nodos maestros cercanos desde los cuales los valores se interpolan al punto de proyección.

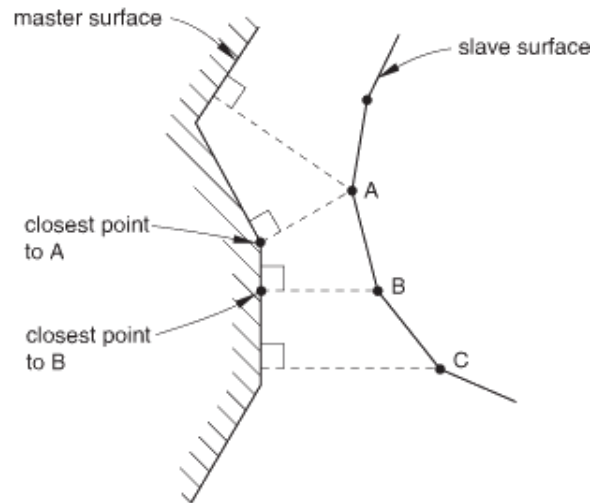


Figura 18: *Discretización de contacto de nodo a superficie*

Fuente: Abaqus (2016).

Discretización de contacto de superficie a superficie

Según Abaqus (2016) la discretización de superficie a superficie considera la forma de las superficies esclava y maestra en la región de las restricciones de contacto. La discretización de superficie a superficie tiene las siguientes características clave:

- La formulación de superficie a superficie impone condiciones de contacto en un sentido promedio sobre las regiones cercanas a los nodos esclavos en lugar de solo en los nodos esclavos individuales. Las regiones promediadas se centran aproximadamente en los nodos esclavos, por lo que cada restricción de contacto considerará predominantemente un nodo esclavo, pero también considerará nodos esclavos adyacentes. Se puede observar cierta penetración en los nodos individuales; sin embargo, con esta discretización no se producen penetraciones grandes no detectadas de los nodos maestros en la superficie esclava.
- La dirección de contacto se basa en un promedio normal de la superficie esclava en la región que rodea un nodo esclavo.
- La discretización de superficie a superficie no es aplicable si se utiliza una superficie basada en nodos en la definición del par de contactos.

En la Tabla 3 se muestra el error para varias combinaciones de discretización – superficie esclava en comparación con resultados analíticos, se concluye que la discretización de superficie a superficie ofrece mejores resultados.



Tabla 3: *Error en comparación con resultados analíticos para varias combinaciones de discretización/superficie esclava.*

Discretización de contacto	Superficie esclava	Error máximo en CPRESS
Nodo a superficie	Bloque que ejerce presión	13%
	Bloque que recibe presión	31%
Superficie a superficie	Bloque que ejerce presión	~ 1%
	Bloque que recibe presión	~ 1%

Fuente: Adaptado de Abaqus (2016).

B. Comportamiento cohesivo

Dentro del software Abaqus CAE, existe diferentes tipos de propiedades para simular el contacto de dos superficies, a continuación, se describe las consideraciones para el desarrollo del modelo.

Definición de comportamiento cohesivo basado en superficies

En Abaqus (2016), se puede definir un comportamiento cohesivo basado en la superficie para modelar la delaminación de las superficies inicialmente adheridas o para modelar el contacto "pegajoso" entre partes que están inicialmente separadas pero que se adhieren al entrar en contacto, con la posibilidad de que la unión sufra daños progresivos y falle. El comportamiento cohesivo basado en la superficie está destinado principalmente a situaciones en las que el grosor de la interfaz es insignificante.

Para Abaqus (2016) las fórmulas y leyes que gobiernan el comportamiento de la superficie cohesiva son semejantes a las que se utilizan para los elementos cohesivos con comportamiento constitutivo de tracción-separación. Las semejanzas se extienden al modelo de tracción-separación elástica lineal, los criterios de iniciación del daño y las leyes de evolución del daño.

Comportamiento de tracción-separación elástica lineal

Según Abaqus (2016) el modelo de tracción-separación disponible en Abaqus, inicialmente asume un comportamiento elástico lineal seguido por el inicio y la evolución del daño. El comportamiento elástico se escribe en términos de una matriz constitutiva elástica que relaciona los esfuerzos normal y cortante con las separaciones normal y cortante a través de la interfaz. El vector de tensión de tracción nominal, t , consta de tres componentes (dos componentes en problemas bidimensionales): t_n , t_s y (en problemas



tridimensionales) t_t . Las separaciones correspondientes se indican mediante δ_n , δ_s , y δ_t . El comportamiento elástico se puede escribir como:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = \mathbf{K}\boldsymbol{\delta}.$$

Modelado de daño

Para Abaqus (2016) el modelado de daño permite simular la degradación y eventual falla de la unión entre dos superficies cohesivas. El mecanismo de falla se compone de dos partes: un criterio de iniciación del daño y una ley de evolución del daño. La respuesta inicial es lineal, sin embargo, una vez que se cumple un criterio de inicio de daño, la evolución del daño ocurre de acuerdo a la ley definida por el usuario.

Según Abaqus (2016) siempre se supone que la descarga posterior al inicio del daño ocurre linealmente hacia el origen del plano de tracción-separación, como se muestra en la Figura 19. La recarga posterior a la descarga también ocurre a lo largo de la misma trayectoria lineal hasta que se alcanza la envolvente de ablandamiento (línea AB). Una vez que se alcanza la envolvente de ablandamiento, la recarga sigue a esta envolvente como lo indica la flecha en la Figura 19 muestra una respuesta típica de tracción-separación con un mecanismo de falla. Si el criterio de inicio de daño se especifica sin un modelo de evolución de daño correspondiente, Abaqus evalúa el criterio de inicio de daño solo con fines de salida; no hay efecto sobre la respuesta de las superficies cohesivas (es decir, no se producirán daños). Las superficies cohesivas no sufren daños bajo pura compresión.

Inicio de daño

Para Abaqus (2016) la iniciación del daño alude al origen de la degradación de la respuesta cohesiva en un punto de contacto. El proceso de degradación inicia cuando las tensiones de contacto y / o las separaciones de contacto satisfacen ciertos criterios de inicio de daño que usted especifique.

Evolución de daños

Según Abaqus (2016) la ley de evolución del daño describe la velocidad a la que se degrada la rigidez cohesiva una vez que se alcanza el criterio de inicio correspondiente. Hay dos componentes en la definición de evolución de daños. El primer componente

implica especificar la separación efectiva en caso de falla completa, δ_m^f , relativa a la separación efectiva al inicio del daño, δ_m^o ; o la energía disipada debido a una falla, G^c , ver la Figura 19. El segundo componente de la definición de evolución del daño es la especificación de la naturaleza de la evolución de la variable de daño, D , entre el inicio del daño y la falla final. Esto se puede hacer definiendo leyes de ablandamiento lineales o exponenciales o especificando D directamente como una función tabular de la separación efectiva relativa a la separación efectiva en el inicio del daño.

Según Abaqus (2016) siempre se supone que la descarga posterior al inicio del daño ocurre linealmente hacia el origen del plano de tracción-separación, como se muestra en la Figura 19. La recarga posterior a la descarga también ocurre a lo largo de la misma trayectoria lineal hasta que se alcanza la envolvente de ablandamiento (línea AB). Una vez que se alcanza la envolvente de ablandamiento, la recarga sigue a esta envolvente como lo indica la flecha en la Figura 19.

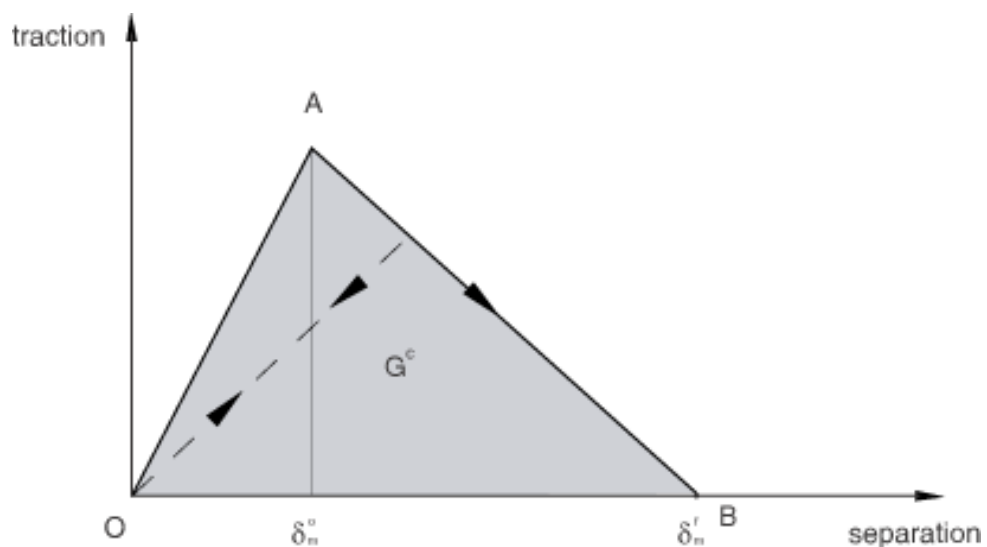


Figura 19: *Evolución lineal del daño.*

Fuente: Abaqus (2016).

La evolución de la variable daño D se basa en la degradación de la rigidez cohesiva y en el caso del ablandamiento exponencial se basa en la siguiente formulación, Donde: α es un parámetro adimensional que define la tasa de evolución del daño.

$$D = 1 - \left\{ \frac{\delta_m^o}{\delta_m^{\max}} \right\} \left\{ 1 - \frac{1 - \exp(-\alpha(\frac{\delta_m^{\max} - \delta_m^o}{\delta_m^f - \delta_m^o}))}{1 - \exp(-\alpha)} \right\}$$



C. Interacción de superficies despegadas

Cuando dos superficies inicialmente unidas comienzan a despegarse:

- Los nodos de la superficie esclava desunidos se liberan y pueden moverse libremente.
- Las tracciones que actúan sobre los nodos de la superficie esclava en el instante del desprendimiento se reducen a cero utilizando una curva de amplitud proporcionada por el usuario.

Interacciones de fricción de superficies que se despegan

Una vez que las superficies comienzan a despegarse, según Abaqus (2016) el modelo de fricción asignado a las superficies gobernará el movimiento tangencial de los nodos esclavos despegados. La fricción genera fuerzas tangenciales a la interfaz cuando las superficies están cerradas. Las fuerzas de fricción son independientes de las tracciones de desunión que aplica Abaqus/Standard y disminuyen una vez que un nodo esclavo se desliga; las tracciones de desprendimiento no influyen en el comportamiento de fricción de una superficie.

D. Comportamiento friccional

Cuando las superficies están en contacto, según Abaqus (2016) generalmente transmiten fuerzas cortantes y normales a través de su interfaz. Generalmente existe una relación entre estos dos componentes de fuerza. La relación, conocida como fricción entre los cuerpos en contacto, generalmente se expresa en términos de las tensiones en la interfaz de los cuerpos. Abaqus asume por defecto que la interacción entre los cuerpos en contacto es sin fricción. Puede incluir un modelo de fricción en una definición de propiedad de contacto para el contacto basado en superficie y el contacto basado en elementos.

Para Abaqus (2016) datos experimentales muestran que el coeficiente de fricción que se opone al inicio del deslizamiento desde una condición de adherencia es diferente del coeficiente de fricción que se opone al deslizamiento establecido. El primero se denomina típicamente coeficiente de fricción "estático" y el último se denomina coeficiente de fricción "cinético". Normalmente, el coeficiente de fricción estática es más alto que el coeficiente de fricción cinética.



2.2.6.2 Análisis experimental

El ensayo *pull-out* según Estévez (2018) consiste en la obtención de la relación entre la tensión adherente media y el deslizamiento relativo de una barra o fibra a partir del arrancamiento de dicha fibra embebida en una probeta de hormigón. La tensión se evalúa a partir de la medida de la fuerza aplicada a la barra, cuyo valor se divide entre el área superficial de la fibra en contacto con el mortero.

Consideraciones para el ensayo *pull-out*

Para Abdallah et al. (2018) tradicionalmente, las pruebas de extracción han sido un enfoque popular para investigar la fuerza de unión en la interfaz fibra-matriz. las pruebas *pull-out* se pueden clasificar según el método de aplicación la fuerza de tracción en ensayos de un lado y de dos lados o por el número de fibras incrustadas que varían de una a varias, ver la Figura 20. Para decidir qué técnica de prueba es la más apropiada para investigar el vínculo interfacial fibra – matriz, se pueden considerar los siguientes criterios:

- La longitud incrustada debe determinarse y medirse precisamente. El extremo libre de la fibra debe ser muy corto.
- Las muestras deben ser fáciles de fabricar debido a la evaluación estadística, requiere una enorme cantidad de muestras para garantizar la fiabilidad de los resultados.
- La configuración de las muestras debe facilitar la extracción de fibra hasta 90° de orientación con respecto a la dirección de la carga aplicada.
- La configuración de la prueba debe permitir una observación e investigación directas de la interfaz fibra-matriz.
- Durante la fabricación de las muestras, las fibras deben encontrarse alineados con precisión y asegurados por la matriz.
- La muestra se debe fabricar para manipular con un mínimo peligro de daño.
- Las muestras deben fabricarse para curar en grandes cantidades. bajo diferentes condiciones.
- La forma de la muestra debe diseñarse para minimizar la concentración de la tensión y contracción de la matriz.

Descripción general del ensayo experimental *pull-out*

Según Li et al. (1995) la variedad de la configuración de la prueba y de la muestra es mostrada en la Figura 20. Una parte de fibra está parcialmente incrustada en la matriz cementicia. La matriz se sujeta mediante el dispositivo de carga conectado a una celda de carga (ver Figura 21). En el otro extremo de la muestra, se utiliza una empuñadura hidráulica para sujetar la fibra que sobresale de manera que no pueda ocurrir deslizamiento entre la empuñadura y la fibra.

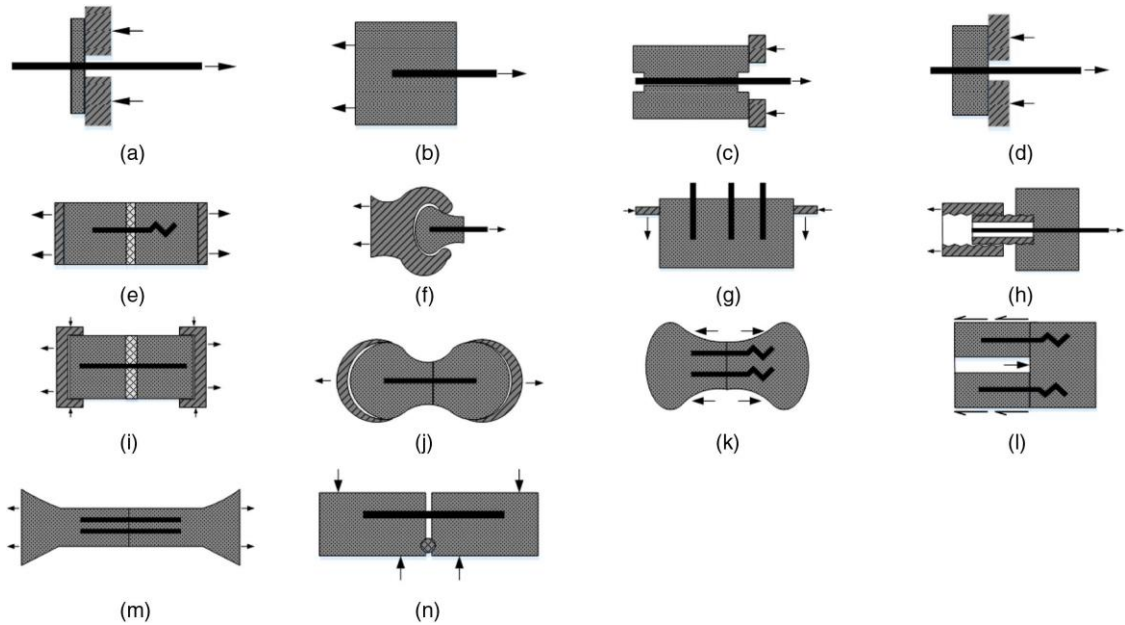


Figura 20: Varias configuraciones de muestras utilizadas para medir la resistencia de la unión.

Fuente: Abdallah et al. (2018)

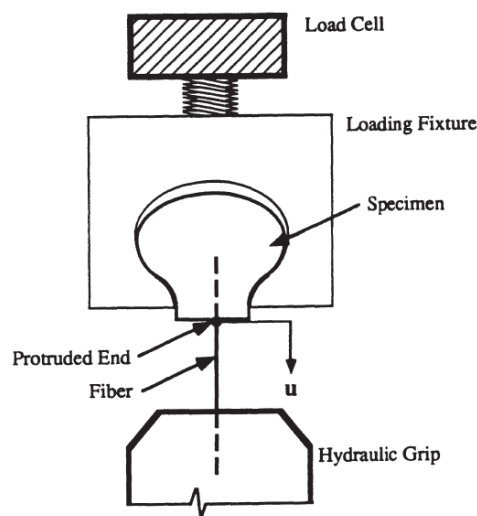


Figura 21: Esquema de la prueba de extracción de fibra única.

Fuente: Li et al. (1995).



La prueba de extracción según Li et al. (1995) se realiza utilizando una máquina hidráulica uniaxial que aplica una tasa de desplazamiento constante al agarre de la fibra. Se debe disponer de un sistema de adquisición de datos informáticos durante las pruebas para recopilarlos; incluye la carga aplicada obtenida de la celda de carga y el desplazamiento del agarre de fibra. Las propiedades del enlace interfacial se interpretan en función de las curvas Carga-desplazamiento obtenidas de las pruebas de extracción.

2.2.7 Tratamiento estadístico de datos

El uso de métodos estadísticos según Wapole et al. (2012) implica la recolección de información, entre la estadística inferencial y el acopio de información hay una diferencia importante. La estadística desarrollo una considerable cantidad de herramientas y métodos estadísticos. Estos métodos se diseñan para darle frente a la variación e incertidumbre de un conjunto de datos, si el resultado obtenido siempre fuera el mismo no haría falta los métodos estadísticos.

Para Cuauhtémoc (2014) las razones de la estadística es sintetizar lo datos, estimar y hacer inferencia, para ello, se analiza un grupo de datos llamado muestra que es un subconjunto extraído de la población, es decir, las mediciones de la población poseen la misma probabilidad de inclusión en la muestra. La elección de muestra se da de forma aleatoria o considerando ciertos parámetros. Las muestras se reúnen a partir de poblaciones, que son conjuntos de todos los individuos o elementos individuales de un tipo específico. A veces una población representa un sistema científico. Los resultados obtenidos de la muestra son representativos de la población. La síntesis consiste en manifestar con términos numéricos la distribución de los datos analizados, respecto a su tendencia y su dispersión.

2.2.7.1 Análisis de la varianza (ANOVA)

Una herramienta importante de la estadística según Wapole et al. (2012) es el análisis de la varianza o ANOVA, tiene diversos contextos en el cual aplicarse, dependiendo de lo que se busque, este procedimiento considera la variación total de la variable dependiente se subdivide en componentes significativos y luego son observados.

Para Dagnino (2014) el análisis ANOVA se utiliza cuando se tiene más de dos conjuntos de datos que se requiere sean comparados, cuando las variables cambien en una o más de sus características afectando el resultado, cuando se busque analizar a la vez el efecto de dos más variables y cuando se hallen mediciones repetidas más de dos veces. El ANOVA concibe diferentes técnicas y su aplicación dependerá del diseño



experimental. El más común de los análisis ANOVA es el de una variable que consiste en clasificar la variable en subniveles de dos o más.

El análisis ANOVA según Dagnino (2014) se usa en los siguientes cuatro casos:

- Cuando sea necesario la comparación de dos o más grupos
- Cuando hay mediciones repetidas
- Cuando las variables cambian sus características
- Cuando se analiza el efecto de dos tratamientos distintos

2.3 HIPÓTESIS

2.3.1 Hipótesis general

Las características del tipo de curva carga – desplazamiento y del modo de falla en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia obtenidos mediante el análisis numérico y experimental por arrancamiento (*pull-out*) son: Curva del tipo *softening* y modo de falla por *debonding*, la magnitud del esfuerzo de corte interfacial y de la longitud crítica de la fibra son: 0.09 MPa y 100 mm., respectivamente.

2.3.2 Hipótesis específicas

SH - 1: La magnitud máxima del esfuerzo de corte interfacial generado por el arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia es mayor que 0.09 MPa.

SH - 2: El tipo de curva carga - desplazamiento generada por el arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia es del tipo *softening* (ablandamiento).

SH - 3: El principal modo de falla generado por el arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia es desunión entre las fases (*debonding*).

SH - 4: La longitud crítica de la fibra resistente a arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia es de 100 mm.

Nota: Las magnitudes de esfuerzo de corte interfacial y de longitud crítica mencionadas en la hipótesis general como en las sub hipótesis, son valores de referencia. El valor de 0.09 MPa. que se obtuvo del estudio de Tenazoa et al. (2018), corresponde al esfuerzo de enlace friccional para la interfaz de una fibra de *Ichu* tratada alcalinamente y una matriz cementicia. El valor de la longitud crítica se obtuvo utilizando la Ecuación (2), donde el



esfuerzo ultimo axial se consideró una magnitud de 500 MPa. y un diámetro de la fibra de 71.11 μm . según Candiotti et al. (2020), y para el esfuerzo de corte interfacial se consideró como referencia el valor del esfuerzo de enlace friccional de 0.09 MPa según Tenazoa et al. (2018), finalmente con los datos de referencia se obtuvo una longitud critica de 98.76 mm, por lo que se tomó en cuenta un valor de 100 mm.

2.4 VARIABLES

2.4.1 Identificación de variables

Variable Independiente (X): Interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia

Descripción: Compuesto de fibra de *Ichu* y matriz cementicia, donde la fibra tendrá diferentes longitudes embebidas dentro de la matriz.

Nivel:

- Longitud de fibra embebida en la matriz cementicia

Indicadores:

- Magnitud de la longitud de fibra (mm.)

Variable Dependiente (Y): Arrancamiento (*pull-out*)

Descripción: Proceso por el cual se extrae la fibra de *Ichu* de la interfaz fibra-matriz cementicia, mediante una fuerza de tracción hasta la falla del compuesto o una de sus partes, todo ello, realizado numérica y experimentalmente.

Nivel:

- Esfuerzos de corte interfaciales
- Tipo de respuesta no lineal
- Modo de falla
- Longitud crítica de la fibra



Indicadores:

- Esfuerzos de corte (MPa.)
- Tipo de respuesta
- Modo de falla
- Longitud crítica de la fibra (mm.)

2.4.2 Operacionalización de variables

En la Tabla 4 se presenta el cuadro de operacionalización de variables.

Tabla 4: *Cuadro de operacionalización de variables.*

CUADRO DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES						
Tipo	Variable	Descripción	Dimensión	Indicador	Unidad	Instrumento
Independiente (X)	Interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia	Compuesto de fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia, donde la fibra tendrá longitudes embebidas dentro de la matriz.	Longitud de fibra embebida en la matriz cementicia	Magnitud de la longitud de fibra	Milímetros (mm.)	- Ficha de observación
			Esfuerzos interfaciales	Esfuerzos	MPa.	- Ficha de observación
Dependiente (Y)	Arrancamiento (<i>pull-out</i>)	Proceso por el cual se extrae la fibra de <i>Ichu</i> de la interfaz ficha-matriz cementicia, mediante una fuerza de tracción hasta la falla del compuesto o una de sus partes, todo ello, realizado numérica y experimentalmente	Tipo de respuesta	Desplazamientos	Milímetros (mm.)	- Ficha de observación
			Modo de falla	Deslizamiento	Tipo	- Ficha de observación
			Longitud crítica de la fibra	Longitud de fibra	Milímetros (mm.)	- Ficha de observación
				Esfuerzos	MPa.	



2.5 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Esfuerzo interfacial: Es el esfuerzo cortante en la interfase fibra – matriz, está en función de la fuerza aplicada en la fibra y el área de contacto de la interfase.

Esfuerzo de enlace friccional: Es el esfuerzo cortante correspondiente a la fuerza máxima producto de la fricción en la interfase fibra – matriz durante el deslizamiento de la fibra.

Celulosa: La celulosa es un compuesto químico orgánico muy común en el reino vegetal, compuesta exclusivamente por moléculas de glucosa.

Lignina: Es un polímero orgánico constituyente intercelular o cementante de las células fibrosas de los vegetales. Se concentra en la lámina media y tiene una función como relleno para impartir rigidez al tallo de la planta.

Tratamiento Alcalino: Proceso que disminuye la cantidad de ácido en una solución de hidróxido de sodio (NaOH).

Stipa: Es un género de gramíneas, perennes y cespitosas, que comprende aproximadamente 250 especies, de unos 30 cm. pero en ocasiones de hasta dos metros y medio, frecuentemente con hojas de lámina convoluta. Las espiguillas se hallan dispuestas en panojas generalmente laxas. Todas las Stipa se reconocen por tener unas aristas muy largas

Arrancamiesto (*pull-out*): Consiste en solicitar a carga de tracción una fibra embebida en una matriz cementicia hasta llegar a la carga de arrancamiento.

Ichu: Es un pasto natural que abunda en las altiplanicies andinas de sudamericano, México y Guatemala. Su nombre científico es *Stipa Ichu*.

Matriz: Está formada por cemento hidráulico tradicional que reacciona químicamente en un medio acuoso, tornándose en un sólido estable y resistente al agua, su empleo obedece principalmente a criterios técnicos y económicos.

Interfaz: La interfaz es el lugar de la interacción, el espacio donde se desarrollan los intercambios entre las partes de un compuesto, en nuestro caso la fibra de *Ichu* y la matriz cementicia.

Fibra: Filamento de origen natural, artificial o sintético, con capacidad para ser hilado y tejido, generalmente de corta longitud, sección pequeña y buena flexibilidad.

IFSS: Interfacial shear strength (Resistencia al corte interfacial).



CAPÍTULO 3: MÉTODO

3.1 ALCANCE DEL ESTUDIO

3.1.1 Tipo de investigación

Tipo Cuantitativo:

Para Hernández et al. (2010) A través de una investigación cuantitativa se pueden generalizar los resultados, se tiene control sobre los fenómenos estudiados considerando conteos y magnitudes, se puede replicar y es comparable con estudios similares.

Considerando la definición de Hernández et al. El tipo de investigación del presente estudio es Cuantitativa, ya que a partir de ensayos realizados se recolectaron datos y a través de análisis se consiguieron resultados.

3.1.2 Nivel de la investigación

Nivel Descriptivo con implicancias del Nivel Correlacional:

Según Hernández et al. (2010) Los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades, características de objetos, procesos, grupos o cualquier fenómeno. Pretende recoger o medir la información de forma independiente o grupal sobre las variables o conceptos.

Para Arias (2012) El estudio descriptivo radica en la caracterización de un fenómeno, hecho, individuo o grupo, para establecer su configuración o comportamiento.

La investigación correlacional según Hernández et al. (2010) tiene como propósito establecer la relación o grado de asociación que existe entre dos o más variables, categorías o conceptos en una muestra o contexto en específico.

Descriptivo: El estudio es de Nivel Descriptivo a razón de que se explica el proceso de arrancamiento (*pull-out*) de la fibra de *Ichu* respecto a la matriz cementicia, tanto en el análisis numérico como en el análisis experimental.

Implicancias del Nivel Correlacional: El estudio tiene implicancias del Nivel Correlacional, porque se evalúa la relación entre las dimensiones de la variable dependiente “Arrancamiento (*pull-out*)” con las dimensiones de la variable independiente “Interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia”.



3.1.3 Método de investigación

Hipotético – deductivo:

Para Bernal (2010) El método hipotético – deductivo es un procedimiento que inicia de unas afirmaciones en condición de hipótesis y busca rebatir o desvirtuar dichas hipótesis, coligiendo conclusiones que se cotejan con la realidad.

Se recurrió al método hipotético-deductivo, a razón de que el estudio se inició a partir de una hipótesis general y cuatro hipótesis específicas para explicar el fenómeno del arrancamiento (*pull-out*) mediante la experimentación.

3.2 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.2.1 Diseño metodológico

Experimental:

Para Hernández et al. (2010) “El diseño experimental se utiliza en el momento que el investigador procura establecer el posible efecto de una causa que se manipula”.

La investigación experimental según Arias (2012) es un procedimiento que se basa en imponer a un elemento o grupo a determinadas circunstancias, incentivos o tratamientos (variable independiente) para examinar los efectos o reacciones que se produzcan (variable dependiente).

Teniendo en cuenta la definición de Hernández et al. (2010), la investigación se enmarca en un diseño Experimental.

3.3 POBLACIÓN

3.3.1 Descripción de la población

La población está conformada por la totalidad de especímenes de la interfaz de la matriz cementicia y la fibra de *Ichu*, es decir, está definida como el total de compuestos de los dos materiales y tienen las siguientes características:

- La matriz cementicia tiene forma prismática, con una altura de 5 mm.
- Para la preparación de la matriz cementicia se utilizó: Cemento Portland tipo I de la marca Cemento Sol, Cal molida de la marca COMACSA y agua destilada; la relación agua-cemento del mortero es de 0.70 en peso.
- Para la fibra de *Ichu* se asume un diámetro constante en su sección circular a través de toda su longitud.



- La fibra de *Ichu* fue previamente tratada en una solución de hidróxido de sodio de 0.5 Molar a 60°C y durante 4 horas.
- El *Ichu* utilizado para elaborar las fibras tienen como origen una sola localidad, para evitar la variabilidad química y en las propiedades mecánicas de las fibras.
- La fibra de *Ichu* tiene una longitud embebida de 5 mm. Dentro de la matriz cementicia.

3.3.2 Cuantificación de la población

Para Hernández et al. (2010) en las muestras no probabilísticas, la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de causas relacionadas con las características de la investigación o de quien hace la muestra. Aquí el procedimiento no es mecánico ni con base en fórmulas de probabilidad, sino que depende del proceso de toma de decisiones de un investigador o de un grupo de investigadores y, desde luego, las muestras seleccionadas obedecen a otros criterios de investigación.

Por lo tanto, el método de muestro empleado para las muestras, dado que los elementos de evaluación de las muestras se elaboran por conveniencia o no probabilístico, se ha considerado que la población es única, es decir que estará conformada por la totalidad de muestras que se elaboren.

Población: La población es única, está conformada por la totalidad de la muestra.

3.4 MUESTRA

3.4.1 Descripción de la muestra

La muestra estará conformada por el compuesto de la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia; donde la matriz tiene forma prismática con una altura de 5 mm., reforzada con una fibra de *Ichu* de 7 mm. de longitud, de los cuales 5 mm. se encuentran embebidos en la matriz cementicia.

3.4.1.1 Método de muestreo

El método de muestreo es no probabilístico; también denominado por conveniencia.

Según Hernández et al. (2010) en las muestras no probabilísticas, la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de causas relacionadas con las características de la investigación o de quien hace la muestra. Aquí el procedimiento no



es mecánico ni con base en fórmulas de probabilidad, sino que depende del proceso de toma de decisiones de un investigador o de un grupo de investigadores.

3.4.2 Cuantificación de la muestra

Basándonos en el estudio realizado por Redon et al. (2001) donde se evaluó experimentalmente siete muestras de las mismas características al ensayo de arrancamiento (*pull-out test*). Para la presente investigación se ha considerado que la muestra albergue un mínimo de catorce (14) especímenes validos del compuesto matriz cementicia -fibra de *Ichu*, por la tanto:

Muestra: La muestra tiene una cantidad total de 14 especímenes válidos.

3.4.2.1 Criterios de evaluación de muestra

La muestra cuenta con 14 especímenes válidos, para ello se realizó una evaluación previa a cada espécimen de la población para considerarlo valido o no según los criterios descritos a continuación:

- Compuesto con un tiempo de curado de 7 días.
- Compuesto con una variación máxima en sus dimensiones de ± 0.1 mm.
- La fibra y la matriz deberán ser concéntricos
- El compuesto no deberá presentar fisuras.
- La matriz cementicia estará elaborada con una mezcla de cemento portland tipo I y cal molida en una proporción de 88% y 12% respectivamente.
- La fibra de *Ichu* embebida deberá encontrarse alineada evitando zigzagado a través de su longitud.
- El compuesto deberá contar con una longitud de fibra libre mínima de 2 mm.
- La superficie de la matriz cementicia deberá encontrarse nivelada para que exista pleno contacto con la restricción de la máquina de ensayo.

3.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.5.1 Instrumentos metodológicos o instrumentos de recolección de datos

Las técnicas e instrumentos a utilizar en la investigación son los siguientes:

- Observacional – Fichas de observación



3.6 VALIDEZ Y CONFIABILIDAD DE INSTRUMENTOS

Las fichas de observación elaboradas para recoger los datos resultantes de los ensayos experimentales, fueron sometidos a la opinión de expertos, especialistas en el estudio de la fibra de *Ichu* y con conocimiento de las pruebas experimentales realizadas en la presente tesis, dichas opiniones se encuentran en el ítem de validación del instrumento de la presente tesis.

Las opiniones respecto a la confiabilidad de los instrumentos, se implementaron en los mismos antes de su aplicación.

3.7 PLAN DE ANÁLISIS DE DATOS

El análisis de datos y procesamiento se realizaron mediante operaciones estadísticas con el uso del software Microsoft Excel, donde, con la obtención de las curvas de los ensayos experimentales y numéricos se pudieron probar las hipótesis. A continuación, en la Tabla 5 se detalla el medio obtenido con el cual se probaron las hipótesis.

Tabla 5: *Plan de análisis de datos.*

Plan de Análisis de Datos		
Nivel	Hipótesis a probar	Medio
General	Las características del tipo de curva carga – desplazamiento y del modo de falla en la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia obtenidos mediante el análisis numérico y experimental por arrancamiento (<i>pull-out</i>) son: Curva del tipo <i>softening</i> y modo de falla por <i>debonding</i> , la magnitud del esfuerzo de corte interfacial y de la longitud crítica de la fibra son: 0.09 MPa y 100 mm., respectivamente.	Curva media experimental, curvas numéricas y análisis analítico
Específico 1	La magnitud máxima de los esfuerzos de corte interfacial generados por el arrancamiento (<i>pull-out</i>) en la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia son mayores que 0.09 MPa.	Curva media experimental
Específico 2	El tipo de curva carga – desplazamiento generado por el arrancamiento (<i>pull-out</i>) en la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia es del tipo <i>softening</i> (ablandamiento).	Curva media experimental
Específico 3	El principal modo de falla generado por el arrancamiento (<i>pull-out</i>) en la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia es desunión entre las fases (<i>debonding</i>).	Curva media experimental
Específico 4	La longitud crítica de la fibra resistente a arrancamiento (<i>pull-out</i>) en la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia es de 100 mm.	Análisis analítico



3.8 ANÁLISIS EXPERIMENTAL

En el análisis experimental se realizó las pruebas de ensayo de arrancamiento (*pull-out*) para el caso particular de una longitud de fibra embebida en la matriz cementicia de 5 mm., dicha longitud de fibra embebida se determinó en función de estudios donde realizan ensayos de arrancamiento para diversos materiales. En la Tabla 6 se resumen las dimensiones consideradas en dichos estudios.

Para obtener la longitud de fibra embebida aproximada, sencillamente se realizó un promedio del diámetro y de la longitud de fibra embebida de los estudios considerados, con ello se hizo una relación proporcional para obtener la longitud de fibra embebida en función del diámetro promedio de la fibra de *Ichu* de 83.455 μm ., donde se obtuvo una longitud de 3.01 mm., sin embargo, para evitar dificultades en el manejo de fibra de corta longitud, en especial en la preparación de las muestras, se decidió asumir una longitud de fibra embebida de 5 mm.

Tabla 6: Dimensiones de diámetro de fibra y longitud embebida en antecedentes.

Investigación	Diámetro de Fibra (mm.)	Longitud de fibra embebida promedio (mm.)
Bheemerddy et al. (2013)	0.007	4.5
Wang et al. (1988)	0.254	12.7
Mobasher et al. (1995)	0.100	12.5
Li et al. (1991)	0.203	12.0
Leung et al. (1999)	0.500	9.0
Li et al. (2009)	0.030	1.0
Redon et al. (2001)	0.700	5.0
Naaman et al. (1991)	0.483	25.4
Promedio	0.285	10.26

3.8.1 Elaboración del compuesto fibra-matriz

3.8.1.1 Equipos y materiales

Equipos

- Cámara climática modelo TT-5566.

Materiales

- Molde de silicona
- Fibra de *Ichu* tratada



- Cemento Portland tipo I
- Cal molida
- Agua destilada

3.8.1.2 Procedimiento

La fibra de *Ichu* utilizada tiene como procedencia el distrito de Tinta, Cusco – Perú. Para elaborar las muestras, previamente se realizó el tratamiento de las fibras de *Ichu* con una solución de hidróxido de sodio, de acuerdo a lo realizado por Mori et al. (2018), donde demuestra las condiciones óptimas del tratamiento para la fibra de *Ichu*, siendo una concentración de 0.5 Molar de hidróxido de sodio (NaOH) a 60 °C y durante 4 horas.

Para la elaboración de las muestras; primeramente, se construyó moldes de silicona, donde se ubicaron las fibras tratadas de extremo a extremo de manera extendida, procurando evitar algún ondulamiento en la fibra (ver Figura 22).

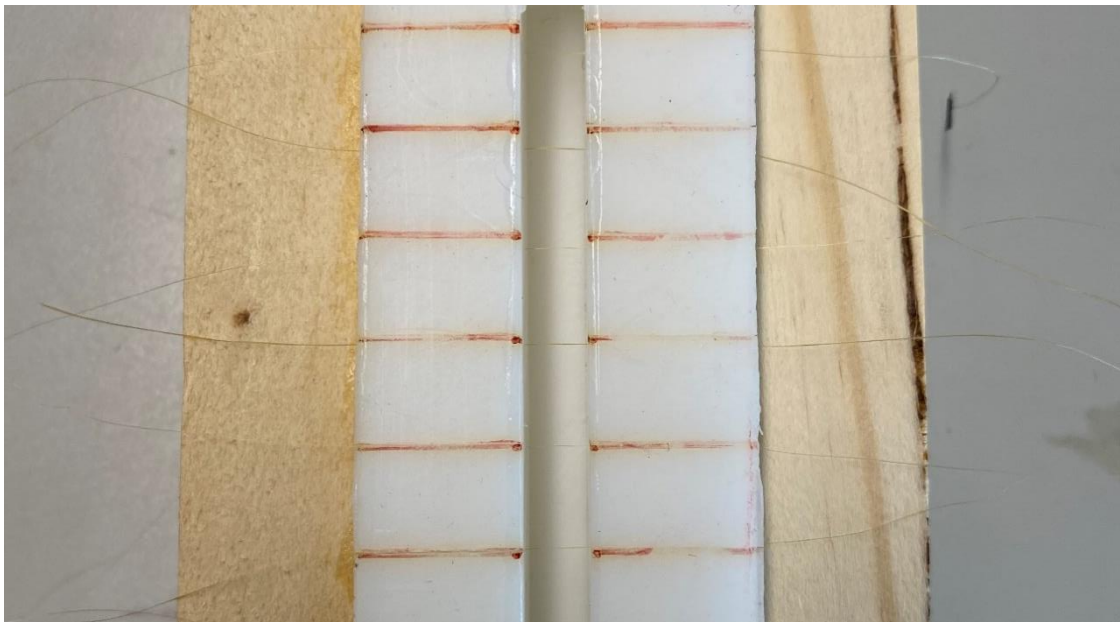


Figura 22: *Extendido de fibra tratada en molde de silicona.*

Con la fibra ubicada en el molde, se vertió el mortero; el cual está compuesto por una relación agua cemento de 0.70, el cemento utilizado es una mezcla de cemento Portland tipo I de la marca Cemento Sol y cal molida de la marca COMACSA en un 88% y 12% en peso respectivamente. Mientras se añadía el mortero en el molde, se verificaba que la fibra este alineada dentro de la matriz y envuelta por la mezcla cementicia (ver Figura 23).

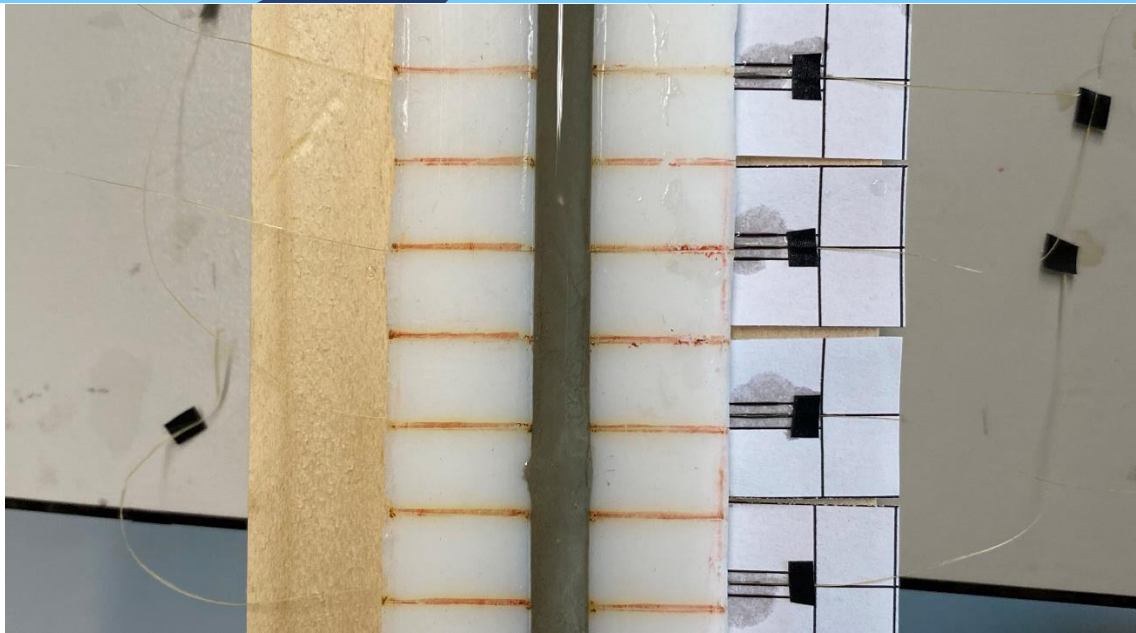


Figura 23: *Molde con fibras de Ichu y mortero recién vertido.*

Finalmente, el molde fue cubierto en una bolsa plástica Ziploc (ver Figura 24), para evitar la evaporación del agua de la mezcla. El proceso de curado se desarrolló en una cámara climática modelo TT-5566 de la marca Asli en condiciones de 60°C y 90% de humedad relativa durante 7 días, transcurrido el tiempo se procedió a desmoldar las muestras.



Figura 24: *Molde con muestras acondicionado para el proceso de curado.*

3.8.1.3 Toma de datos

Cada una de las briquetas fue asignada con dígitos numéricos, el cual indica el número de espécimen realizado.

3.8.2 Ensayo de arrancamiento (*pull-out*)

3.8.2.1 Equipos

- Maquina universal de ensayos mecánicos modelo E42 MTS Exceed.

3.8.2.2 Procedimiento

Para el desarrollo del ensayo experimental se utilizó las muestras preparadas con fibra tratada y para el caso en específico de la interfase matriz cementicia – fibra de *Ichu*, con 5 mm. de longitud de fibra embebida.

De la cantidad total de muestras preparadas a ensayar, finalmente se obtuvieron resultados validos de catorce especímenes, esto debido a la perdida de muestras por su fragilidad durante su manipulación en el ensayo, si bien estaba previsto obtener veinte ensayos válidos, por limitaciones del contexto cronológico no fue posible obtener la cantidad total de ensayos válidos, sin embargo, por otras referencias como Redon et al. (2001) donde experimentó con 7 muestras, como se aprecia en la Figura 2, por lo tanto, consideramos que la cantidad de resultados validos son suficientes para definir la curva carga – desplazamiento.

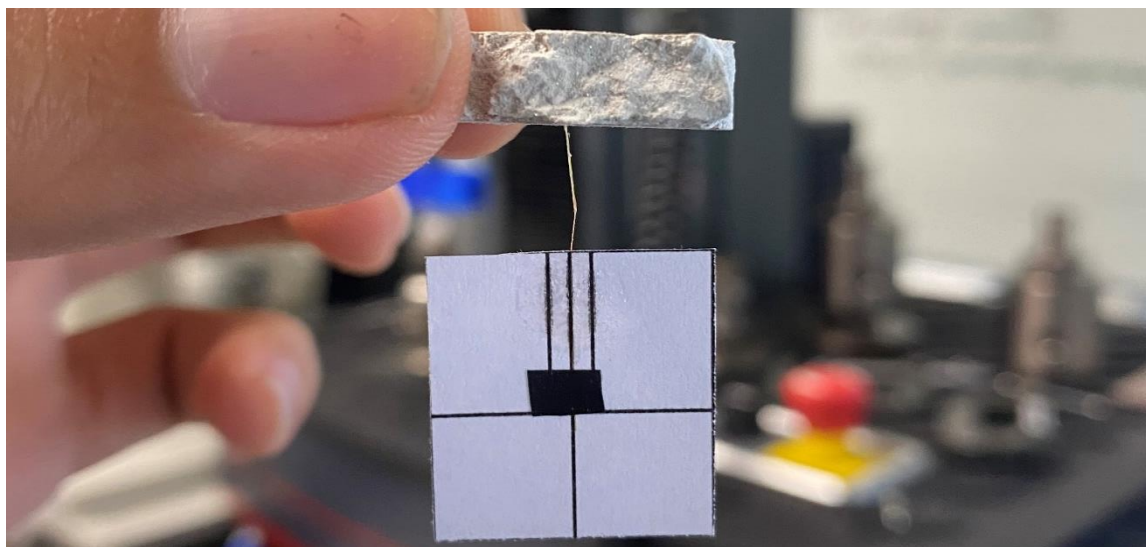


Figura 25: Muestra apta para el ensayo de arrancamiento (*pull-out*).

La prueba de arrancamiento de una sola fibra se realizó de acuerdo a la investigación de Redon et al. (2001). Las condiciones establecidas al iniciar la prueba en



el equipo universal fueron: una carga de 10 N y una velocidad de desplazamiento de 0.02 mm/s.

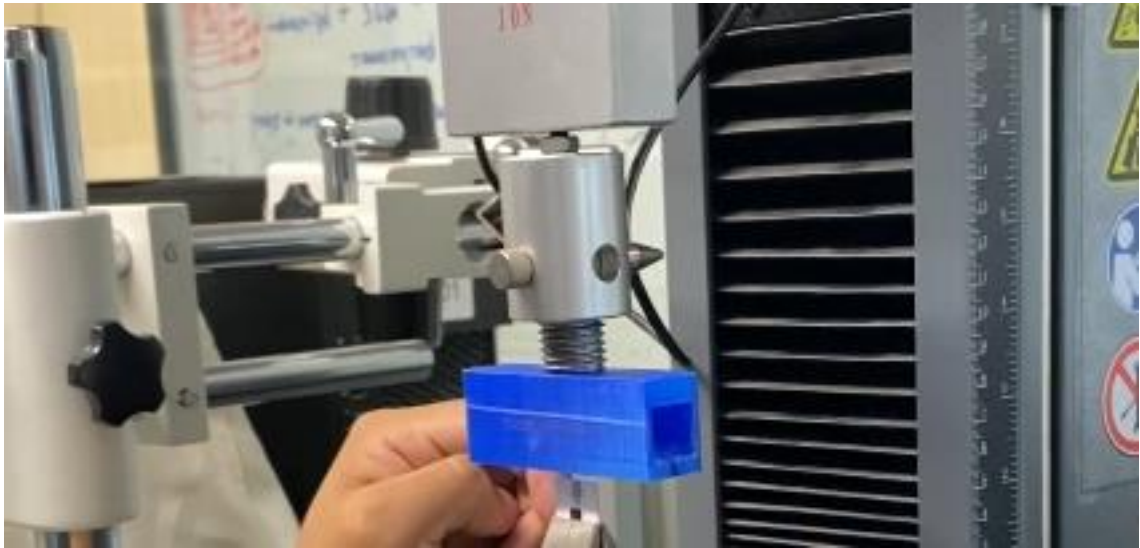


Figura 26: Prueba de arrancamiento (*pull-out*).

Para iniciar con la prueba, se colocó el extremo de la fibra y la matriz cementicia en los fijadores del equipo, luego se dio inicio con la aplicación de la carga. El tiempo medio estimado de cada prueba fue de cuatro minutos, al finalizar el ensayo, el equipo provee la data de la fuerza aplicada en la fibra en función de su desplazamiento, finalmente se realizó las mediciones del área seccional de cada fibra ensayada.

3.8.2.3 Toma de datos

Los datos obtenidos de la prueba de arrancamiento (*pull-out*) se presentan en el formato “A” (ver anexos).

3.8.2.4 Análisis de datos

De las muestras disponibles a realizar el ensayo de arrancamiento se logró obtener los datos de catorce pruebas, a continuación, se presenta las catorce curvas conseguidas en la Figura 28 y Figura 29.

Para alcanzar la curva representativa del ensayo de las catorce obtenidas, se realizó análisis de datos atípicos, donde resultó que las curvas ICT18 e ICT22 son atípicas, además, se consideró la desviación estándar de la fuerza máxima de las 14 curvas como parámetro de descarte, resultando en ± 0.135 N., con este valor se excluyeron 3 curvas (ICT18, ICT22 y ICT62), con las 11 curvas restantes se volvió a realizar el descarte



con la nueva desviación estándar de ± 0.063 N., desechando 5 curvas más (ICT23, ICT38, ICT52, ICT53 y ICT62) quedando 6 curvas.

Finalmente, el ultimo criterio para realizar el descarte fue el del tipo de falla en el deslizamiento, como se aprecia en las 14 curvas la falla predominante es del tipo *softening*, por ello, analizando el comportamiento de cada una de las curvas se decidió excluir las curvas ICT55 e ICT64, con las 4 curvas restantes se realizó la curva media experimental (ver Figura 27) considerando que cada punto en las curvas tiene como variable independiente un mismo tiempo. Vale mencionar que estas 4 curvas se encuentran en el intervalo de confianza de la media de la fuerza máxima. Los valores numéricos de cada punto de la curva media experimental se encuentran en los anexos, en el formato A, número 15.

Los descartes realizados en las curvas se realizaron para obtener una curva que sea representativa del ensayo y que esta mantenga proximidad en la magnitud de los principales parámetros, como es la fuerza máxima, donde se obtuvo una magnitud de 0.189 N. y en las 14 curvas se obtuvo una fuerza máxima media de 0.224 N. si examinamos la desviación estándar inicial de ± 0.135 N., la curva media obtenida es representativa de los ensayos experimentales tanto en magnitud como en el comportamiento en el deslizamiento.

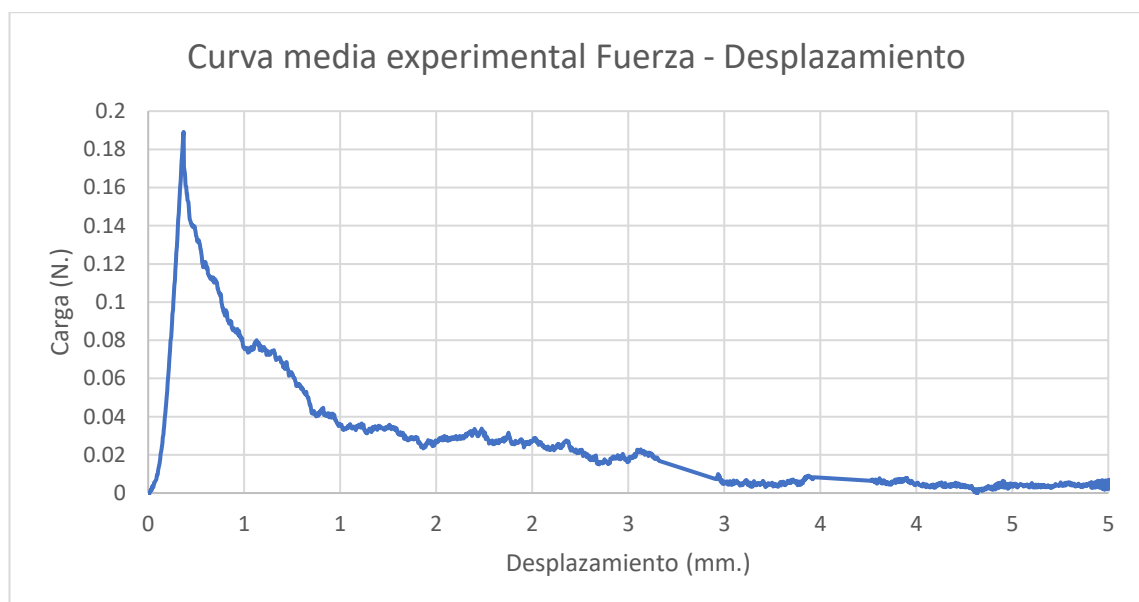


Figura 27: Curva representativa de los ensayos experimentales de arrancamiento.

La curva carga – desplazamiento obtenida experimentalmente y mostrada en la Figura 27, se equipará a la curva típica de carga – desplazamiento de Li et al. (20019), mostrada en la Figura 14. En el primer tramo de la curva, se entiende que la fibra de *Ichu*



está unida elásticamente a la matriz. En el segundo tramo donde se desarrolla el desprendimiento, no es posible identificar con precisión la magnitud de fuerza en que se inicia el desprendimiento de la fibra, lo evidente es la magnitud de fuerza en la que se completa el desprendimiento que corresponde a la fuerza máxima de 0.189 N. y la fuerza por fricción inicial que tiene un valor de 0.074 N. En el tercer tramo se desarrolla la extracción de la fibra o su deslizamiento, la cual básicamente está en función de la fricción. De la curva media experimental se entiende que la resistencia por fricción va descomponiéndose hasta lograr la extracción total de la fibra.

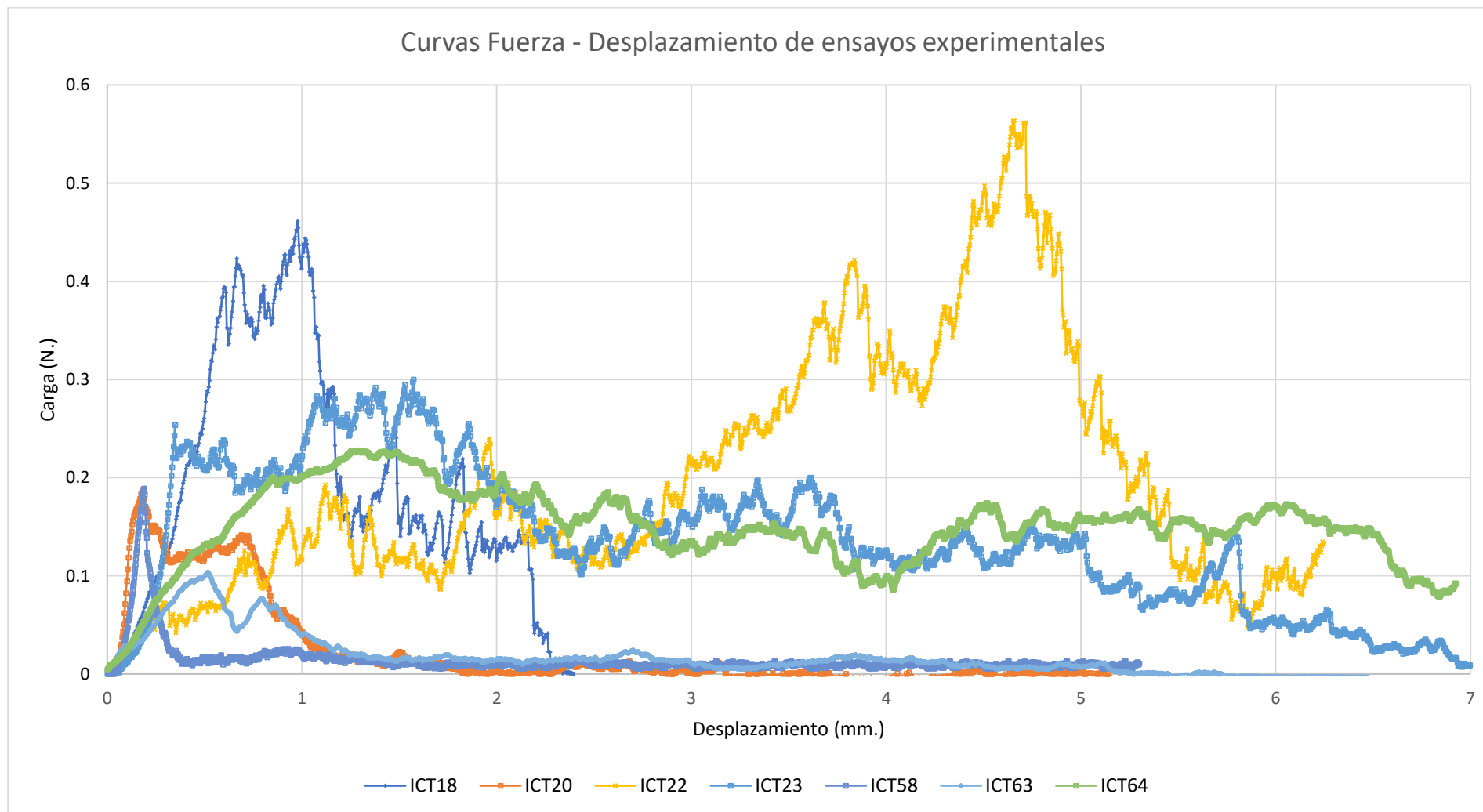


Figura 28: Curvas fuerza – desplazamiento de los ensayos experimentales de arrancamiento (pull-out), grupo 1.

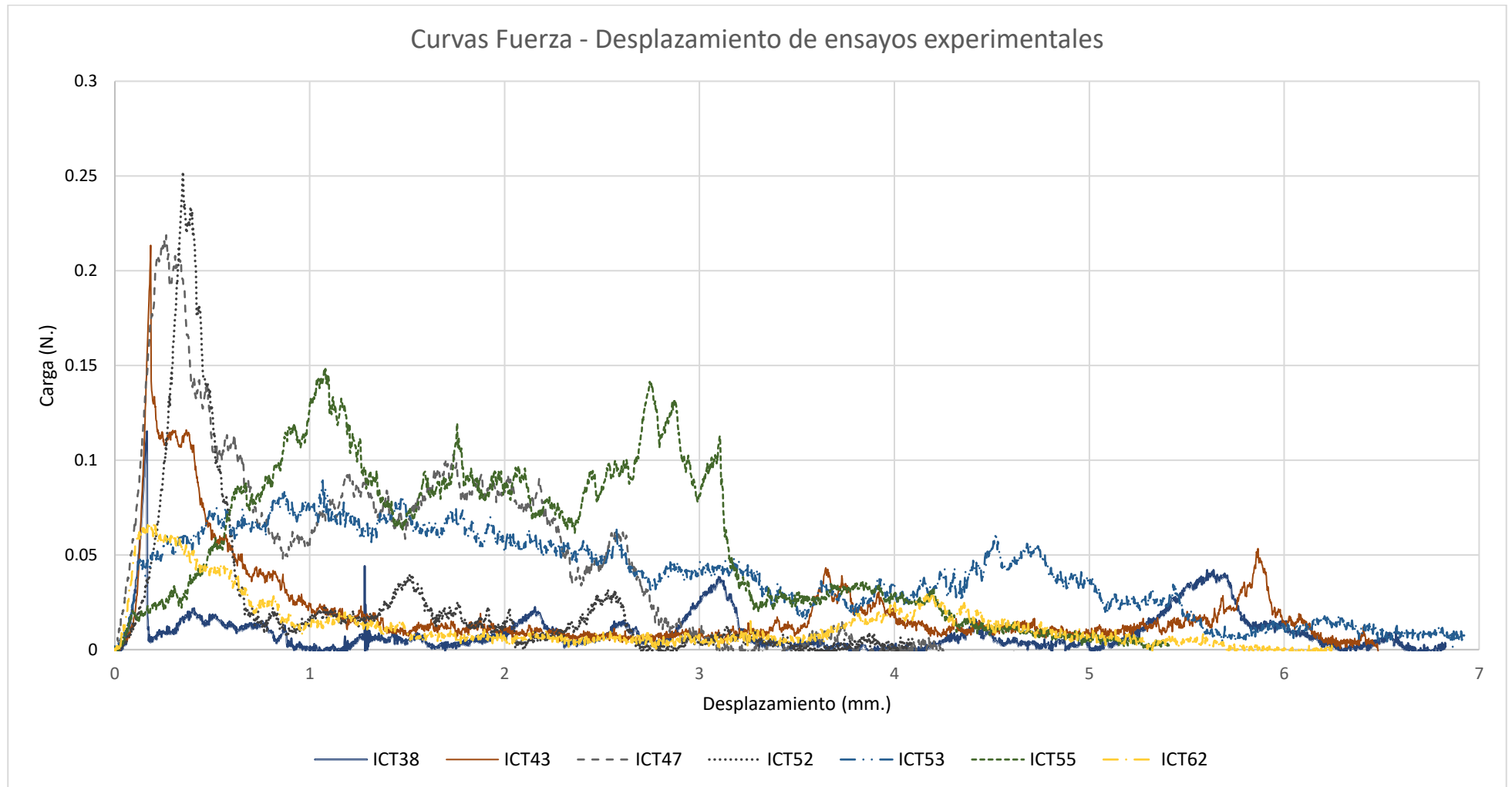


Figura 29: Curvas fuerza – desplazamiento de los ensayos experimentales de arrancamiento (pull-out), grupo 2



Con las curvas de fuerza-desplazamiento, se obtuvo el esfuerzo de corte interfacial (IFSS) para cada una de las 14 curvas (ver Figura 28 y Figura 29) mediante la Ecuación (1) en Li et al. (2009).

Tabla 7: Área seccional de la fibra, fuerza máxima y esfuerzo de enlace friccional.

Muestra	Área seccional de la fibra (um ² .)	Fuerza máxima (N.)	Esfuerzo de corte interfacial (IFSS) (N/mm ² .)
ICT18	14291.25	0.977	0.161
ICT20	2747.84	0.184	0.152
ICT22	15337.94	4.656	0.176
ICT23	6194.96	1.572	0.120
ICT38	5037.64	0.164	0.076
ICT43	4637.87	0.184	0.144
ICT47	5878.03	0.263	0.112
ICT52	3708.27	0.350	0.208
ICT53	3755.34	1.064	0.062
ICT55	3783.82	1.076	0.085
ICT58	4979.39	0.190	0.133
ICT62	2566.60	0.184	0.055
ICT63	3925.34	0.517	0.114
ICT64	6023.19	1.289	0.128
Promedio	5919.11	0.905	0.123
Desviación estándar	3794.71	1.141	0.042

Las propiedades de la interfaz se hallaron a partir de la curva media experimental, donde el esfuerzo de corte interfacial se obtuvo mediante la Ecuación (1) considerando como fuerza máxima 0.189 N. El diámetro medio de la fibra de 83.455 um. con una desviación estándar de ± 23.909 um. La longitud de fibra embebida en la matriz es 5 mm., con lo mencionado se obtuvo la magnitud del esfuerzo de corte interfacial de 0.143 MPa.

Para determinar la rigidez del contacto cohesivo se calculó mediante la relación de la fuerza máxima y su correspondiente deslizamiento elástico de 0.185 mm. de ello se obtiene el módulo elástico cohesivo o denominado por Naaman et al. (1991) como módulo de enlace de 1.023 N/mm.

Según Löfgren (2005) la energía disipada es igual al área debajo de la curva de carga-desplazamiento, por lo tanto, la energía de extracción o arrancamiento (tanto



desunión y fricción) incrementa con el aumento de la longitud de empotramiento de la fibra.

Según lo mencionado por Redon et al. (2001) si la carga disminuye de F_{max} a F_b y la caída de carga es significativa, revela que el enlace químico entre la fibra y la matriz se rompió, si la caída de carga es distinta y ocurre muy repentinamente, significa que la desunión en la interfaz se rige por un criterio de fractura en lugar de un criterio de resistencia.

Considerando que la energía de arrancamiento total según Löfgren (2005) es el área bajo la curva, entonces de la curva media experimental se obtuvo una energía de arrancamiento total de 0.134 N.mm.

Hallando la energía de desunión química mencionada por Redon et al. (2001) mediante la Ecuación (5), a través de la curva media experimental y considerando los siguientes parámetros: Fuerza máxima 0.189 N., $F_b = 0.074$ N., módulo de elasticidad de la fibra 35.96 GPa., diámetro de la fibra 0.084 mm., se obtuvo una magnitud de energía de desunión química de $G_d = 0.00013$ N/mm.

3.9 ANÁLISIS NUMÉRICO

El modelamiento numérico se desarrolló para cinco niveles de la variable arrancamiento, cada uno de ellos con la particularidad de la profundidad de fibra embebida en la matriz cementicia de: 3mm., 5mm., 7mm., 9mm. y 11mm.

3.9.1 Propiedades mecánicas de los materiales y parámetros cohesivos

El *Ichu* es un pasto natural abundante en el altiplano peruano cuyas propiedades mecánicas son bastante variables por su origen, desarrollo, etc. Diversas investigaciones como la de Candiotti et al. (2020), Mori et al. (2018) y Tenazoa et al. (2019) obtuvieron las características físico – químicas de la fibra de *Ichu*. Para el presente estudio las magnitudes de las propiedades de la fibra de *Ichu* se obtuvieron del reporte de resultados de Tenazoa (2020); resultados que se obtuvieron de los estudios realizados en el proyecto de investigación denominado “Fabricación de paneles de fibrocemento utilizando materiales obtenidos a partir de plantas endémicas del Perú”, donde el módulo de elasticidad de la fibra de *Ichu* tratada obtenido es de 35.96 GPa. \pm 4.24 GPa., dicha magnitud se aproxima al valor aproximado de 33.33 GPa. que se puede obtener mediante la Figura 9 de Candiotti et al. (2020); utilizando el método de tangente para una deformación de 0.003 y un esfuerzo de 100 MPa., el esfuerzo máximo de 568.61 ± 99.74 MPa., el coeficiente de Poisson de 0.30, valor asumido de Gay et al. (2002), donde indica



coeficientes de Poisson de diversos tipos de fibra según su material. Las propiedades mecánicas de la matriz cementicia utilizados para el modelo numérico son: Módulo de elasticidad de 6,800 MPa. según Mariscal (2001) y un coeficiente de Poisson de 0.30.

Las magnitudes de las propiedades cohesivas consideradas se obtuvieron de los resultados de las pruebas experimentales y se utilizaron para los cinco casos analizados, se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: *Magnitudes de los parámetros cohesivos de la interfaz.*

Parámetros cohesivos	Magnitud
Rigidez del contacto cohesivo (N/mm.)	1.023
Esfuerzo de corte interfacial (MPa.)	0.143

En la Tabla 9 se muestran en resumen las magnitudes de las propiedades mecánicas de los materiales o fases utilizadas en el modelo numérico.

Tabla 9: *Magnitudes de las propiedades mecánicas de los materiales, según Tenazoa (2020) y Mariscal (2001).*

Propiedades mecánicas de los materiales	Magnitud
Módulo de elasticidad de la Fibra tratada (GPa.)	35.96
Coefficiente de Poisson de la fibra tratada	0.30
Módulo de elasticidad de la matriz cementicia (GPa.)	6.80
Coefficiente de Poisson de la matriz cementicia	0.30

3.9.2 Modelo numérico

Las dimensiones del compuesto consideradas en el modelo numérico para los cinco casos mencionados se detallan en la Tabla 10 según la Figura 30, donde: LFL es la longitud de fibra libre, LFE es la longitud de fibra embebida que a la vez corresponde a la altura de la matriz cementicia y DM es el diámetro de la matriz cementicia.

Las magnitudes de las dimensiones del compuesto en la Tabla 10 se determinaron según referencias como en Bheemreddy et al. (2013); en su análisis numérico para una fibra de radio de 7 μm . considera dos casos de longitud de fibra embebida en la matriz de 3 y 6 mm. En el estudio de Wang et al. (1988) analizó experimentalmente el arrancamiento *pull-out* para una fibra con diámetro de 0.254 mm. considero una longitud de fibra embebida de 12.7 mm. En Mobasher et al. (1995) Para un radio de fibra de 0.1

mm considera la longitud de fibra embebida de 12.5 mm. En Li et al. (1991) se analizó experimentalmente para fibras de vidrio longitud embebidas de 3, 8, 11, 12, 16 y 21 mm. Finalmente, en Leung et al. (1999) considera que la longitud de empotramiento para fibras cortas está próxima a los ~3 mm. y para macrofibras ~20 mm., por lo tanto, se ha considerado como primer caso una longitud de fibra empotrada de 3mm. Hasta el quinto caso de 11 mm. tomando en cuenta una progresión de 2 mm.

Tabla 10: *Magnitudes de las dimensiones del compuesto de la interfaz.*

Caso	Matriz		Diámetro de fibra (mm)	Fibra	
	DM (mm)	AM (mm)		LFL (mm)	LFE (mm)
3 mm.	4	3	0.084	0.3	3
5 mm.	4	5	0.084	0.3	5
7 mm.	4	7	0.084	0.3	7
9 mm.	4	9	0.084	0.3	9
11 mm.	4	11	0.084	0.3	11

Nota: DM diámetro de la matriz, AM altura de la matriz, LFL longitud de fibra libre y LFE longitud de fibra embebida.

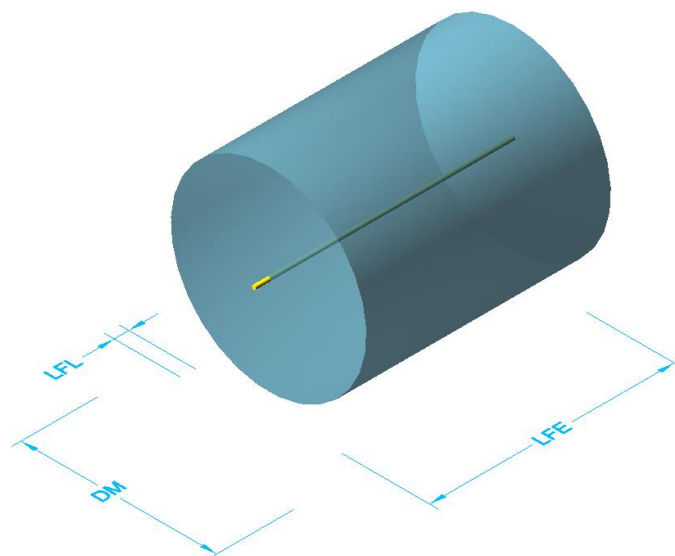


Figura 30: *Dimensiones del compuesto interfaz fibra de Ichu – matriz cementicia.*

Respecto al espesor de la matriz, según la norma NTP-ISO 8336 (1999) “Planchas planas de fibro-cemento” las planchas se producirán con un espesor entre los 3 a 30 mm. Es así que se asumió un espesor o diámetro de 4 mm. Considerando como caso crítico, pues, a menor espesor de matriz los esfuerzos se concentraran.



Para los cinco casos analizados la altura de matriz y la longitud de fibra embebida coinciden en su magnitud, esto para representar de manera fidedigna el ensayo experimental del caso de longitud de fibra de 5 mm.

El modelo numérico asumido para los cinco casos es un modelo axisimétrico; la estructura axisimétrica se expande mediante la rotación alrededor del segundo eje de coordenadas, la mitad en el sentido de las agujas del reloj y la mitad en el sentido contrario a las agujas del reloj. La dirección radial corresponde al eje X en la expansión 3D, la dirección axial con el eje Y. El plano XY corta la estructura expandida por la mitad. El eje Z es perpendicular al plano XY, Esta idealización contribuye enormemente en el ahorro del cálculo computacional. En cada modelo se aplicó un desplazamiento impuesto en el vértice extremo del eje de la fibra, cuyas magnitudes de los desplazamientos fueron 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm y 12 mm, respectivamente, además, se aplicó condiciones de frontera en la arista superior de la matriz, específicamente una restricción al desplazamiento en el eje Y y otra restricción al desplazamiento en el eje X en el nudo extremo de la matriz como se observa en la Figura 31a.

Para el enmallado se utilizó elementos axisimétricos del tipo cuadriláteros CAX4R; los cuales son elementos cuadriláteros bilineales de cuatro nodos con integración reducida. Este elemento es muy similar al elemento *shell* de ocho nodos. Se aplican las mismas reglas que para los elementos de deformación plana, excepto que las condiciones en el plano en una construcción de deformación plana ahora corresponden a las condiciones del plano radial en la estructura axisimétrica. Expresado de otra manera, la dirección Z en la deformación plana ahora corresponde a la dirección circunferencial en un sistema de coordenadas cilíndrico con el eje Y como eje de definición. Como antecedente, en la investigación de Bheemreddy et al. (2013) se hizo uso de este tipo de elemento. Tanto la fibra como la matriz cementicia se definieron con el mismo tipo de elemento.

Tabla 11: *Número de elementos y nodos usados en el modelo numérico.*

Caso	Número de elementos			Número de nodos		
	Matriz	Fibra	Total	Matriz	Fibra	Total
3 mm.	1800	1056	2856	1891	1325	3216
5 mm.	3000	1696	4696	3131	2125	5256
7 mm.	4200	2336	6536	4371	2925	7296
9 mm.	5400	2976	8376	5611	3725	9336
11 mm.	6600	3616	10216	6851	4525	11376

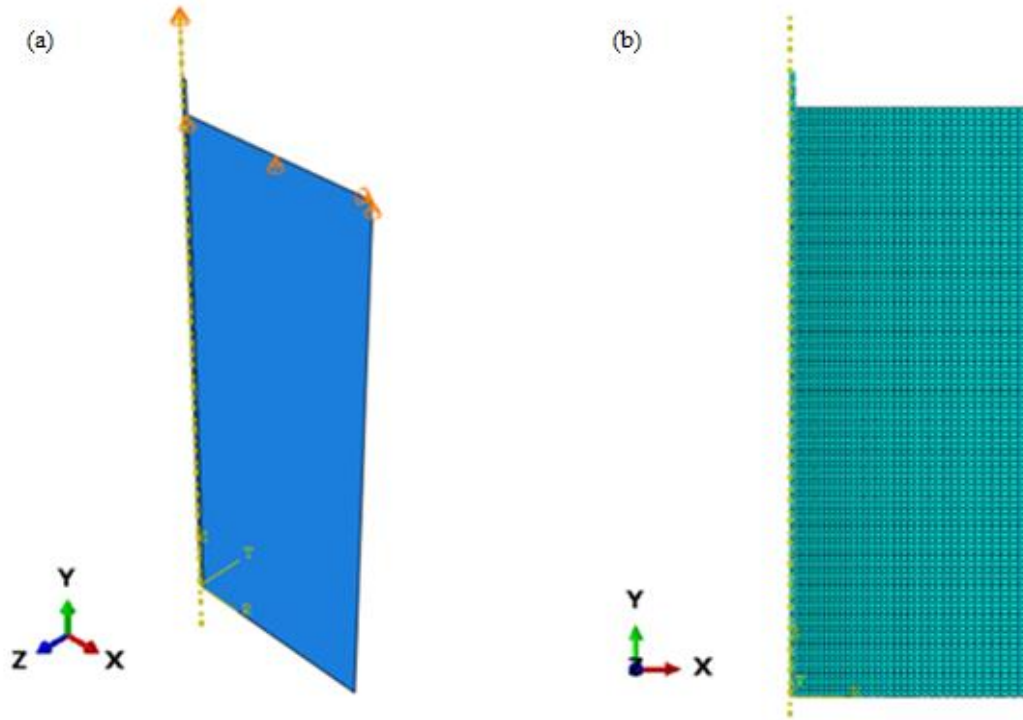


Figura 31: (a) Vista isométrica del modelo axisimétrico con condiciones de frontera definidas (b) Enmallado del modelo numérico para el caso de fibra embebida de 5 mm.

En la Figura 32 se muestra el campo de esfuerzos cortantes en la interfaz fibra de *Ichu* – matriz cementicia en el instante en que se produce la desunión.

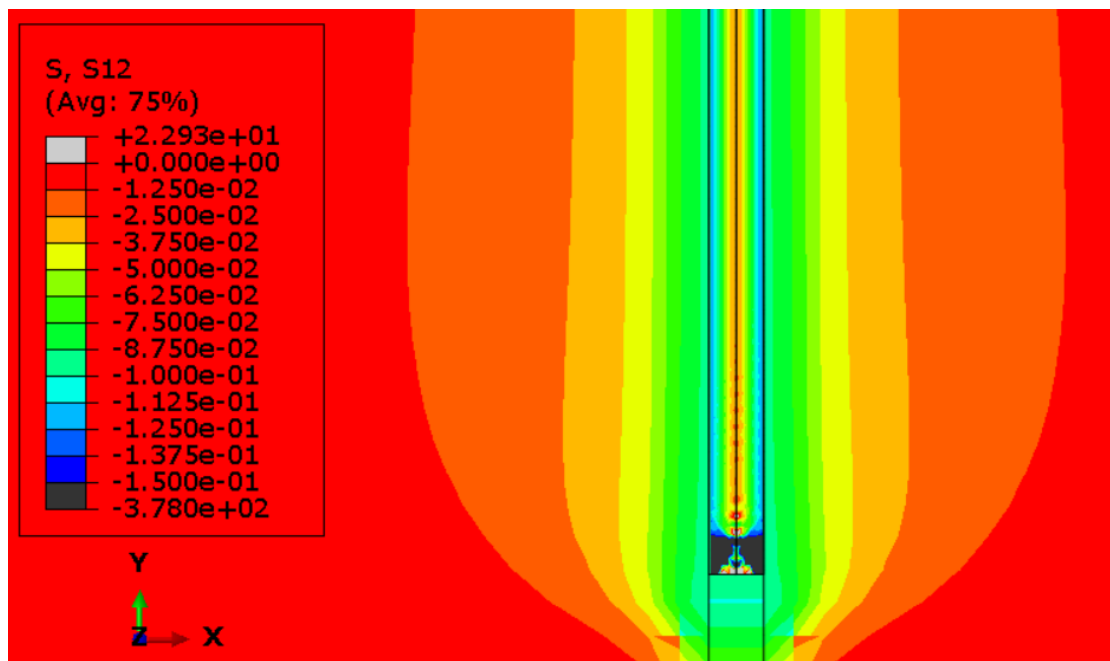


Figura 32: Campos de esfuerzo cortante en la interfaz fibra – matriz en el instante en que se produce la desunión, en el plano X-Y ó 1-2.



3.9.3 Proceso de calibración

La calibración numérica asegura una correspondencia apropiada con el fenómeno experimental. López et al. (2010) mencionan que, para garantizar la aproximación del modelo numérico con el ensayo experimental, dicho modelo está condicionado a los siguientes factores: densidad de la malla de elementos finitos, tipo de elemento finito, balance entre el costo computacional y su precisión, por ello, se realizó un análisis comparativo en la densidad de malla, tipo de elemento, exactitud y el costo computacional (tiempo). Del análisis resultó la definición de las características del modelo numérico.

De la curva media experimental obtenida, podemos obtener variables de control y el comportamiento del arrancamiento para el caso de una fibra embebida de 5 mm. De los cuales los principales parámetros de calibración son la fuerza máxima correspondiente a 0.189 N y el comportamiento cuasi exponencial en el tramo de deslizamiento.

Para realizar la calibración, primeramente, se estableció el tipo de interacción en entre los elementos fibra-matriz, para ello se asignó el contacto tipo superficie a superficie por la precisión que ofrece. Dentro de las propiedades de interacción, se consideró el comportamiento cohesivo y la propiedad de daño, en la propiedad “*Cohesive Behavior*” se introdujo el valor de rigidez cohesiva de 1.023 N/mm. o también llamado módulo de enlace por Naaman et al. (1991). En la propiedad “*Damage*” se asignó la magnitud en la cual se produce el inicio del daño o desunión de 0.143 MPa. Y en la pestaña evolución de daño, se estableció que sea de en función del desplazamiento y tenga un comportamiento exponencial, además, se introduce el valor del desplazamiento total, para este caso en particular el valor de 5 mm. Iterativamente se halló la magnitud del parámetro exponencial hasta que la curva ajuste de mejor manera con la curva experimental, obteniendo un factor exponencial de 8.

Es importante que la curva numérica resulte contenida entre las curvas que representan la variabilidad máxima y mínima de la curva experimental, por lo cual, si vemos el resultado del modelo calibrado en la Figura 33, consideramos que la calibración está en concordancia con el resultado experimental.

Para determinar la curva fuerza – desplazamiento de los casos de 3, 7, 9 y 11 mm. de longitud de fibra embebida a partir del modelo numérico calibrado, es necesario obtener el factor exponencial respectivo, para ello, se consideró las Ecuaciones (6) y (7) que representan la relación de dos longitudes de fibra embebida; la primera es la longitud con la cual se calibró el modelo numérico y la segunda longitud corresponde al modelo numérico predictivo, con dicha relación se obtiene el factor exponencial para la nueva longitud de fibra y así lograr asignar dicho factor en el modelo numérico predictivo.



$$a^{Fe_i} = b_i \tag{6}$$

$$b_i = \frac{Dt_i b_5}{5} \tag{7}$$

Donde: a Base exponencial, Fe_i Factor exponencial correspondiente al caso i , b_i Potencia resultante del caso i , Dt_i Desplazamiento total correspondiente al caso i , b_5 Potencia resultante del caso 5 o longitud de fibra embebida de 5 mm.

Los valores obtenidos mediante las ecuaciones mencionadas se resumen en la Tabla 12.

Tabla 12: Factor exponencial para el modelo numérico predictivo.

Caso	a	Dt_i	b_i	Fe_i
3 mm.	3.00	3.00	3936.39	7.53
5 mm.	3.00	5.00	6560.65	8.00
7 mm.	3.00	7.00	9184.92	8.31
9 mm.	3.00	9.00	11809.18	8.53
11 mm.	3.00	11.00	14433.44	8.72

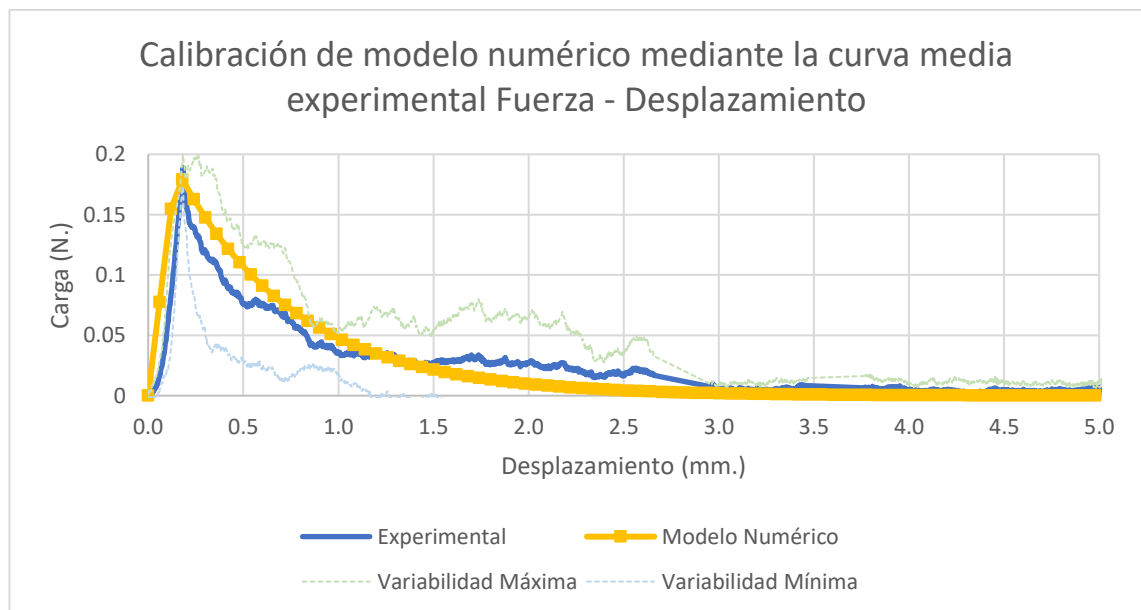


Figura 33: Calibración de modelo numérico mediante la curva media experimental Fuerza – Desplazamiento.



El modelo numérico calibrado para el caso de 5 mm. de longitud de fibra embebida resulta bastante próximo a la curva media obtenida del modelo experimental, por lo tanto, se considera valido para realizar modelos predictivos con diferente magnitud de la longitud de fibra embebida.

En la obtención de la curva carga – desplazamiento de forma numérica y utilizando el software Abaqus, la formulación y las leyes que se utilizaron son semejantes a las utilizadas en el comportamiento constitutivo de tracción-separación elástica lineal, con criterio de inicio y evolución del daño. El comportamiento elástico se describe en términos de una matriz constitutiva elástica que relaciona las tensiones normales y cortantes con sus respectivas separaciones.

El mecanismo de falla se compone de dos partes, un criterio de iniciación del daño y una ley de evolución del daño. La respuesta inicial es lineal, el inicio del daño ocurre cuando las tensiones de contacto cumplen el criterio establecido de inicio de daño, para el estudio se utilizó el esfuerzo resistente al corte interfacial de 0.143 MPa., una vez cumplido el criterio de inicio de daño. La evolución del daño describe la velocidad a la que se degrada la rigidez cohesiva, hay dos componentes que definen la evolución del daño, el primero es especificar la separación de falla completa o la energía disipada debido a la falla, para el presente caso se definió mediante la separación. El segundo componente es especificar la naturaleza de la evolución de la variable daño, para el presente estudio se definió el ablandamiento exponencial.

Es preciso indicar que en el modelo numérico no se ha considerado el contacto por fricción, porque para que se active el comportamiento friccional es necesario contar con una tensión normal en la interfaz y el modelo numérico utilizado es la representación ideal de una fibra, es decir, su forma geométrica es regular y simétrica sin imperfecciones, característica que no se presenta en la realidad, pues la fibra posee irregularidades en su longitud como en su sección, es por ello que el modelo numérico idealizado no genera tensiones normales, sin embargo, dichas tensiones se podrían generar utilizando otros métodos, los cuales no se ha considerado en el presente estudio, para ello sería necesario contar con diferentes parámetros, para los cuales es necesario realizar estudios particulares.

Para obtener el comportamiento friccional de la curva carga – desplazamiento se hizo uso de la herramienta que posee el software Abaqus que predefine dicho comportamiento, ya sea lineal o exponencial, para el presente caso se definió como un comportamiento exponencial, adicionalmente el software Abaqus solicita el factor exponencial que ajusta la curva, factor que mediante una función potencial (ver



Ecuaciones (6) y (7)) se puede obtener para cualquier longitud de fibra embebida, logrando con ello, el potencial predictivo del modelo numérico.

3.10 ANÁLISIS ANALÍTICO

Para realizar el análisis analítico se ha considerado las siguientes magnitudes de las propiedades de la fibra de *Ichu*: módulo de elasticidad de la fibra de *Ichu* tratada de 35.96 GPa. y como esfuerzo normal máximo de 568.61 MPa. según el reporte de Tenazoa (2020) y un diámetro medio de la fibra de 83.46 μm . según los resultados del análisis experimental. Las propiedades mecánicas de la matriz cementicia consideradas para el análisis analítico son: módulo de elasticidad de 6,800 MPa. según Mariscal (2001) y un coeficiente de Poisson de 0.30.

Respecto a las propiedades de la interfaz, se consideró un esfuerzo de corte interfacial de 0.143 MPa. y la longitud en que se produce la desunión de la interfaz de 0.184 mm. según los resultados experimentales obtenidos. Las magnitudes de las propiedades mecánicas de los materiales y de la interfaz se resumen en la Tabla 13.

Tabla 13: *Magnitudes de las propiedades mecánicas de los materiales y de la interfaz utilizadas para el cálculo analítico, según Tenazoa (2020) y Mariscal (2001).*

Propiedades mecánicas de los materiales y de la interfaz	Magnitud
Módulo de elasticidad de la fibra tratada (GPa.)	35.96
Diámetro medio de la fibra tratada (μm .)	83.46
Esfuerzo normal máximo de la fibra tratada (MPa.)	568.61
Módulo de elasticidad de la matriz cementicia (GPa.)	6.80
Módulo de Poisson de la matriz cementicia	0.30
Desplazamiento en el que se produce la desunión (mm.)	0.184
Esfuerzo de corte interfacial fibra-matriz (MPa.)	0.143

3.10.1 Diagrama fuerza - desplazamiento

Para obtener el diagrama fuerza – desplazamiento de forma analítica se consideró la formulación propuesta por Enrique (1993), donde valora la relación de las propiedades mecánicas de los materiales, como es el caso de la relación del módulo de elasticidad de la matriz cementicia E_m y el módulo de elasticidad de la fibra E_f , dicha relación adimensional es denominada ε , como se observa en la Ecuación (8).



$$\varepsilon = \frac{E_m}{E_f} \quad (8)$$

Otro coeficiente adimensional utilizado por Enrique (1993) es λ_d , que relaciona el radio de la fibra r_f entre la diferencia de la longitud de fibra embebida L_e y la longitud de desunión L_d .

$$\lambda_d = \frac{r_f}{L_e - L_d} \quad (9)$$

El coeficiente K_D relaciona los anteriores coeficientes ε y λ_d , además de la longitud de fibra embebida L_e , la longitud de desunión L_d , el coeficiente de Poisson de la matriz cementicia ν_m , el radio de la fibra r_f y el coeficiente α ; llamado por Enrique (1993) como el índice de ajuste, valor que se asume según se ajuste a una curva experimental. Otra de las condicionantes es que el valor de K_D deberá ser superior a 1, según la Ecuación (10) se calculó el valor de K_D para cada longitud de fibra embebida analizada en la presente tesis.

$$K_D = \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\lambda_d \sqrt{(1 + \nu_m) \alpha \ln\left(\frac{L_e - L_d}{r_f}\right)}} \quad (10)$$

Con la Ecuación (11) obtenida de Enrique (1993) la cual fue obtenida utilizando funciones hiperbólicas; se puede calcular la fuerza en función del desplazamiento z utilizando los coeficientes mencionados líneas arriba, el valor de z se encuentra en el rango desde 0 hasta el valor de la longitud de fibra embebida L_e , el esfuerzo de corte interfacial τ_s que corresponde a la fuerza máxima de unión de la interfaz.

$$F = \frac{2\tau_s \pi r_f L_e}{\cosh(K_D)} \cosh\left[K_D \left(1 - \frac{z - L_D}{L_e - L_D}\right)\right] \quad (11)$$

En la Tabla 14 se presenta las magnitudes de la fuerza máxima de la curva carga – desplazamiento obtenido mediante la formulación analítica de Enrique (1993) así como los coeficientes considerados, los valores mostrados corresponden a los cinco casos de longitud de fibra embebida analizados en la presente tesis.



Tabla 14: *Magnitudes de fuerza máxima y factores obtenidos del análisis analítico*

Caso	ε	λ_d	K_D	α	F_{max} (N.)
3 mm.	0.189	0.0148	26.739	3	0.113
5 mm.	0.189	0.0087	43.068	6	0.188
7 mm.	0.189	0.0061	58.839	10	0.263
9 mm.	0.189	0.0047	74.252	15	0.338
11 mm.	0.189	0.0039	89.405	21	0.413

En la Figura 34 se presenta la comparativa del diagrama de fuerza – desplazamiento del resultado experimental, numérico y analítico para el caso de una fibra embebida de 5 mm., la curva analítica en su comportamiento deslizante tiene gran semejanza con la curva obtenida del análisis numérico, sin embargo, en la magnitud de la fuerza máxima se encuentra una pequeña diferencia. La fuerza máxima del análisis experimental, del análisis analítico y del análisis numérico resultó: 0.189 N., 0.188 N. y 0.179 N., respectivamente.

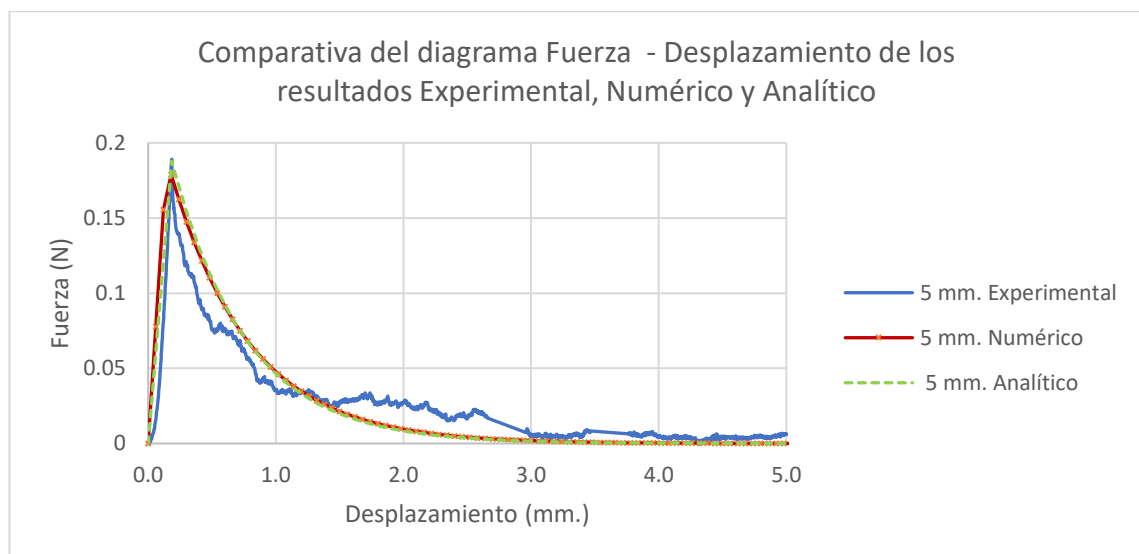


Figura 34: *Comparativa del diagrama Fuerza - Desplazamiento de los resultados Experimental, Numérico y Analítico para el caso de una fibra embebida de 5 mm.*

3.10.2 Esfuerzo normal máximo en la fibra durante el arrancamiento

Para obtener el esfuerzo normal máximo producido durante el arrancamiento en la fibra de *Ichu*, se puede utilizar la Ecuación (2), sin embargo, la forma más directa de obtener el esfuerzo es mediante la relación fuerza sobre área seccional de la fibra, para



ello, se ha considerado un diámetro de fibra de 83.46 μm . El esfuerzo obtenido mediante las dos formas es de igual magnitud.

3.10.3 Longitud crítica de la fibra

La longitud crítica de la fibra en la interfaz fibra de *Ichu* – matriz cementicia se obtuvo a través de la relación del esfuerzo último axial de la fibra y el esfuerzo de corte interfacial de la interfaz, mediante la Ecuación (2) de Bowyer et al. (1972). La magnitud del esfuerzo último axial de la fibra de $\sigma_{uf} = 568.61 \text{ MPa}$., se obtuvo de Tenazoa (2020).

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES, NUMÉRICOS Y ANALÍTICOS

4.1.1 Propiedades de contacto cohesivo de la interfaz fibra-matriz

De los ensayos experimentales se obtuvo las propiedades de contacto cohesivo de la interfaz fibra de *Ichu* – matriz cementicia, dos de las principales propiedades halladas son la rigidez de contacto cohesivo y el esfuerzo de corte interfacial, las magnitudes se detallan en la Tabla 15.

Tabla 15: Magnitud de las propiedades de contacto cohesivo de la interfaz.

Propiedad cohesiva	Magnitud
Rigidez del contacto cohesivo (N/mm)	1.023
Esfuerzo de corte interfacial (MPa)	0.143
Energía de arrancamiento (N.mm) *	0.134

Nota: * Magnitud para el caso de 5 mm. de longitud de fibra embebida.

4.1.2 Curva fuerza – desplazamiento por arrancamiento de fibra única

La tendencia del resultado numérico de la curva fuerza – desplazamiento se aproxima a la curva obtenida experimentalmente para el caso particular de longitud de fibra embebida de 5 mm, ver Figura 35.

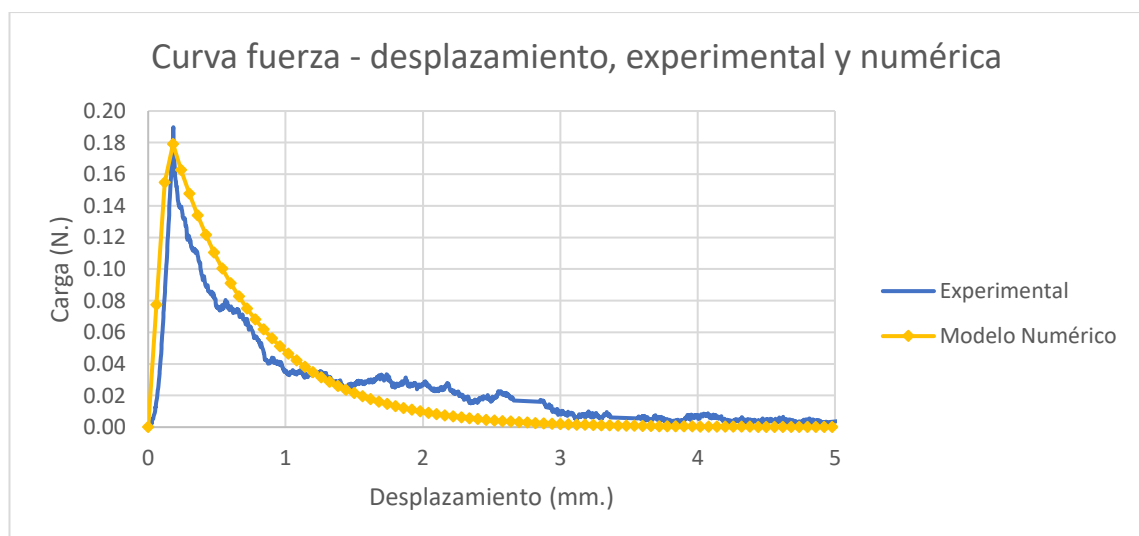


Figura 35: Diagrama fuerza – desplazamiento, numérico y experimental.



En la Figura 36 se muestra las curvas de la relación fuerza – desplazamiento en el extremo libre de la fibra para los cinco casos de fibra embebida (3mm, 5mm, 7mm, 9mm y 11mm) mediante análisis numérico. Se puede apreciar que la fuerza se incrementa a medida que la profundidad de fibra embebida en la matriz cementicia es mayor,

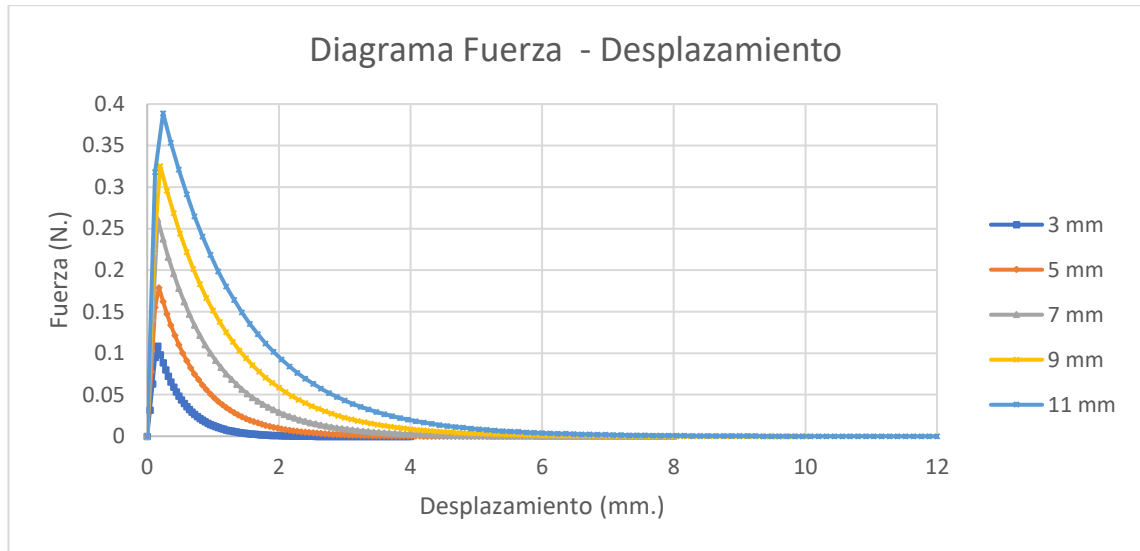


Figura 36: *Diagrama fuerza - desplazamiento de los resultados numéricos para los cinco casos de fibra embebida.*

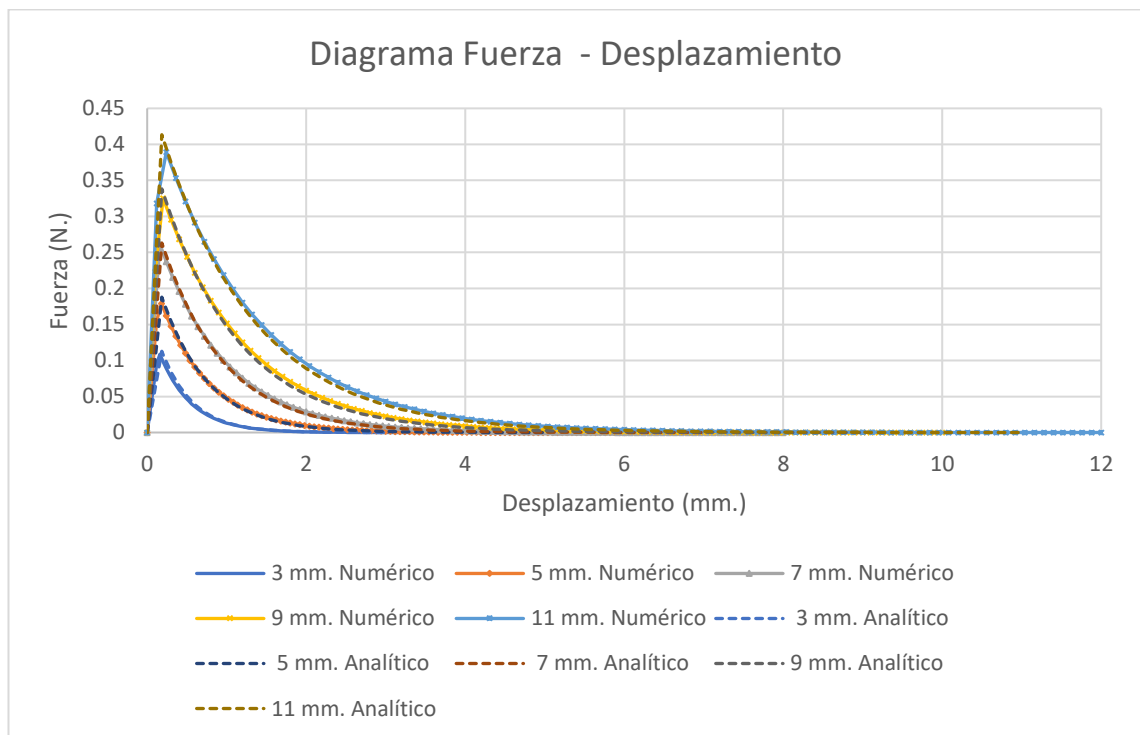


Figura 37: *Comparativa del diagrama fuerza - desplazamiento de los resultados numéricos y analíticos para los cinco casos de fibra embebida.*

En la Figura 37 se realiza la comparativa del diagrama fuerza – desplazamiento obtenido mediante el análisis numérico y analítico, se observa gran correspondencia en las tendencias y en las magnitudes de fuerza máxima.

4.1.3 Precisión del modelo predictivo

El principal parámetro para verificar la precisión del modelo numérico predictivo es la fuerza máxima en la curva fuerza – desplazamiento, en la Tabla 16 se muestra la magnitud de fuerza máxima de la curva media experimental obtenida para el caso de 5 mm. de longitud de fibra embebida, así como la fuerza máxima para los casos restantes mediante calculo analítico, finalmente se aprecia la fuerza máxima para los 5 casos del modelo numérico y el porcentaje de precisión respecto al cálculo analítico.

Tabla 16: *Magnitud de fuerza máxima experimental, aproximación analítica y numérico*

Caso	Fuerza máxima de la curva carga - desplazamiento			
	Experimental (N.)	Analítico (N.)	Numérico (N.)	Precisión (%)
3 mm.	-	0.113	0.109	96.43%
5 mm.	0.189	0.188	0.179	95.23%
7 mm.	-	0.263	0.261	99.32%
9 mm.	-	0.338	0.325	96.18%
11 mm.	-	0.413	0.389	94.15%

La precisión del parámetro fuerza máxima del modelo numérico se encuentra por encima del 94.15 % hasta llegar al 99.32 % de precisión para el caso de 7 mm., si obtenemos el promedio de precisión del modelo numérico predictivo de los cinco casos, se pronostica $96.26 \% \pm 1.93 \%$ de exactitud.

4.1.4 Esfuerzo normal en la fibra durante el arrancamiento

En la Tabla 17 se muestra los esfuerzos máximos normales en la fibra durante el arrancamiento obtenidos de forma analítica y mediante el análisis numérico.

La Figura 38 muestra el diagrama de los esfuerzos normales a lo largo del eje de la fibra para los cinco casos mencionados de fibra embebida. Comparado con lo obtenido por Tenazoa (2020), donde se indica que la fibra de *Ichu* tiene un esfuerzo normal ultimo de 568.61 MPa, en el analisis numérico en ninguno de los cinco casos se llego a tal

esfuerzo. En la Tabla 17 se muestra los máximos esfuerzos normales en la fibra obtenidos de forma analítica y mediante el análisis numérico.

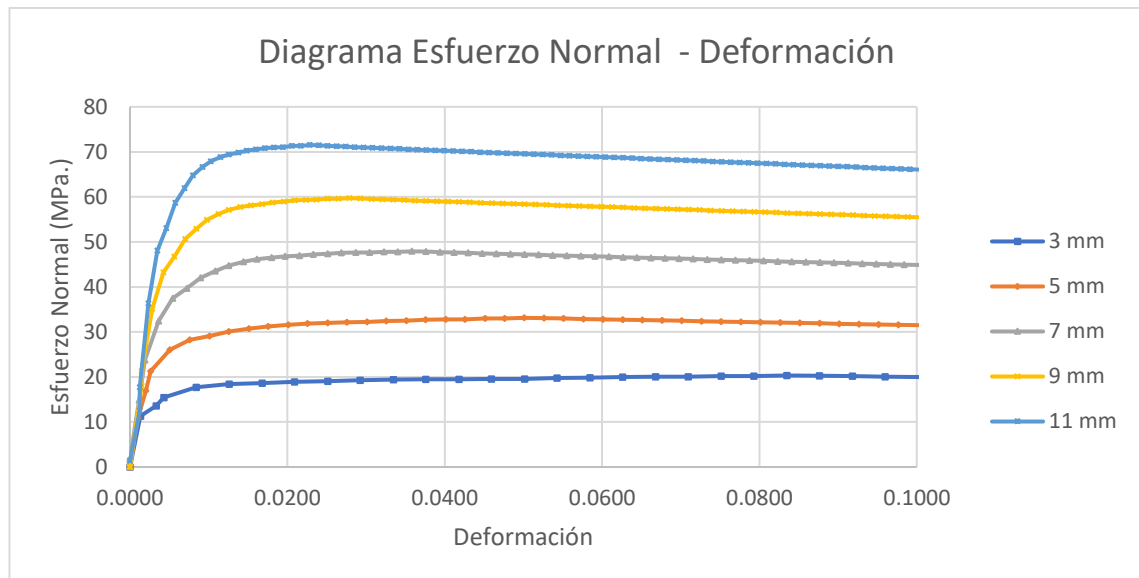


Figura 38: Diagrama de esfuerzo normal para los cinco casos de fibra embebida.

Tabla 17: Esfuerzo normal máximo en la fibra durante el arrancamiento.

Caso	Esfuerzo normal máximo en la fibra		
	Analítico (MPa.)	Numérico (MPa.)	Precisión (%)
3 mm.	20.61	20.33	98.65
5 mm.	34.35	33.13	96.44
7 mm.	48.09	47.90	99.61
9 mm.	61.83	59.72	96.59
11 mm.	75.57	71.51	94.63

Según la Figura 38 los esfuerzos normales obtenidos mediante el modelo numérico son significativamente inferiores al esfuerzo normal último de la fibra de *Ichu* de 568.61 MPa. El esfuerzo normal se incrementa a medida que la interfaz fibra-matriz tiene mayor longitud, la longitud donde se alcance el esfuerzo normal último de la fibra es conocido como la longitud crítica.

4.1.5 Longitud crítica de la fibra de *Ichu* en la interfaz

La longitud crítica de la fibra en la interfaz fibra de *Ichu* – matriz cementicia obtenida para el presente caso estudiado es de 82.77 mm.



La longitud de fibra crítica obtenida es la longitud en la cual la fibra fallará por sobrepasar su esfuerzo axial último justo antes que se produzca la desunión de la interfaz fibra-matriz, es preciso mencionar que dicha longitud crítica es obtenida por un esfuerzo axial último promedio, pues este valor tiene una gran desviación estándar de ± 99.74 MPa, magnitud obtenida experimentalmente por Tenazoa (2020), por lo tanto, la longitud crítica hallada es susceptible a variabilidad por los datos utilizados.

4.1.6 Análisis mediante la prueba no paramétrica Kruskal Wallis de la variable Arrancamiento

Mediante la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis se realizó el análisis estadístico de la variable arrancamiento, considerando los resultados experimentales, analítico y numérico. La data evaluada se encuentra en la Tabla 18.

Tabla 18: Magnitud de fuerzas del ensayo de arrancamiento experimental, numérico y analítico para el caso de 5 mm. De longitud de fibra embebida.

Ensayo	Fuerza máxima		
	Experimental (N.)	Numérico (N.)	Analítico (N.)
ICT18	0.461	0.179	0.188
ICT20	0.188	0.179	0.188
ICT22	0.564	0.179	0.188
ICT23	0.300	0.179	0.188
ICT38	0.115	0.179	0.188
ICT43	0.213	0.179	0.188
ICT47	0.219	0.179	0.188
ICT52	0.252	0.179	0.188
ICT53	0.091	0.179	0.188
ICT55	0.148	0.179	0.188
ICT58	0.189	0.179	0.188
ICT62	0.067	0.179	0.188
ICT63	0.104	0.179	0.188
ICT64	0.228	0.179	0.188

De la evaluación de la magnitud de fuerza máxima obtenidas a través del análisis experimental, numérico y analítico mediante la prueba no paramétrica Kruskal Wallis, con un nivel de significancia del 5 %, se obtuvo el P-Valor de 0.001913 o 0.1913 %, por



lo tanto, los resultados de la fuerza máxima del análisis experimental, numérico y analítico, no tienen diferencia significativa.

4.2 RESULTADOS RESPECTO A LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS

OE - 1: Determinar la magnitud máxima del esfuerzo de corte interfacial generado por el arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia.

La magnitud máxima del esfuerzo de corte interfacial producto del arrancamiento obtenidos del análisis experimental, analítico y numérico para los casos de longitud de fibra embebida, se detallan en la Tabla 19.

Tabla 19: *Esfuerzos de corte interfacial (IFSS), experimental, analítico y numérico.*

Caso	Experimental		Analítico		Numérico	
	Fuerza máxima (N)	IFSS (MPa)	Fuerza máxima (N)	IFSS (MPa)	Fuerza máxima (N)	IFSS (MPa)
3 mm.	-	-	0.113	0.142	0.109	0.137
5 mm.	0.189	0.143	0.188	0.142	0.179	0.136
7 mm.	-	-	0.263	0.142	0.261	0.141
9 mm.	-	-	0.338	0.142	0.325	0.137
11 mm.	-	-	0.413	0.142	0.389	0.134
Promedio				0.142		0.137
Desviación estándar				0.000		0.003

El esfuerzo de corte interfacial correspondiente a la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia es 0.143 MPa. como resultado a través de las pruebas experimentales y 0.137 MPa. como media de los resultados numéricos.

De las catorce curvas carga – desplazamiento obtenidas, se halló el esfuerzo de corte interfacial para cada una de ellas, de lo cual el promedio resultó 0.123 MPa. \pm 0.042 MPa., con lo cual se evidencia que el esfuerzo de corte interfacial 0.143 MPa. determinado a través de la curva representativa carga – desplazamiento, se encuentra dentro del rango de varianza de los ensayos experimentales.

OE - 2: Determinar el tipo de curva carga – desplazamiento generado por el arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia.

El tipo de curva carga – desplazamiento obtenido a través de los ensayos experimentales demuestran que es el tipo *softening*, sin embargo, si analizamos independiente cada una de las pruebas (ver Figura 28 y Figura 29), se encuentra casos atípicos y otros con considerable variabilidad.

Mediante análisis estadístico y criterios de exclusión se obtuvo la curva media experimental (ver Figura 39) la cual es representativa en magnitud de carga y en el tipo de curva, además, se incluye los límites de variabilidad de la fuerza en función del desplazamiento.

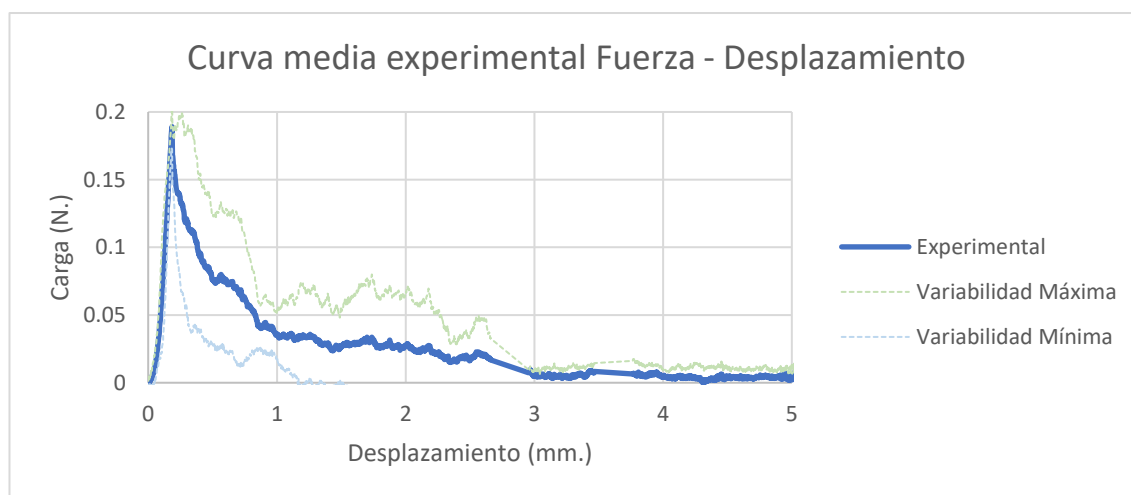


Figura 39: Curva media experimental fuerza – desplazamiento con límites de variabilidad

OE - 3: Determinar el principal modo de falla generado por el arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia.

El principal modo de falla producido por el arrancamiento es por *debonding* o desunión, esto se puede apreciar en las curvas de los ensayos experimentales, en la gran mayoría de las pruebas se evidencia el desarrollo del tramo elástico de la interfaz fibra-matriz, luego se da el inicio de desunión hasta llegar al punto donde se ocurre la desunión para luego producirse el deslizamiento dinámico o extracción, como lo indica Naaman et al. (1991) literalmente: “Un aumento en el valor de la carga en la punta de la fibra conduce a una desunión progresiva a lo largo de la interfaz fibra-matriz. Una vez que el despegue alcanza el extremo incrustado de la fibra, se observa un mecanismo dinámico de extracción”.

Shah et al. (1988) observaron que la mayor contribución de la absorción de energía debido a la adición de fibras es proporcionada principalmente por las fuerzas de fricción interfaciales durante la extracción de la fibra y recomendaron que en un compuesto reforzado con fibra se debe evitar la fractura de la fibra para obtener una mayor absorción



de energía. La evidencia física de que el tipo de falla en los ensayos experimentales corresponde a desunión, es que durante los ensayos no se produjo la fractura de la fibra en ninguno de los casos.

OE - 4: Determinar la longitud crítica de la fibra resistente a arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia.

La longitud crítica de la fibra de *Ichu* resistente a arrancamiento en la interfaz es de 82.77 mm., esta longitud se obtuvo a través de la Ecuación (2), considerando los valores obtenidos mediante el ensayo experimental, como el esfuerzo de corte interfacial 0.143 MPa, diámetro medio de la fibra de 83.546 μm . y el esfuerzo normal máximo de la fibra de *Ichu* de 568.61 MPa. Vale mencionar que cada uno de los términos asignados en la Ecuación (2) tienen variabilidad en su magnitud, por lo tanto, la longitud crítica de la fibra obtenida tiene margen de imprecisión en su magnitud.

4.3 RESULTADOS RESPECTO AL OBJETIVO GENERAL

OG: Determinar las características del tipo de curva carga - desplazamiento, del modo de falla, y la magnitud del esfuerzo de corte interfacial y de la longitud crítica de la fibra en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia mediante análisis numérico y experimental por arrancamiento (*pull-out*).

De acuerdo a los resultados respecto a los objetivos específicos se los resultados del objetivo general son: La curva típica del ensayo de arrancamiento (*pull-out*) es de tipo *softening* o deslizamiento por ablandamiento, el modo de falla se produce por desunión o *debonding*, la magnitud del esfuerzo de corte interfacial es 0.143 MPa por medios experimentales y 0.137 MPa como resultado del análisis numérico. La longitud crítica de la fibra en la interfaz fibra de *Ichu* – matriz cementicia es de 82.77 mm.



CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN

5.1 DESCRIPCIÓN DE LOS HALLAZGOS MAS RELEVANTES Y SIGNIFICATIVOS

HALLAZGO 1:

El hallazgo más relevante de la investigación es la obtención de las propiedades cohesivas de la interfaz fibra de *Ichu* – matriz cementicia, con un esfuerzo de corte interfacial de 0.143 MPa y 1.023 N/mm. de rigidez cohesiva.

HALLAZGO 2:

Otro de los resultados relevantes de la investigación es la obtención de un modelo numérico calibrado con el cual es factible predecir la curva fuerza – desplazamiento para diferentes casos de longitud de fibra embebida, los resultados del modelo numérico han sido comparado con resultados analíticos, demostrando un alto nivel de precisión. Mediante el modelo es posible obtener diversos esfuerzos, como el esfuerzo normal en la fibra y magnitudes que mediante un análisis experimental es complejo de obtener.

5.2 LIMITACIONES DEL ESTUDIO

LIMITACIÓN 1:

La limitación no propia de la investigación, pero si con gran incidencia fue el contexto por la pandemia por el COVID-19, pues, estaba previsto realizar las pruebas experimentales en la ciudad de Lima, en los laboratorios de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC) y las restricciones dadas por el gobierno de turno mediante el decreto supremo N°044-2020-PCM, donde se declaraba el estado de emergencia nacional y el aislamiento social obligatorio, así como la restricción de acceso a servicios públicos, la limitación a la libertad de tránsito y del transporte a nivel nacional, dificultaron el normal desarrollo del plan de investigación.

LIMITACIÓN 2:

La presente investigación esta auspiciada por el CONCYTEC mediante el proyecto de investigación titulada “Fabricación de paneles de fibrocemento utilizando materiales obtenidos a partir de plantas endémicas del Perú” como parte del Proyecto de



Investigación Aplicada y Desarrollo Tecnológico E041-2018-01-BM CONCYTEC-BANCO MUNDIAL, ello contempla diversos acuerdos y compromisos, como es el caso de entregables por cronograma y con una fecha determinada para culminar la investigación, con las limitaciones del contexto de actual que se menciona líneas arriba y por la premura del tiempo, no se dio la posibilidad de abarcar muchos aspectos de lo que se tenía previsto desarrollar

LIMITACIÓN 3:

Otro de las circunstancias que no estaban previstas en su total magnitud, es la fragilidad de las muestras. el diámetro medio de la fibra es de 84 μm ., ello, hace compleja su manipulación y es vulnerable a cualquier descuido. El proyecto de investigación consideró 20 muestras válidas, en la elaboración de muestra de previo estas pérdidas por ello se elaboraron en una mayor cantidad, sin embargo, las pérdidas se dieron en mayor medida, por lo cual, finalmente se obtuvieron 14 ensayos válidos.

LIMITACIÓN 4:

No se pudo realizar la comprobación experimental de la longitud crítica hallada por medio analíticos, porque para ello era necesario contar las propiedades cohesivas de la interfaz, en particular con el esfuerzo de corte interfacial y debido al contexto social, no se pudo realizar nuevos ensayos experimentales que confirmen lo obtenido en la presente tesis.

5.3 COMPARACIÓN CRÍTICA CON LA LITERATURA EXISTENTE

COMPARACIÓN 1:

Del valor obtenido de esfuerzo de corte interfacial de 0.143 MPa para la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia, la referencia más próxima al presente estudio es el realizado por Tenazoa et al. (2018), donde para una fibra de *Ichu* en una matriz cementicia obtuvo un esfuerzo de enlace friccional de 0.09 MPa (ver Tabla 1), si consideramos que el el esfuerzo de enlace friccional se produce tras el decaimiento del esfuerzo de corte interfacial como indica Li et al. (2009). El esfuerzo de corte interfacial hallado de 0.143 MPa. al ser de mayor magnitud que el esfuerzo de enlace friccional de 0.09 MPa. de Tenazoa et al. (2018) resulta coherente, por ello, consideramos como valida la magnitud hallada del esfuerzo de corte interfacial.



COMPARACIÓN 2:

En el estudio de Pacios et al. (1997) nos muestra el resultado de curvas *pull-out* para fibras de diferente naturaleza, fibra de nylon y de acero. En la Figura 1 se observa la máxima carga alcanzada para estas dos fibra, si realizamos la comparacion de la fuerza máxima obtenida para el caso analizado en la presente; donde se obtuvo una fuerza máxima de 0.189 N. para una longitud de fibra embebida de 5 mm. Entonces la union de la interfaz entre la fibra de *Ichu* y la matriz cementicia no tiene una gran magnitud en su resistencia interfacial, si bien la diferencia es considerable respecto a la fuerza máxima de una fibra de nylon y de acero, las fibras estudiadas por Pacios son materiales usados para elementos estructurales, la fibra de *Ichu* podría ser de gran utilidad para elementos no estructurales.

COMPARACIÓN 3:

En la investigación realizada por Redon et al. (2001) En la Figura 2 nos muestra las diferentes curvas de fuerza-desplazamiento de ensayos experimentales para un mismo caso, en las 7 curvas podemos apreciar la dispersión en su comportamiento. La difusión en el resultado no solo se produce en el comportamiento durante el deslizamiento como en el caso de Redon et al. (2001), la dispersión también se produce en la fuerza máxima de la curva carga-desplazamiento, esto lo indica Gray (1984) y lo demuestra en la Figura 5, en nuestro caso esta dispersión también se hizo evidente en los resultados experimentales. En Naaman et al. (1991) realiza una comparación de pruebas experimental con su modelo analítico (ver Figura 4), obteniendo un comportamiento de deslizamiento suave muy similar al comportamiento obtenido en la presente por medios experimentales y numéricos (ver Figura 33), con las obvias diferencias en las magnitudes.

COMPARACIÓN 4:

Li et al. (2009) realizó un estudio de fibras de cáñamo y polipropileno tratadas con hongos de pudrición blanca para hallar el esfuerzo de corte interfacial, a través de pruebas *pull-out* y métodos como el método de Bowyer y Bader (1972), sus resultados muestran que las fibras tratadas obtuvieron un mayor esfuerzo de corte interfacial y se debe a que la aplicación de hongos producen la eliminación de sustancias no celulósicas lo que genera una mayor adhesión con la matriz y en la comparación del esfuerzo de corte interfacial de la prueba *pull-out* y el método de Bowyer y Bader, halla una considerable diferencia, ello demuestra que el tratamiento de la fibra de *Ichu* es necesario para una



mejor unión con la matriz cementicia y que el esfuerzo hallado es dependiente del ensayo o medio por el cual es hallado.

5.4 IMPLICANCIAS DEL ESTUDIO

El Perú se cuenta con una gran diversidad de flora, de los cuales muchas de las especies tienen el potencial para ser usados como refuerzo en compuestos. La investigación se centra en el caso particular de la fibra de *Ichu*, donde se hallaron las propiedades cohesivas en la interfaz fibra de *Ichu* - matriz cementicia y un modelo numérico predictivo, este estudio da fundamento al potencial de la fibra de *Ichu* para la preparación de paneles de fibrocemento, así aportar en el objetivo de dar valor agregado a esta materia, además de estimular a los moradores de las zonas alto andinas al uso de especies endémicas y sea fuente para obtener ingresos económicos con la cosecha y producción de materiales compuestos a partir de la fibra de *Ichu*.

CONCLUSIONES

CONCLUSIÓN 1:

Se logró demostrar la hipótesis general parcialmente: “Las características del tipo de curva carga – desplazamiento y del modo de falla en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia obtenidos mediante el análisis numérico y experimental por arrancamiento (*pull-out*) son: Curva del tipo *softening* y modo de falla por *debonding*, la magnitud del esfuerzo de corte interfacial y de la longitud crítica de la fibra son: 0.09 MPa. y 100 mm., respectivamente”.

Respecto al tipo de curva carga – desplazamiento, de acuerdo a Redon et al. (2001) el resultado experimental de los ensayos de arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia corresponde al tipo *softening* o deslizamiento por ablandamiento. Respecto al modo de falla, según la curva media experimental obtenida y lo mencionado por Redon et al. (2001) la unión de la interfaz se produjo por enlace químico y el principal modo de falla generado por el arrancamiento (*pull-out*) sucede por desunión entre las fases o *debonding*. La magnitud del esfuerzo de corte interfacial en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia es 0.143 MPa. Resultando mayor a el valor referencial de 0.09 MPa de Tenazoa et al. (2018). La magnitud de la longitud crítica obtenida en la presente investigación según la ecuación de Bowyer et al. (1972) es de 82.77 mm. En la obtención de las curvas experimentales se observaron casos atípicos con



el deslizamiento por endurecimiento, esto podría deberse al efecto *misfit*, es decir por la contracción de la matriz cementicia durante su fraguado.

CONCLUSIÓN 2:

Se logró demostrar la sub hipótesis: “La magnitud máxima del esfuerzo de corte interfacial generado por el arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia es mayor que 0.09 MPa”.

La magnitud máxima del esfuerzo de corte interfacial obtenida a través del análisis experimental por la prueba de arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia resultó 0.143 MPa. Siendo mayor al valor obtenido por Tenazoa et al. (2018) de 0.09 MPa. Teniendo en cuenta la variabilidad presente en este tipo de ensayos y que el esfuerzo obtenido por Tenazoa et al. (2018), es el valor de esfuerzo de enlace friccional, esfuerzo menor al esfuerzo de corte interfacial según la Figura 14 adaptada de Li et al. (2009), por tanto, consideramos la magnitud hallada como congruente.

CONCLUSIÓN 3:

Se logró demostrar la sub hipótesis: “El tipo de curva carga - desplazamiento generado por el arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia es del tipo *softening* (ablandamiento)”.

Por los resultados obtenidos de los posibles tipos de curva carga – desplazamiento según Redon et al. (2001), el tipo de curva carga – desplazamiento generado por el arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia correspondiente al análisis experimental es del tipo *softening* o también llamado deslizamiento por ablandamiento, donde la principal característica es el descenso en la magnitud de la carga con una tendencia exponencial.

CONCLUSIÓN 4:

Se logró demostrar la sub hipótesis: “El principal modo de falla generado por el arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia es desunión entre las fases (*debonding*)”.

De acuerdo a la curva media experimental obtenida de la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia (ver Figura 39) y Redon et al. (2001) que menciona que cuando el descenso de la fuerza máxima a la fuerza de enlace friccional de la curva carga – desplazamiento es considerable, entonces la unión se produce por enlace químico y el



proceso o el principal modo de falla generado por el arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz se da por desunión entre las fases o *debonding*.

CONCLUSIÓN 5:

No se logró demostrar la sub hipótesis: “La longitud crítica de la fibra resistente a arrancamiento (*pull-out*) en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia es de 100 mm.”.

Considerando un esfuerzo de corte interfacial en la interfaz fibra de *Ichu* y matriz cementicia de 0.143 MPa. y un esfuerzo último axial de la fibra de 568.61 MPa. se calculó la longitud crítica según la Ecuación (2) de Li et al. (2009) resultando 82.77 mm. Es necesario una longitud embebida en la matriz de 82.77 mm. para que la falla se produzca por resistencia de la fibra antes que se desarrolle la falla por corte de la interfaz, dicha longitud es también llamada la longitud crítica de la fibra resistente a arrancamiento (*pull-out*).

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIÓN 1:

Se recomienda realizar ensayos experimentales para compuestos con diferentes longitudes de fibra embebida.

RECOMENDACIÓN 2:

Se recomienda para trabajos donde involucre estudiar fibras de pequeñas dimensiones, tener cuidado en la manipulación de las muestras, pues su fragilidad la hacen muy vulnerables a cualquier evento.

RECOMENDACIÓN 3:

Se recomienda obtener las propiedades cohesivas para compuestos donde la matriz cementicia posea diferente relación agua cemento, pues se sabe que una baja relación a/c tiene una menor concentración de poros vacíos, lo cual podría aumentar en alguna medida el esfuerzo de corte interfacial.

RECOMENDACIÓN 4:

Se recomienda elaborar una cantidad superior de muestras a lo proyectado, debido a la variabilidad de respuestas obtenidas para el ensayo de arrancamiento (*pull-out*).



RECOMENDACIÓN 5:

Se recomienda realizar otro tipo de ensayos para comparar de la magnitud del esfuerzo a corte interfacial obtenido, como por ejemplo ensayos a flexión en compuestos prototipo de láminas de fibrocemento.

RECOMENDACIÓN 6:

Se recomienda realizar pruebas experimentales de arrancamiento (*pull-out*) de la interfaz fibra de *Ichu* – matriz cementicia para verificar la longitud crítica de la fibra obtenida en la presente investigación.

RECOMENDACIÓN 7:

Se recomienda realizar ensayos de flexión en compuestos reales que contengan la fibra de *Ichu* en diferentes longitudes para evaluar la longitud optima de la fibra, así como en diferentes proporciones de la misma.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abanto, C. F. (2009). *Tecnología del Concreto*. Lima: San Marcos E.I.R.L.
- Abaqus, D. S. (11 de Enero de 2016). *Abaqus Analysis User's Guide*. Obtenido de Abaqus Analysis User's Guide: <http://130.149.89.49:2080/v2016/books/usb/default.htm?startat=book01.html>
- Abdallah, S., Fan, M., & Rees, D. (2018). Bonding mechanisms and strength of steel fiber-reinforced cementitious composites: Overview. *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- Albarracín, K., Jaramillo, L., & Albuja, M. (2015). *Obtención de Bioetanol Anhidro a partir de Paja (Stipa ichu)*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Alwan, J., Naaman, A., & Hansen, W. (1991). Pull-out work of steel fibers from cementitious composites: Analytical investigation. *Cement & Concrete Composites*, 247-255.
- Arias, F. G. (2012). *El Proyecto de Investigación, Introducción a la metodología científica*. Caracas: EPISTEME.
- Arias, L., & Vanegas, L. (2004). Falla de los materiales compuestos laminados. *Scientia et Technica*, 113-118.
- ASOCRETO, A. C. (2010). *Tecnología del Concreto Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas*. Colombia: Nomos Impresores.
- ASTM C1186. (2002). *Standard specification for flat non-asbestos fiber-cement sheets*. New York: ASTM International.
- Bernal, T. C. (2010). *Metodología de la investigación*. Bogotá: Prentice Hall.
- Bheemreddy, V., Chandrashekhara, K., Dharani, L. R., & Hilmas, G. E. (2013). Modeling of fiber pull-out in continuous fiber reinforced ceramic composites using finite element method and artificial neural networks. *Computational Materials Science*, 79, 663-673.
- Bowyer, W., & Bader, M. (1972). On the re-inforcement of thermoplastics by imperfectly aligned discontinuous fibres. *Journal of Materials Science*, 1315-1321.
- Candiotti, S., Mantari, J., Flores, C., & Charca, S. (2020). Assessment of the mechanical properties of peruvian *Stipa Obtusa* fibers for their use as reinforcement in composite materials. *Composites Part A* 135.
- Cevallos, A. (2011). Elaboración de paneles ligeros a base de bagazo de caña de azúcar aglomerado con cemento pórtland. *Tesis de Maestría*. Universidad Nacional de la Loja, Loja.



- Cuauhtémoc, A. V. (2014). Estadística descriptiva y selección de la prueba. *Revista Mexicana de Cardiología*, 129-131.
- Dagnino, J. (2014). ANÁLISIS DE VARIANZA. *Rev Chil Anest*, 306-310.
- Enrique, I. (1993). *Numerical analysis of the pullout problem of a fiber embedded in a matrix : comparison with an approximate analytical solution*. Miami: Florida International University.
- Estévez, D. (2018). *Análisis experimental y simulación numérica de ensayos pull-out*. Coruña: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Ferreira, L., & Wang, C. (2016). Continuous modeling technique of fiber pullout from a cement matrix with different interface mechanical properties using finite element program. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 1937-1953.
- Frías, M., Caneda-Martínez, L., Sánchez de Rojas, I., Tenazoa, C., & Flores, E. (2020). Scientific and technical studies on eco-efficient binary cements produced with thermally activated ichu grass: Behaviour and properties. *Cement and Concrete Composites III*.
- Gay, D., Hoa, S., & Tsai, S. (2002). *Composite materials design and applications*. Paris: Editions Hermès.
- Gonzalez, M., Astudillo, J., Bozo, A., & Silva, R. (2010). *Estudio experimental de un material fibrocemento utilizando fibras de rastrojos de trigo*. Santiago: Universidad de Chile.
- Gray, R. (1984). Analysis of the effect of embedded fibre length on fibre debonding and pull-out from an elastic matrix. *Journal of Materials Science*, 1680-1691.
- Hernández, S. R., Fernández, C. C., & Baptista, L. P. (2010). *Metodología de la Investigación*. México: McGRAW-HILL.
- Huang, T., Zhang, Y., Su, C., & Lo, S. (2015). Effect of slip-hardening interface behavior on fiber rupture and crack bridging in fiber-reinforced cementitious composites. *Journal of Engineering Mechanics*.
- Irías, A. (2013). *Refuerzo de elementos estructurales con hormigones con fibras o solo fibras*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Isla, F. (2014). *Modelo para hormigones reforzados con fibras de acero*. Tesis de doctorado. Universidad Nacional de Tucuman, Tucuman.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de mezclas de Concreto*. Illinois: Portland Cement Association.
- Leung, C., & Shapiro, N. (1999). Optimal steel fiber strength for reinforcement of cementitious materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 116-123.



- Li, C., & Mobasher, B. (1998). Finite element simulations of fiber pullout toughening in fiber reinforced cement based composites. *Advanced Cement Based Materials*, 123–132.
- Li, V., & Stang, H. (1997). Interface property characterization and strengthening mechanisms in fiber reinforced cement based composites. *Advanced cement based materials*, 1-20.
- Li, V., Wu, H. C., & Chan, Y. W. (1995). Interface property tailoring for pseudo strain-hardening cementitious composites. *Advanced Technology for Design and Fabrication of Composite Materials and Structures*, 261-268.
- Li, Y., Pickering, K. L., & Farrell, R. L. (2009). Determination of interfacial shear strength of white rot fungi treated hemp fibre reinforced polypropylene. *Composites Science and Technology*, 69 (7-8), 1165-1171.
- Li, Z., Mobasher, B., & Shah, S. (1991). Characterization of interfacial properties in fiber-reinforced cementitious composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 2156-2164.
- Lin, Z., & Li, V. (1996). Crack bridging in fiber reinforced cementitious composites with slip-hardening interfaces. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 763 - 787.
- Löfgren, I. (2005). *Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction - a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis*. Göteborg: Chalmers University of Technology.
- López, M., Larrúa, R., Douglas, J., & Recarey, C. (2010). *Modelación numérica del ensayo pull-out para losas compuestas con lámina metálica colaborante*. La Habana: Universidad Central de Las Villas.
- MACCAFERRI. (2007). *Fibras como elemento estructural para el refuerzo del hormigón*. Maccaferri do Brasil Ltda.
- Mariscal, J. J. (2001). *Análisis de placas planas de fibrocemento en sección mixta con perfiles de acero*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Mármol, S. P. (2010). *Hormigones con Fibras de Acero características mecánicas*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, Máster en ingeniería de estructuras, cimentaciones y materiales.
- Martínez, M. (2016). *Guía para el diseño de refuerzos de elementos estructurales de hormigón armado mediante material compuesto por mallas de fibras minerales embebidas en matriz cementícea (FRCM)*. Santiago: Universidad de Chile.



- Merta, I., & Tschegg, E. (2013). Fracture energy of natural fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 991-997.
- Mobasher, B., & Li, C. (1995). Modeling of stiffness degradation of the interfacial zone during fiber debonding. *Composites Engineering*, 1349-1365.
- Mori, S., Charca, S., Flores, E., & Savastano, H. (2019). Physical and thermal properties of novel native andean natural fibers. *Journal of Natural Fibers*.
- Mori, S., Tenazoa, S., Candiotti, E., Flores, E., & Charca, S. (2018). Assessment of Ichu Fibers Extraction and Their Use as Reinforcement in Composite Materials. *Journal of Natural Fibers*.
- Naaman, A., Namur, G., Alwan, J., & Najm, H. (1991). Fiber pullout and bond slip. I: Analytical study. *Journal of Structural Engineering*, 2769-2790.
- Neville, A. (2013). *Tecnología del concreto*. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- NTP 339.033. (1999). *Método de ensayo para la elaboracion y curado de probetas cilindricas de concreto en obra*. Lima: INDECOPI.
- NTP-ISO 8336. (1999). *Norma Técnica Peruana NTP-ISO 8336*. Lima: INDECOPI.
- Pacios, A., & Fernández, M. (1997). *Estudio de la interfase en los hormigones reforzados con fibras*. Madrid: Materiales de Construccion.
- Paniagua, M., Ossa, A., & Ruiz, G. (2008). Características de adhesión entre fibras de queratina y poliéster insaturado. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 15-23.
- Pasquel, C. E. (1998). *Temas de Tecnología del Concreto en el Perú*. Lima: Colegio de Ingenieros del Perú.
- Pira, J. (2016). *Estudio del comportamiento de la interfaz fibra-matriz solicitada a carga de pull-out con fibras cortas de acero y concretos de resistencia normal*. Bogotá: Universidad de la Salle.
- Portugal, B. P. (2007). *Tecnología del concreto de alto desempeño*. Paris: Lafayette.
- Redon, C., Li, V., Wu, C., Hoshiro, H., Saito, T., & Ogawa, A. (2001). Measuring and modifying interface properties of pva fibers in ECC matrix. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 399-406.
- Rivva, L. E. (2000). *Naturaleza y Materiales del Concreto*. Lima: Capítulo Peruano ACI.
- Roshdestwensky, K., Mroginski, J., Morel, C., Barrios, R., & Podestá, J. (2013). Modelado numérico del comportamiento de la interfase en materiales compuestos. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, 1653-1670.



- Shah, S., & Jenq, Y.-S. (1988). Fracture mechanics of interfaces. *Materials Research Society*, 205-216.
- Sun, C. T., & Jin, Z. H. (2012). *Fracture Mechanics*. Massachusetts: Academic Press.
- Tenazoa, C. (2020). Reporte de Resultados. *Fabricación de paneles de fibrocemento utilizando materiales obtenidos a partir de plantas endémicas del Perú*.
- Tenazoa, C., Charca, S., & Flores, E. (2018). *Estudio de la interfase entre las fibras endémicas del Perú y matriz cementicia a través de pruebas de arrancamiento (Pull Out)*. Lima: Universidad de Ingeniería y Tecnología.
- Tenazoa, C., Savastano, H., Charca, S., Quintana, M., & Flores, E. (2019). The effect of alkali treatment on chemical and physical properties of ichu and cabuya fibers. *Journal of Natural Fibers*, 1-14.
- Torre, C. A. (2004). *Curso Basico de Tecnologia Del Concreto*. Lima: UNI.
- U.S. Department of energy genomic science program. (03 de mayo de 2021). Obtenido de <http://genomics.energy.gov>
- Uberti, B. (2012). *Mecánica computacional aplicada al estudio de materiales compuestos de matriz frágil reforzado con fibras cortas*. Resistencia: Universidad Nacional del Nordeste.
- Wang, Y., Li, V., & Backer, S. (1988). Modelling of fibre pull-out from a cement matrix. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 143-149.
- Wapole, R., Myers, R., Myers, S., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. México: PEARSON EDUCACIÓN.



INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

		Universidad Andina del Cusco Escuela de Posgrado		
FORMATO A – N° 01				
Proyecto:	Fabricación de paneles de fibrocemento utilizando materiales obtenidos a partir de plantas endémicas del Perú.			
Tesis:	Análisis numérico y experimental de la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia por arrancamiento (<i>Pull-out</i>).			
Autor:	Aguilar Hilari Adan Renzo	Laboratorio:	Laboratorio de la Universidad de Ingeniería y Tecnología	
Ensayo:	Arrancamiento (<i>Pull-out</i>)			
ARRANCAMIENTO (<i>PULL-OUT</i>)				
Datos de Ensayo			Gráfico: Fuerza - Desplazamiento	
Código de muestra:	ICT18			
Longitud de fibra embebida:	5 mm.			
Tiempo de Curado:	7 días			
Fecha:	03/12/2020			
Norma de referencia:	ASTM C900 y Redon et al. (2001)			
Hecho por:	Tenazoa Ramirez Carlos			
Equipo utilizado:	Máquina Universal E42 MTS Exceed			
Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Tiempo (seg)		
0.003153483	0.000122149	0.289999992		
0.007731120	-0.000016243	0.490000010		
0.011596680	0.000917107	0.689999998		
0.015157065	0.000471846	0.889999986		
0.018768311	-0.000063483	1.090000033		
0.024159750	0.000799476	1.289999962		
0.028584798	0.000736737	1.490000010		
0.033060711	0.000804488	1.690000057		
0.037129721	0.003693887	1.889999986		
0.041198731	0.004473057	2.089999914		
0.044962566	0.004031635	2.289999962		
0.048878988	0.005089212	2.490000010		
0.053151452	0.007109081	2.690000057		
0.057169596	0.007289906	2.890000105		
0.061035156	0.008938871	3.089999914		
0.064900720	0.008572219	3.289999962		
0.069071459	0.010221217	3.490000010		
0.072987874	0.011361714	3.690000057		
0.077158613	0.012895005	3.890000105		
0.081075035	0.015863713	4.090000153		
0.085042317	0.016764913	4.289999962		

Nota: lo mostrado en el instrumento es referencial, la cantidad total de mediciones del ensayo ICT18 son 1330, los cuales están representados en el grafico del instrumento.



FORMATO A – N° 02

Proyecto:	Fabricación de paneles de fibrocemento utilizando materiales obtenidos a partir de plantas endémicas del Perú.		
Tesis:	Análisis numérico y experimental de la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia por arrancamiento (<i>Pull-out</i>).		
Autor:	Aguilar Hilari Adan Renzo	Laboratorio:	Laboratorio de la Universidad de Ingeniería y Tecnología
Ensayo:	Arrancamiento (<i>Pull-out</i>)		

ARRANCAMIENTO (*PULL-OUT*)

Datos de Ensayo		Gráfico: Fuerza - Desplazamiento
Código de muestra:	ICT20	
Longitud de fibra embebida:	5 mm.	
Tiempo de Curado:	7 días	
Fecha:	03/12/2020	
Norma de referencia:	ASTM C900 y Redon et al. (2001)	
Hecho por:	Tenazoa Ramirez Carlos	
Equipo utilizado:	Máquina Universal E42 MTS Exceed	

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Tiempo (seg)
0.002492269	0.000852245	0.209999993
0.006663005	0.000046619	0.409999996
0.011037191	-0.000247446	0.610000014
0.015207926	-0.000923244	0.810000002
0.019785564	-0.001724933	1.009999990
0.023396811	-0.000605811	1.210000038
0.026804608	0.000574960	1.409999967
0.030314130	0.000189432	1.610000014
0.035196943	0.000767640	1.809999943
0.039672850	0.001142815	2.009999990
0.043945314	0.000873764	2.210000038
0.048116050	0.003792343	2.410000086
0.052032472	0.008428183	2.609999895
0.056050620	0.010069008	2.809999943
0.060068767	0.015436268	3.009999990
0.064137777	0.020080201	3.210000038
0.068359375	0.027466906	3.410000086
0.072123214	0.030410755	3.609999895
0.075937911	0.037513863	3.809999943
0.080159509	0.043109953	4.010000229
0.084075931	0.050864097	4.210000038
0.088144945	0.062094018	4.409999847
0.091959642	0.071199782	4.610000134
0.095876057	0.082147360	4.809999943
0.100148522	0.094548345	5.010000229

Nota: lo mostrado en el instrumento es referencial, la cantidad total de mediciones del ensayo ICT20 son 1338, los cuales están representados en el grafico del instrumento.



Universidad Andina del Cusco
Escuela de Posgrado



FORMATO A – N° 03

Proyecto:	Fabricación de paneles de fibrocemento utilizando materiales obtenidos a partir de plantas endémicas del Perú.		
Tesis:	Análisis numérico y experimental de la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia por arrancamiento (<i>Pull-out</i>).		
Autor:	Aguilar Hilari Adan Renzo	Laboratorio:	Laboratorio de la Universidad de Ingeniería y Tecnología
Ensayo:	Arrancamiento (<i>Pull-out</i>)		

ARRANCAMIENTO (*PULL-OUT*)

Datos de Ensayo		Gráfico: Fuerza - Desplazamiento
Código de muestra:	ICT22	
Longitud de fibra embebida:	5 mm.	
Tiempo de Curado:	7 días	
Fecha:	03/12/2020	
Norma de referencia:	ASTM C900 y Redon et al. (2001)	
Hecho por:	Tenazoa Ramirez Carlos	
Equipo utilizado:	Máquina Universal E42 MTS Exceed	

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Tiempo (seg)
0.000356038	0.001400228	0.209999993
0.004882812	0.002089914	0.409999996
0.009613037	0.002825382	0.610000014
0.015258789	0.005808567	0.810000002
0.019836425	0.004708611	1.009999990
0.024210613	0.005606027	1.210000038
0.028025310	0.007825605	1.409999967
0.032043456	0.008793870	1.610000014
0.036265057	0.009589298	1.809999943
0.040283205	0.009775637	2.009999990
0.043945314	0.010638393	2.210000038
0.047810874	0.012264103	2.410000086
0.052185060	0.014742089	2.609999895
0.056203207	0.012667555	2.809999943
0.060221355	0.015819374	3.009999990
0.064086911	0.016979778	3.210000038
0.068054200	0.016883720	3.410000086
0.072377523	0.019494886	3.609999895
0.076192220	0.019440448	3.809999943
0.080006917	0.021388248	4.010000229
0.083923340	0.020465059	4.210000038
0.088043213	0.024254765	4.409999847
0.092112226	0.024214959	4.610000134
0.096232099	0.025942054	4.809999943
0.100148522	0.025332212	5.010000229

Nota: lo mostrado en el instrumento es referencial, la cantidad total de mediciones del ensayo ICT22 son 1562, los cuales están representados en el grafico del instrumento.



FORMATO A – N° 04

Proyecto:	Fabricación de paneles de fibrocemento utilizando materiales obtenidos a partir de plantas endémicas del Perú.		
Tesis:	Análisis numérico y experimental de la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia por arrancamiento (<i>Pull-out</i>).		
Autor:	Aguilar Hilari Adan Renzo	Laboratorio:	Laboratorio de la Universidad de Ingeniería y Tecnología
Ensayo:	Arrancamiento (<i>Pull-out</i>)		

ARRANCAMIENTO (*PULL-OUT*)

Datos de Ensayo		Gráfico: Fuerza - Desplazamiento
Código de muestra:	ICT23	
Longitud de fibra embebida:	5 mm.	
Tiempo de Curado:	7 días	
Fecha:	03/12/2020	
Norma de referencia:	ASTM C900 y Redon et al. (2001)	
Hecho por:	Tenazoa Ramirez Carlos	
Equipo utilizado:	Máquina Universal E42 MTS Exceed	

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Tiempo (seg)
0.002492269	-0.002314738	0.209999993
0.006459554	-0.000627681	0.409999996
0.011037191	0.000052426	0.610000014
0.015462239	-0.001523900	0.810000002
0.019683837	-0.000641544	1.009999990
0.023549399	0.000676030	1.210000038
0.027262371	-0.001163652	1.409999967
0.030721028	0.000433716	1.610000014
0.034383142	0.000174369	1.809999943
0.039316816	0.000701936	2.009999990
0.043894452	0.001709953	2.210000038
0.048421225	0.001814906	2.410000086
0.052286785	0.003856082	2.609999895
0.056101482	0.002096241	2.809999943
0.060221355	0.001626199	3.009999990
0.064137777	0.004527882	3.210000038
0.068308516	0.004820124	3.410000086
0.072224939	0.005745829	3.609999895
0.076090502	0.008029941	3.809999943
0.080261234	0.008837060	4.010000229
0.084381107	0.009735416	4.210000038
0.088144945	0.010192426	4.409999847
0.092010501	0.010119299	4.610000134
0.096181233	0.011921275	4.809999943
0.100097655	0.013057792	5.010000229

Nota: lo mostrado en el instrumento es referencial, la cantidad total de mediciones del ensayo ICT23 son 1781, los cuales están representados en el grafico del instrumento.



FORMATO A – N° 05

Proyecto:	Fabricación de paneles de fibrocemento utilizando materiales obtenidos a partir de plantas endémicas del Perú.		
Tesis:	Análisis numérico y experimental de la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia por arrancamiento (<i>Pull-out</i>).		
Autor:	Aguilar Hilari Adan Renzo	Laboratorio:	Laboratorio de la Universidad de Ingeniería y Tecnología
Ensayo:	Arrancamiento (<i>Pull-out</i>)		

ARRANCAMIENTO (*PULL-OUT*)

Datos de Ensayo		Gráfico: Fuerza - Desplazamiento
Código de muestra:	ICT38	
Longitud de fibra embebida:	5 mm.	
Tiempo de Curado:	7 días	
Fecha:	21/12/2020	
Norma de referencia:	ASTM C900 y Redon et al. (2001)	
Hecho por:	Tenazoa Ramirez Carlos	
Equipo utilizado:	Máquina Universal E42 MTS Exceed	

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Tiempo (seg)
0.000813802	0.000763640	0.109999999
0.002441406	0.000799029	0.209999993
0.004577637	-0.000685747	0.310000002
0.006713867	-0.000616080	0.409999996
0.008900961	-0.000573429	0.509999990
0.011189779	0.000581025	0.610000014
0.013326010	0.000709255	0.709999979
0.015258789	-0.000642365	0.810000002
0.017344159	-0.001841447	0.910000026
0.019531250	-0.000639883	1.009999990
0.021464031	0.000201911	1.110000014
0.023345947	0.000840227	1.210000038
0.025177002	-0.001276222	1.309999943
0.026804608	0.001978590	1.409999967
0.028483075	-0.000041810	1.509999990
0.030415853	-0.001406110	1.610000014
0.032806398	0.000445689	1.710000038
0.035146080	0.001744280	1.809999943
0.037587488	0.002274198	1.909999967
0.039978026	0.000245828	2.009999990
0.042063395	0.003828068	2.109999895
0.044097902	0.002137479	2.210000038
0.046183268	0.002457057	2.309999943
0.048166912	0.004068703	2.410000086
0.050048828	0.002908147	2.509999990

Nota: lo mostrado en el instrumento es referencial, la cantidad total de mediciones del ensayo ICT38 son 3414, los cuales están representados en el grafico del instrumento.



FORMATO A – N° 06

Proyecto:	Fabricación de paneles de fibrocemento utilizando materiales obtenidos a partir de plantas endémicas del Perú.		
Tesis:	Análisis numérico y experimental de la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia por arrancamiento (<i>Pull-out</i>).		
Autor:	Aguilar Hilari Adan Renzo	Laboratorio:	Laboratorio de la Universidad de Ingeniería y Tecnología
Ensayo:	Arrancamiento (<i>Pull-out</i>)		

ARRANCAMIENTO (*PULL-OUT*)

Datos de Ensayo		Gráfico: Fuerza - Desplazamiento
Código de muestra:	ICT43	
Longitud de fibra embebida:	5 mm.	
Tiempo de Curado:	7 días	
Fecha:	21/12/2020	
Norma de referencia:	ASTM C900 y Redon et al. (2001)	
Hecho por:	Tenazoa Ramirez Carlos	
Equipo utilizado:	Máquina Universal E42 MTS Exceed	

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Tiempo (seg)
-0.000356038	0.000081342	0.109999999
-0.000050863	0.000516843	0.209999993
0.001220703	-0.000445444	0.310000002
0.003662109	-0.002752097	0.409999996
0.007832846	0.001395205	0.509999990
0.010884603	0.001511172	0.610000014
0.013631186	0.000884131	0.709999979
0.015970867	0.001113727	0.810000002
0.018005370	0.001006424	0.910000026
0.020090740	0.001235120	1.009999990
0.022074382	0.003643884	1.110000014
0.024058025	0.002039297	1.210000038
0.026143392	-0.000180360	1.309999943
0.028279623	0.000937975	1.409999967
0.030161540	0.003365502	1.509999990
0.032094322	0.003939102	1.610000014
0.034128825	0.003324842	1.710000038
0.036112469	0.000958849	1.809999943
0.038045251	0.002998311	1.909999967
0.039978026	0.002570043	2.009999990
0.041961670	0.004515783	2.109999895
0.043945314	0.004677265	2.210000038
0.045979821	0.003295871	2.309999943
0.048268637	0.003352408	2.410000086
0.050404869	0.004604829	2.509999990

Nota: lo mostrado en el instrumento es referencial, la cantidad total de mediciones del ensayo ICT43 son 3241, los cuales están representados en el grafico del instrumento.



Universidad Andina del Cusco
Escuela de Posgrado



FORMATO A – N° 07

Proyecto:	Fabricación de paneles de fibrocemento utilizando materiales obtenidos a partir de plantas endémicas del Perú.		
Tesis:	Análisis numérico y experimental de la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia por arrancamiento (<i>Pull-out</i>).		
Autor:	Aguilar Hilari Adan Renzo	Laboratorio:	Laboratorio de la Universidad de Ingeniería y Tecnología
Ensayo:	Arrancamiento (<i>Pull-out</i>)		

ARRANCAMIENTO (*PULL-OUT*)

Datos de Ensayo		Gráfico: Fuerza - Desplazamiento
Código de muestra:	ICT47	
Longitud de fibra embebida:	5 mm.	
Tiempo de Curado:	7 días	
Fecha:	20/01/2021	
Norma de referencia:	ASTM C900 y Redon et al. (2001)	
Hecho por:	Tenazoa Ramirez Carlos	
Equipo utilizado:	Máquina Universal E42 MTS Exceed	

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Tiempo (seg)
-0.000508626	-0.008811237	0.189999998
0.000152588	-0.000676260	0.289999992
0.001932780	-0.001193443	0.389999986
0.006052653	0.000402963	0.490000010
0.009663901	0.003326294	0.589999974
0.012207031	0.004680440	0.689999998
0.014495849	0.006145946	0.790000021
0.016733806	0.004396850	0.889999986
0.018819173	0.006195767	0.990000010
0.021006268	0.010440353	1.090000033
0.023193359	0.011275326	1.190000057
0.025227866	0.009750701	1.289999962
0.027109783	0.012141847	1.389999986
0.029042563	0.011953788	1.490000010
0.031077067	0.016088443	1.590000033
0.033009848	0.015276223	1.690000057
0.034993493	0.016307507	1.789999962
0.037180584	0.018971102	1.889999986
0.039164228	0.018883679	1.990000010
0.041046143	0.020651164	2.089999914
0.043233238	0.020260416	2.190000057
0.045318604	0.022341378	2.289999962
0.047251386	0.024934139	2.390000105
0.049133301	0.024743933	2.490000010
0.051116942	0.027448243	2.589999914

Nota: lo mostrado en el instrumento es referencial, la cantidad total de mediciones del ensayo ICT47 son 2341, los cuales están representados en el grafico del instrumento.



Universidad Andina del Cusco
Escuela de Posgrado



FORMATO A – N° 08

Proyecto:	Fabricación de paneles de fibrocemento utilizando materiales obtenidos a partir de plantas endémicas del Perú.		
Tesis:	Análisis numérico y experimental de la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia por arrancamiento (<i>Pull-out</i>).		
Autor:	Aguilar Hilari Adan Renzo	Laboratorio:	Laboratorio de la Universidad de Ingeniería y Tecnología
Ensayo:	Arrancamiento (<i>Pull-out</i>)		

ARRANCAMIENTO (*PULL-OUT*)

Datos de Ensayo		Gráfico: Fuerza - Desplazamiento
Código de muestra:	ICT52	
Longitud de fibra embebida:	5 mm.	
Tiempo de Curado:	7 días	
Fecha:	20/01/2021	
Norma de referencia:	ASTM C900 y Redon et al. (2001)	
Hecho por:	Tenazoa Ramirez Carlos	
Equipo utilizado:	Máquina Universal E42 MTS Exceed	

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Tiempo (seg)
0.000101725	0.000915967	0.109999999
0.000813802	-0.002014645	0.209999993
0.003712972	0.000624592	0.310000002
0.006713867	0.000543898	0.409999996
0.009155274	0.000186627	0.509999990
0.011291504	-0.001200601	0.610000014
0.013275147	-0.001755942	0.709999979
0.015055339	0.001711985	0.810000002
0.016835531	0.000798804	0.910000026
0.018615723	0.001091204	1.009999990
0.020599366	0.002378403	1.110000014
0.022888184	0.000691578	1.210000038
0.025278729	0.001486524	1.309999943
0.027669272	-0.000309518	1.409999967
0.029805502	0.002111522	1.509999990
0.031789146	0.002317007	1.610000014
0.033823650	0.001884492	1.710000038
0.035909019	0.000180144	1.809999943
0.037892663	0.001581782	1.909999967
0.040130617	0.002279511	2.009999990
0.042317712	0.004024726	2.109999895
0.044301352	0.003749006	2.210000038
0.046183268	0.002526364	2.309999943
0.048116050	0.004368932	2.410000086
0.050048828	0.003302401	2.509999990

Nota: lo mostrado en el instrumento es referencial, la cantidad total de mediciones del ensayo ICT52 son 2047, los cuales están representados en el grafico del instrumento.



FORMATO A – N° 09

Proyecto:	Fabricación de paneles de fibrocemento utilizando materiales obtenidos a partir de plantas endémicas del Perú.		
Tesis:	Análisis numérico y experimental de la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia por arrancamiento (<i>Pull-out</i>).		
Autor:	Aguilar Hilari Adan Renzo	Laboratorio:	Laboratorio de la Universidad de Ingeniería y Tecnología
Ensayo:	Arrancamiento (<i>Pull-out</i>)		

ARRANCAMIENTO (*PULL-OUT*)

Datos de Ensayo		Gráfico: Fuerza - Desplazamiento
Código de muestra:	ICT53	
Longitud de fibra embebida:	5 mm.	
Tiempo de Curado:	7 días	
Fecha:	20/01/2021	
Norma de referencia:	ASTM C900 y Redon et al. (2001)	
Hecho por:	Tenazoa Ramirez Carlos	
Equipo utilizado:	Máquina Universal E42 MTS Exceed	

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Tiempo (seg)
-0.000559489	0.001778599	0.109999999
-0.000203451	-0.000166175	0.209999993
0.001220703	0.000422437	0.310000002
0.003865560	0.000925258	0.409999996
0.008036296	0.000726328	0.509999990
0.010884603	0.001153235	0.610000014
0.013326010	-0.001160110	0.709999979
0.015665692	0.002034777	0.810000002
0.017801922	0.003907051	0.910000026
0.019989013	0.000521444	1.009999990
0.022226970	0.002334251	1.110000014
0.024312338	0.003481428	1.210000038
0.026194255	0.005424116	1.309999943
0.028177898	0.006102525	1.409999967
0.030110677	0.001520964	1.509999990
0.032094322	0.004933578	1.610000014
0.034128825	0.004558243	1.710000038
0.036265057	0.004981768	1.809999943
0.038197839	0.004053855	1.909999967
0.040130617	0.005413997	2.009999990
0.042165124	0.009502831	2.109999895
0.044199627	0.006501236	2.210000038
0.046132409	0.006149358	2.309999943
0.048014324	0.009008748	2.410000086
0.049997965	0.007271623	2.509999990

Nota: lo mostrado en el instrumento es referencial, la cantidad total de mediciones del ensayo ICT53 son 3464, los cuales están representados en el grafico del instrumento.



Universidad Andina del Cusco
Escuela de Posgrado



FORMATO A – N° 10

Proyecto:	Fabricación de paneles de fibrocemento utilizando materiales obtenidos a partir de plantas endémicas del Perú.		
Tesis:	Análisis numérico y experimental de la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia por arrancamiento (<i>Pull-out</i>).		
Autor:	Aguilar Hilari Adan Renzo	Laboratorio:	Laboratorio de la Universidad de Ingeniería y Tecnología
Ensayo:	Arrancamiento (<i>Pull-out</i>)		

ARRANCAMIENTO (*PULL-OUT*)

Datos de Ensayo		Gráfico: Fuerza - Desplazamiento
Código de muestra:	ICT55	
Longitud de fibra embebida:	5 mm.	
Tiempo de Curado:	7 días	
Fecha:	20/01/2021	
Norma de referencia:	ASTM C900 y Redon et al. (2001)	
Hecho por:	Tenazoa Ramirez Carlos	
Equipo utilizado:	Máquina Universal E42 MTS Exceed	

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Tiempo (seg)
0.000152588	-0.001048824	0.109999999
0.001322428	0.000606948	0.209999993
0.004069011	0.001324967	0.310000002
0.006866455	-0.001300648	0.409999996
0.009206136	0.001847685	0.509999990
0.011291504	0.001211435	0.610000014
0.013326010	0.001503419	0.709999979
0.015055339	-0.000604215	0.810000002
0.016937256	0.000245567	0.910000026
0.018615723	-0.000383567	1.009999990
0.020446778	0.001397632	1.110000014
0.022481283	0.001559918	1.210000038
0.024973553	0.000425395	1.309999943
0.027364096	0.002030225	1.409999967
0.029449462	0.002936512	1.509999990
0.031636559	0.001287177	1.610000014
0.033874512	0.001346239	1.710000038
0.035959882	0.002869819	1.809999943
0.037943522	0.005149010	1.909999967
0.040079754	0.004482006	2.009999990
0.042215983	0.003045380	2.109999895
0.044199627	0.006634983	2.210000038
0.046132409	0.006383469	2.309999943
0.048166912	0.005973927	2.410000086
0.050150553	0.004931617	2.509999990

Nota: lo mostrado en el instrumento es referencial, la cantidad total de mediciones del ensayo ICT55 son 2704, los cuales están representados en el grafico del instrumento.



Universidad Andina del Cusco
Escuela de Posgrado



FORMATO A – N° 11

Proyecto:	Fabricación de paneles de fibrocemento utilizando materiales obtenidos a partir de plantas endémicas del Perú.		
Tesis:	Análisis numérico y experimental de la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia por arrancamiento (<i>Pull-out</i>).		
Autor:	Aguilar Hilari Adan Renzo	Laboratorio:	Laboratorio de la Universidad de Ingeniería y Tecnología
Ensayo:	Arrancamiento (<i>Pull-out</i>)		

ARRANCAMIENTO (*PULL-OUT*)

Datos de Ensayo		Gráfico: Fuerza - Desplazamiento
Código de muestra:	ICT58	
Longitud de fibra embebida:	5 mm.	
Tiempo de Curado:	7 días	
Fecha:	20/01/2021	
Norma de referencia:	ASTM C900 y Redon et al. (2001)	
Hecho por:	Tenazoa Ramirez Carlos	
Equipo utilizado:	Máquina Universal E42 MTS Exceed	

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Tiempo (seg)
0.000101725	-0.002304938	0.109999999
0.000712077	0.000079171	0.209999993
0.003814697	0.000906736	0.310000002
0.006510417	0.000489579	0.409999996
0.009053549	-0.001209902	0.509999990
0.011088054	-0.000468292	0.610000014
0.012919108	0.001707371	0.709999979
0.014648437	0.000478296	0.810000002
0.016326905	0.000100830	0.910000026
0.018208822	0.001803625	1.009999990
0.020701093	0.000350118	1.110000014
0.023498535	0.000592899	1.210000038
0.025889080	-0.000904338	1.309999943
0.028025310	0.000697982	1.409999967
0.030008952	0.002284914	1.509999990
0.031941734	0.001229011	1.610000014
0.033976237	0.002399084	1.710000038
0.036163328	0.003535606	1.809999943
0.038248698	0.003572844	1.909999967
0.040181480	0.003706795	2.009999990
0.042165124	0.003777140	2.109999895
0.044199627	0.005689261	2.210000038
0.046081543	0.006506904	2.309999943
0.047963462	0.004376313	2.410000086
0.049997965	0.005626095	2.509999990

Nota: lo mostrado en el instrumento es referencial, la cantidad total de mediciones del ensayo ICT58 son 2649, los cuales están representados en el grafico del instrumento.



FORMATO A – N° 12

Proyecto:	Fabricación de paneles de fibrocemento utilizando materiales obtenidos a partir de plantas endémicas del Perú.		
Tesis:	Análisis numérico y experimental de la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia por arrancamiento (<i>Pull-out</i>).		
Autor:	Aguilar Hilari Adan Renzo	Laboratorio:	Laboratorio de la Universidad de Ingeniería y Tecnología
Ensayo:	Arrancamiento (<i>Pull-out</i>)		

ARRANCAMIENTO (*PULL-OUT*)

Datos de Ensayo		Gráfico: Fuerza - Desplazamiento
Código de muestra:	ICT62	
Longitud de fibra embebida:	5 mm.	
Tiempo de Curado:	7 días	
Fecha:	20/01/2021	
Norma de referencia:	ASTM C900 y Redon et al. (2001)	
Hecho por:	Tenazoa Ramirez Carlos	
Equipo utilizado:	Máquina Universal E42 MTS Exceed	

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Tiempo (seg)
0.000101725	0.000508783	0.109999999
0.000559489	-0.000567590	0.209999993
0.003509522	-0.000818929	0.310000002
0.006154378	0.000554120	0.409999996
0.008697510	0.001868025	0.509999990
0.010986329	0.000584163	0.610000014
0.012919108	0.000607568	0.709999979
0.014750163	0.000361072	0.810000002
0.016581218	0.002069926	0.910000026
0.018717448	0.000954002	1.009999990
0.021158856	0.000884014	1.110000014
0.023498535	-0.000524017	1.210000038
0.025685629	0.003607674	1.309999943
0.027923585	0.001665650	1.409999967
0.030110677	0.003523377	1.509999990
0.032043456	0.004592009	1.610000014
0.034077966	0.009355948	1.710000038
0.036265057	0.009535437	1.809999943
0.038248698	0.007082283	1.909999967
0.040079754	0.009859641	2.009999990
0.042012536	0.009408962	2.109999895
0.044047039	0.013019787	2.210000038
0.045979821	0.009856790	2.309999943
0.048217775	0.011130687	2.410000086
0.050455732	0.011444244	2.509999990

Nota: lo mostrado en el instrumento es referencial, la cantidad total de mediciones del ensayo ICT62 son 3125, los cuales están representados en el grafico del instrumento.



Universidad Andina del Cusco
Escuela de Posgrado



FORMATO A – N° 13

Proyecto:	Fabricación de paneles de fibrocemento utilizando materiales obtenidos a partir de plantas endémicas del Perú.		
Tesis:	Análisis numérico y experimental de la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia por arrancamiento (<i>Pull-out</i>).		
Autor:	Aguilar Hilari Adan Renzo	Laboratorio:	Laboratorio de la Universidad de Ingeniería y Tecnología
Ensayo:	Arrancamiento (<i>Pull-out</i>)		

ARRANCAMIENTO (*PULL-OUT*)

Datos de Ensayo		Gráfico: Fuerza - Desplazamiento
Código de muestra:	ICT63	
Longitud de fibra embebida:	5 mm.	
Tiempo de Curado:	7 días	
Fecha:	20/01/2021	
Norma de referencia:	ASTM C900 y Redon et al. (2001)	
Hecho por:	Tenazoa Ramirez Carlos	
Equipo utilizado:	Máquina Universal E42 MTS Exceed	

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Tiempo (seg)
0.00000000	0.003708630	0.109999999
0.00100000	0.003461388	0.209999993
0.00300000	0.003753583	0.310000002
0.00500000	0.004158161	0.409999996
0.00700000	0.004675121	0.509999990
0.00900000	0.005124652	0.610000014
0.01100000	0.005641612	0.709999979
0.01300000	0.006113620	0.810000002
0.01500000	0.006787916	0.910000026
0.01700000	0.007394783	1.009999990
0.01900000	0.007934220	1.110000014
0.02100000	0.008473657	1.210000038
0.02300000	0.008990617	1.309999943
0.02500000	0.009575007	1.409999967
0.02700000	0.010226827	1.509999990
0.02900000	0.010878647	1.610000014
0.03100000	0.011395607	1.710000038
0.03300000	0.011867615	1.809999943
0.03500000	0.012654294	1.909999967
0.03700000	0.013283637	2.009999990
0.03900000	0.013845551	2.109999895
0.04100000	0.014632230	2.210000038
0.04300000	0.015149190	2.309999943
0.04500000	0.015778533	2.410000086
0.04700000	0.016520259	2.509999990

Nota: lo mostrado en el instrumento es referencial, la cantidad total de mediciones del ensayo ICT63 son 324, los cuales están representados en el grafico del instrumento.



FORMATO A – N° 14

Proyecto:	Fabricación de paneles de fibrocemento utilizando materiales obtenidos a partir de plantas endémicas del Perú.		
Tesis:	Análisis numérico y experimental de la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia por arrancamiento (<i>Pull-out</i>).		
Autor:	Aguilar Hilari Adan Renzo	Laboratorio:	Laboratorio de la Universidad de Ingeniería y Tecnología
Ensayo:	Arrancamiento (<i>Pull-out</i>)		

ARRANCAMIENTO (*PULL-OUT*)

Datos de Ensayo		Gráfico: Fuerza - Desplazamiento
Código de muestra:	ICT64	
Longitud de fibra embebida:	5 mm.	
Tiempo de Curado:	7 días	
Fecha:	20/01/2021	
Norma de referencia:	ASTM C900 y Redon et al. (2001)	
Hecho por:	Tenazoa Ramirez Carlos	
Equipo utilizado:	Máquina Universal E42 MTS Exceed	

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Tiempo (seg)
0.00000000	0.004315496	0.109999999
0.001000000	0.004495309	0.209999993
0.003000000	0.004989793	0.310000002
0.005000000	0.005753995	0.409999996
0.007000000	0.006428291	0.509999990
0.009000000	0.006990205	0.610000014
0.011000000	0.007776884	0.709999979
0.013000000	0.008496133	0.810000002
0.015000000	0.009372719	0.910000026
0.017000000	0.009619961	1.009999990
0.019000000	0.009552531	1.110000014
0.021000000	0.009507578	1.210000038
0.023000000	0.009664914	1.309999943
0.025000000	0.009957109	1.409999967
0.027000000	0.010316733	1.509999990
0.029000000	0.010519022	1.610000014
0.031000000	0.010788741	1.710000038
0.033000000	0.011103412	1.809999943
0.035000000	0.011418084	1.909999967
0.037000000	0.011912568	2.009999990
0.039000000	0.012317146	2.109999895
0.041000000	0.012407052	2.210000038
0.043000000	0.012586864	2.309999943
0.045000000	0.013171254	2.410000086
0.047000000	0.013800598	2.509999990

Nota: lo mostrado en el instrumento es referencial, la cantidad total de mediciones del ensayo ICT64 son 3464, los cuales están representados en el grafico del instrumento.



Universidad Andina del Cusco
Escuela de Posgrado



FORMATO A – N° 15

Proyecto:	Fabricación de paneles de fibrocemento utilizando materiales obtenidos a partir de plantas endémicas del Perú.		
Tesis:	Análisis numérico y experimental de la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia por arrancamiento (<i>Pull-out</i>).		
Autor:	Aguilar Hilari Adan Renzo	Laboratorio:	Laboratorio de la Universidad de Ingeniería y Tecnología
Ensayo:	Curva media experimental.		

ARRANCAMIENTO (*PULL-OUT*)

Datos de Ensayo		Gráfico: Fuerza - Desplazamiento
Código de muestra:	Curva media experimental	
Longitud de fibra embebida:	5 mm.	
Tiempo de Curado:	7 días	
Fecha:	-	
Norma de referencia:	-	
Hecho por:	-	
Equipo utilizado:	-	

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Tiempo (seg)
0.00000000	0.00000000	0.10500000
0.000661214	-0.001840744	0.204999994
0.002441406	0.000058616	0.304999998
0.004692078	-0.000852336	0.404999994
0.007947286	0.000121963	0.504999999
0.010668437	0.001030432	0.605000004
0.012969971	0.001671649	0.704999991
0.015080770	0.001703681	0.805000007
0.017140707	0.001045004	0.905000009
0.019226075	0.001877395	1.004999995
0.021343233	0.003317246	1.105000019
0.023536682	0.003325428	1.205000043
0.025590262	0.002162644	1.304999962
0.027554831	0.003588191	1.404999971
0.029443106	0.004496600	1.504999995
0.031356813	0.005361497	1.605000019
0.033467612	0.005369671	1.705000028
0.035616558	0.005392400	1.804999948
0.037727357	0.006624371	1.904999971
0.039749146	0.006575833	2.004999995
0.041745505	0.007488094	2.104999930
0.043830873	0.007875177	2.205000043
0.045852662	0.008619302	2.304999977
0.047899884	0.009113801	2.405000091
0.049902599	0.010271280	2.504999995
0.051892599	0.012635812	2.604999900
0.053857169	0.012328687	2.705000013
0.055872600	0.013158117	2.804999948



0.057951611	0.015138767	2.905000061
0.059967042	0.016453370	3.004999995
0.062001547	0.017418815	3.104999930
0.063972475	0.018438369	3.205000043
0.065937043	0.020677541	3.304999977
0.067939760	0.022751908	3.405000091
0.069923402	0.023300393	3.504999995
0.071919760	0.024012987	3.604999900
0.073858901	0.025402619	3.705000013
0.075772608	0.027528537	3.804999948
0.077826186	0.029966165	3.905000091
0.079892479	0.031679530	4.005000174
0.081882480	0.033771284	4.105000138
0.083872481	0.035013102	4.205000043
0.085856122	0.037525719	4.304999948
0.087839768	0.039905866	4.404999852
0.089855197	0.042464306	4.505000055
0.091908778	0.044588628	4.605000138
0.093949639	0.046319527	4.705000043
0.095926922	0.049670214	4.804999948
0.097910563	0.052352194	4.904999912
0.099881492	0.054861635	5.005000114
0.101852419	0.058281831	5.105000138
0.103899642	0.060150826	5.205000043
0.105927787	0.063570803	5.304999948
0.107905074	0.066370116	5.404999852
0.109856926	0.069517460	5.505000055
0.111859643	0.072520632	5.605000138
0.113925938	0.074243008	5.705000043
0.115941368	0.078404041	5.804999948
0.117931371	0.080526032	5.904999912
0.119883223	0.083167352	6.005000114
0.121828722	0.085614773	6.105000138
0.123812362	0.088214433	6.205000043
0.125846867	0.091578751	6.304999948
0.127894091	0.095239358	6.404999852
0.129915876	0.098561909	6.505000055
0.131937664	0.102299824	6.605000138
0.133959456	0.104297925	6.705000043
0.135968530	0.107407739	6.804999948
0.137926738	0.111660151	6.904999912
0.139935815	0.113848953	7.005000114
0.141944885	0.118683875	7.105000138
0.143877667	0.120560620	7.205000043
0.145893102	0.124050269	7.304999948
0.147921248	0.128506429	7.404999852
0.149962114	0.131009087	7.505000055
0.151977547	0.134142959	7.605000138
0.153935753	0.138335019	7.705000043
0.155868533	0.142615132	7.804999948
0.157845820	0.145212481	7.904999912
0.159873965	0.149197917	8.005000114
0.161933907	0.152834373	8.104999900
0.163917546	0.156309262	8.204999924
0.165888476	0.158712676	8.305000186
0.167872116	0.162136700	8.404999971
0.169868472	0.166187149	8.504999995
0.171890264	0.170957908	8.604999781
0.173924771	0.173791043	8.704999924
0.175933841	0.177507564	8.805000305
0.177892056	0.180575905	8.905000091



0.179837552	0.183782995	9.005000114
0.181884770	0.187734686	9.104999900
0.183931988	0.189736456	9.204999924
0.185921990	0.171690064	9.305000186
0.187924707	0.169428084	9.404999971
0.189927425	0.168530544	9.504999995
0.191930143	0.165122278	9.604999781
0.193881995	0.161302490	9.704999924
0.195897424	0.159184955	9.805000305
0.197944648	0.157895278	9.905000091
0.199928283	0.155989483	10.005000114
0.201924649	0.155498615	10.104999900
0.203882861	0.152202124	10.204999924
0.205847429	0.151860218	10.305000186
0.207901005	0.152174240	10.404999971
0.209967297	0.150347127	10.504999995
0.211957296	0.148935171	10.604999781
0.213896434	0.146912094	10.704999924
0.215861008	0.143726978	10.805000305
0.217927303	0.142774269	10.905000091
0.219955451	0.141816696	11.005000114
0.221913659	0.140683927	11.104999900
0.223871873	0.140951267	11.204999924
0.225855516	0.140110530	11.305000186
0.227851873	0.139073264	11.404999971
0.229918169	0.139350638	11.504999995
0.231997172	0.139382564	11.604999781
0.234018968	0.139613431	11.704999924
0.235989894	0.138991214	11.805000305
0.237935388	0.138503253	11.905000091
0.239906312	0.139559316	12.005000114
0.241896316	0.139380516	12.104999900
0.243937178	0.137688989	12.204999924
0.245933537	0.137174347	12.305000186
0.247866315	0.135503333	12.404999971
0.249824530	0.134484734	12.504999995
0.251846337	0.133350549	12.604999781
0.253887192	0.132798281	12.704999924
0.255915336	0.131887872	12.805000305
0.257924417	0.131835110	12.905000091
0.259895336	0.132038739	13.005000114
0.261840836	0.131409541	13.104999900
0.263837181	0.132283242	13.204999924
0.265909843	0.131426061	13.305000186
0.267931631	0.131524801	13.404999971
0.269947057	0.130327011	13.504999995
0.271937068	0.127248039	13.604999781
0.273946131	0.127338716	13.704999924
0.275955223	0.127150954	13.805000305
0.277957923	0.125932946	13.905000091
0.279973370	0.122489718	14.005000114
0.281899782	0.120052633	14.104999900
0.283826215	0.119997827	14.204999924
0.285873430	0.118583298	14.305000186
0.287907918	0.118899631	14.404999971
0.289885218	0.119931370	14.504999995
0.291875207	0.120154254	14.604999781
0.293897010	0.120682104	14.704999924
0.295893369	0.121207189	14.805000305
0.297883373	0.120836012	14.905000091
0.299949665	0.119209561	15.005000114



0.301996864	0.118483383	15.104999900
0.303967805	0.116924522	15.204999924
0.305926013	0.118269733	15.305000186
0.307884220	0.117537069	15.404999971
0.309880583	0.116776410	15.504999995
0.311927790	0.114927507	15.604999781
0.313987744	0.113687209	15.704999924
0.315984085	0.113908330	15.805000305
0.317897815	0.113768128	15.905000091
0.319836938	0.113064038	16.005000114
0.321865093	0.112651066	16.105000257
0.323918670	0.112063077	16.204999447
0.325908666	0.111720173	16.304999828
0.327860522	0.112269844	16.404999733
0.329825081	0.112940028	16.505000114
0.331802381	0.112461859	16.605000496
0.333843236	0.111498110	16.704999685
0.335909528	0.111636039	16.804999828
0.337944042	0.112896267	16.904999733
0.339953105	0.112255404	17.005000114
0.341936760	0.110973863	17.105000257
0.343907675	0.110158296	17.204999447
0.345853183	0.111530346	17.304999828
0.347900401	0.111539760	17.404999733
0.349947619	0.111675263	17.505000114
0.351893119	0.111141928	17.605000496
0.353844975	0.110519163	17.704999685
0.355873119	0.110897453	17.804999828
0.357907622	0.110128806	17.904999733
0.359954851	0.108417860	18.005000114
0.361957555	0.107908086	18.105000257
0.363922132	0.106823753	18.204999447
0.365854910	0.106539168	18.304999828
0.367889414	0.105197738	18.404999733
0.369917565	0.104913701	18.505000114
0.371945709	0.104347833	18.605000496
0.373954786	0.103729718	18.704999685
0.375938427	0.104125844	18.804999828
0.377922071	0.103710728	18.904999733
0.379931145	0.102489894	19.005000114
0.381946571	0.099491893	19.105000257
0.383987441	0.099315082	19.204999447
0.385926571	0.098147260	19.304999828
0.387827575	0.096726394	19.404999733
0.389817564	0.096335595	19.505000114
0.391871152	0.095544488	19.605000496
0.393892937	0.095459173	19.704999685
0.395927433	0.094660806	19.804999828
0.397911092	0.093040554	19.904999733
0.399907425	0.093439385	20.005000114
0.401865655	0.094893756	20.105000257
0.403912869	0.094877926	20.204999447
0.405953731	0.095343404	20.304999828
0.407943735	0.094776409	20.404999733
0.409971875	0.093823102	20.505000114
0.411923742	0.092073234	20.605000496
0.413862865	0.091259921	20.704999685
0.415865601	0.090021603	20.804999828
0.417906456	0.089451146	20.904999733
0.419909178	0.089175460	21.005000114
0.421841949	0.089166855	21.105000257



0.423851030	0.088619919	21.204999447
0.425904607	0.089451050	21.304999828
0.427920029	0.089486028	21.404999733
0.429897318	0.089514140	21.505000114
0.431861881	0.089801261	21.605000496
0.433896384	0.088351318	21.704999685
0.435867325	0.086429996	21.804999828
0.437889099	0.085952689	21.904999733
0.439974479	0.086410468	22.005000114
0.442021697	0.086157867	22.105000257
0.444005345	0.085908300	22.204999447
0.445995338	0.085930007	22.304999828
0.447972627	0.085286015	22.404999733
0.449892686	0.085356452	22.505000114
0.451927182	0.085157688	22.605000496
0.453936271	0.084462883	22.704999685
0.455869034	0.084036806	22.804999828
0.457814549	0.084723210	22.904999733
0.459836323	0.085128129	23.005000114
0.461877200	0.084995834	23.105000257
0.463930774	0.085724263	23.204999447
0.465920777	0.085165537	23.304999828
0.467910788	0.083145883	23.404999733
0.469856273	0.083503261	23.505000114
0.471827210	0.084164156	23.605000496
0.473906206	0.084632793	23.704999685
0.475985231	0.083413229	23.804999828
0.477981583	0.081765431	23.904999733
0.480003357	0.082819292	24.005000114
0.481999734	0.082302616	24.105000257
0.483983364	0.081267087	24.204999447
0.485954308	0.081041540	24.304999828
0.487950645	0.080902025	24.404999733
0.489915241	0.080880668	24.505000114
0.491828920	0.078800930	24.605000496
0.493838001	0.076880050	24.704999685
0.495872489	0.076262013	24.804999828
0.497862507	0.076575625	24.904999733
0.499852511	0.076798312	25.005000114
0.501836148	0.075417248	25.105000257
0.503819814	0.075818599	25.204999447
0.505816162	0.075496747	25.304999828
0.507888835	0.075597873	25.404999733
0.509948761	0.075842243	25.505000114
0.511957827	0.075623094	25.605000496
0.513947838	0.075929383	25.704999685
0.515937834	0.074489733	25.804999828
0.517908746	0.074339168	25.904999733
0.519930545	0.074600474	26.005000114
0.521971422	0.073830271	26.105000257
0.523999552	0.075802605	26.204999447
0.525906893	0.074779713	26.304999828
0.527852375	0.075056430	26.404999733
0.529893245	0.075032044	26.505000114
0.531934114	0.074412275	26.605000496
0.533911378	0.075563480	26.704999685
0.535875966	0.076288547	26.804999828
0.537859596	0.077162442	26.904999733
0.539805100	0.074535912	27.005000114
0.541820555	0.075437813	27.105000257
0.543886825	0.076162560	27.204999447



0.545940449	0.075940501	27.304999828
0.547955860	0.075579946	27.404999733
0.549977660	0.075145620	27.505000114
0.551986726	0.076950917	27.605000496
0.553919497	0.077270515	27.704999685
0.555941282	0.078489585	27.804999828
0.557931286	0.078532851	27.904999733
0.559895852	0.078274794	28.005000114
0.561892215	0.078457243	28.105000257
0.563926718	0.080365280	28.204999447
0.565973933	0.079775027	28.304999828
0.567970303	0.078683253	28.404999733
0.569941229	0.078586804	28.505000114
0.571899422	0.077871155	28.605000496
0.573870369	0.077624956	28.704999685
0.575879429	0.079279589	28.804999828
0.577907573	0.077112896	28.904999733
0.579935746	0.075639338	29.005000114
0.581925728	0.075180509	29.105000257
0.583890287	0.076692467	29.204999447
0.585893038	0.076258730	29.304999828
0.587883027	0.075380681	29.404999733
0.589892094	0.075139763	29.505000114
0.591939315	0.074421498	29.605000496
0.593935649	0.073959247	29.704999685
0.595843027	0.075053515	29.804999828
0.597864804	0.075052272	29.904999733
0.599937441	0.075654408	30.005000114
0.601946522	0.076470353	30.105000257
0.603955588	0.075373489	30.204999447
0.605939262	0.074991650	30.304999828
0.607910188	0.075196258	30.404999733
0.609855691	0.075169103	30.505000114
0.611890180	0.074904393	30.605000496
0.613950120	0.074756711	30.704999685
0.615959216	0.073292403	30.804999828
0.617961901	0.072173276	30.904999733
0.619913786	0.073094060	31.005000114
0.621897401	0.073934053	31.105000257
0.623893764	0.073755742	31.204999447
0.625921908	0.074339359	31.304999828
0.627924615	0.073148916	31.404999733
0.629870112	0.073408537	31.505000114
0.631879171	0.073556971	31.605000496
0.633932759	0.073501636	31.704999685
0.635986347	0.072963548	31.804999828
0.637963603	0.072587957	31.904999495
0.639915481	0.073118072	32.004998684
0.641899132	0.073211237	32.105000019
0.643882770	0.074375799	32.204998970
0.645929991	0.074548437	32.305000782
0.647977227	0.073828149	32.404999733
0.649986279	0.074823404	32.504999638
0.651944501	0.074555838	32.605000496
0.653921794	0.074045073	32.704999447
0.655911761	0.073684038	32.805001259
0.657863638	0.073931706	32.904999733
0.659929923	0.073215956	33.004999161
0.661926286	0.072095959	33.105000019
0.663871790	0.070865221	33.204998970
0.665810934	0.069673438	33.305000782



0.667813627	0.070061585	33.404999733
0.669905356	0.070163368	33.504999638
0.671946240	0.070406299	33.605000496
0.673968018	0.069961618	33.704999447
0.675938951	0.070101471	33.805001259
0.677884454	0.070702465	33.904999733
0.679893521	0.069808509	34.004999161
0.681902595	0.070164685	34.105000019
0.683962528	0.071235248	34.204998970
0.685952509	0.071116555	34.305000782
0.687955238	0.070606290	34.404999733
0.689957960	0.069232301	34.504999638
0.691947964	0.068045596	34.605000496
0.693937953	0.068572710	34.704999447
0.695966097	0.068337288	34.805001259
0.697937023	0.068433452	34.904999733
0.699857090	0.068307970	35.004999161
0.701866164	0.067556622	35.105000019
0.703887970	0.067224145	35.204998970
0.705884326	0.066484725	35.305000782
0.707893385	0.066159501	35.404999733
0.709915192	0.065089616	35.504999638
0.711911533	0.064970832	35.605000496
0.713888847	0.064848527	35.704999447
0.715942399	0.066544738	35.805001259
0.718002339	0.068407743	35.904999733
0.719985983	0.068501612	36.004999161
0.721925120	0.067361708	36.105000019
0.723876976	0.066885705	36.204998970
0.725866965	0.066110271	36.305000782
0.727907827	0.064985412	36.404999733
0.729967767	0.063377704	36.504999638
0.732002285	0.062546879	36.605000496
0.733928711	0.061669078	36.704999447
0.735842405	0.062246300	36.805001259
0.737876908	0.062058520	36.904999733
0.739924129	0.062910610	37.004999161
0.741920507	0.062997732	37.105000019
0.743929544	0.063124252	37.204998970
0.745919569	0.063710554	37.305000782
0.747896833	0.062736527	37.404999733
0.749905899	0.062204540	37.504999638
0.751940446	0.061900176	37.605000496
0.753962231	0.061696917	37.704999447
0.755971283	0.061238828	37.805001259
0.757967646	0.060816092	37.904999733
0.759938572	0.060791536	38.004999161
0.761903138	0.060503708	38.105000019
0.763905860	0.059460554	38.204998970
0.765953075	0.058662026	38.305000782
0.767911275	0.058446768	38.404999733
0.769863131	0.056322334	38.504999638
0.771865845	0.056371167	38.605000496
0.773913082	0.057180094	38.704999447
0.775934866	0.056782041	38.805001259
0.777918533	0.056756070	38.904999733
0.779914859	0.056906834	39.004999161
0.781904870	0.056945242	39.105000019
0.783933036	0.057113457	39.204998970
0.785967553	0.057133132	39.305000782
0.787963887	0.057460137	39.404999733



0.789966609	0.056912819	39.504999638
0.791918457	0.056368633	39.605000496
0.793946623	0.055449557	39.704999447
0.795936605	0.054875946	39.805001259
0.797926594	0.055093812	39.904999733
0.799967456	0.054886903	40.004999161
0.801957474	0.055269002	40.105000019
0.803858449	0.054556343	40.204998970
0.805842108	0.054907472	40.305000782
0.807876611	0.053407325	40.404999733
0.809898396	0.052924285	40.504999638
0.811932900	0.053483680	40.605000496
0.813929277	0.052429404	40.704999447
0.815912892	0.052339843	40.805001259
0.817864769	0.052156680	40.904999733
0.819867462	0.050723370	41.004999161
0.821921050	0.053357551	41.105000019
0.823936483	0.052506755	41.204998970
0.825964635	0.051336472	41.305000782
0.827903757	0.050914639	41.404999733
0.829861987	0.050605996	41.504999638
0.831858342	0.049951383	41.605000496
0.833873753	0.049734593	41.704999447
0.835876490	0.049097929	41.805001259
0.837828353	0.048388660	41.904999733
0.839831060	0.047197737	42.004999161
0.841890986	0.046571189	42.105000019
0.843925489	0.046908789	42.204998970
0.845921837	0.046041507	42.305000782
0.847867341	0.044028340	42.404999733
0.849863711	0.042475158	42.504999638
0.851860081	0.042682627	42.605000496
0.853888232	0.042371173	42.704999447
0.855967228	0.042285103	42.805001259
0.858008076	0.042530588	42.904999733
0.859985375	0.042351825	43.004999161
0.861969020	0.042407471	43.105000019
0.863927227	0.042331586	43.204998970
0.865885435	0.041945226	43.305000782
0.867919953	0.041160672	43.404999733
0.869960830	0.041011311	43.504999638
0.871925382	0.041174831	43.605000496
0.873839090	0.040183970	43.704999447
0.875841797	0.040633926	43.805001259
0.877920807	0.040888629	43.904999733
0.879948930	0.041448294	44.004999161
0.881945314	0.040842331	44.105000019
0.883903514	0.040660078	44.204998970
0.885887166	0.040293271	44.305000782
0.887858099	0.041315070	44.404999733
0.889886222	0.041361051	44.504999638
0.891952528	0.041553132	44.605000496
0.893955243	0.041328137	44.704999447
0.895983409	0.042763600	44.805001259
0.897967024	0.042300942	44.904999733
0.899925246	0.043159992	45.004999161
0.901889813	0.043990336	45.105000019
0.903905224	0.043249128	45.204998970
0.905933397	0.042235845	45.305000782
0.907859823	0.042666306	45.404999733
0.909862523	0.043885329	45.504999638



0.911928830	0.043750524	45.605000496
0.913925163	0.042708232	45.704999447
0.915896104	0.040816156	45.805001259
0.917886107	0.041820398	45.904999733
0.919863422	0.041493676	46.004999161
0.921821593	0.040723211	46.105000019
0.923881540	0.040709268	46.204998970
0.925947854	0.040923418	46.305000782
0.927963265	0.041406601	46.404999733
0.929921494	0.040495196	46.504999638
0.931892413	0.040792587	46.605000496
0.933888761	0.040225577	46.704999447
0.935897857	0.041025349	46.805001259
0.937951423	0.041801788	46.904999733
0.939966863	0.040172286	47.004999161
0.941906008	0.040116159	47.105000019
0.943870575	0.040883903	47.204998970
0.945930500	0.040234176	47.305000782
0.947977722	0.040974291	47.404999733
0.949967725	0.041017449	47.504999638
0.951945010	0.040471660	47.605000496
0.953922288	0.039630472	47.704999447
0.955874144	0.040121055	47.805001259
0.957851429	0.041364604	47.904999733
0.959879573	0.040715487	48.004999161
0.961939520	0.039388833	48.105000019
0.963935861	0.040604307	48.204998970
0.965944921	0.041189533	48.305000782
0.967941291	0.040792788	48.404999733
0.969905879	0.040058831	48.504999638
0.971895875	0.038999849	48.605000496
0.973924019	0.039082561	48.704999447
0.975926756	0.038476665	48.805001259
0.977891279	0.038295609	48.904999733
0.979944860	0.037074686	49.004999161
0.982011145	0.036801933	49.105000019
0.984039332	0.036711130	49.204998970
0.985997540	0.036285719	49.305000782
0.987930311	0.036366383	49.404999733
0.989894863	0.035396214	49.504999638
0.991846726	0.034937658	49.605000496
0.993893977	0.035741264	49.704999447
0.995928480	0.035905967	49.805001259
0.997912110	0.035951747	49.904999733
0.999895768	0.035240031	50.004999161
1.001911194	0.035666707	50.105000019
1.003913931	0.035393208	50.204998970
1.005891187	0.035268174	50.305000782
1.007957471	0.035318129	50.404999733
1.009947504	0.034029314	50.504999638
1.011886634	0.034231414	50.605000496
1.013838482	0.033746450	50.704999447
1.015866641	0.033999013	50.805001259
1.017926552	0.033239062	50.904999733
1.019961084	0.033361582	51.004999161
1.021957418	0.033921887	51.105000019
1.023928344	0.033784391	51.204998970
1.025867532	0.032915496	51.305000782
1.027895662	0.033681993	51.404999733
1.029955616	0.033492208	51.504999638
1.031990105	0.033778567	51.605000496



1.033986424	0.034410718	51.704999447
1.035931928	0.034851196	51.805001259
1.037909227	0.034887412	51.904999733
1.039899245	0.034442424	52.004999161
1.041933734	0.035150528	52.105000019
1.043942786	0.034643695	52.204998970
1.045907353	0.034983881	52.305000782
1.047884667	0.034624161	52.404999733
1.049931889	0.035242766	52.504999638
1.051979110	0.036055371	52.605000496
1.053956395	0.035388128	52.704999447
1.055895525	0.034762397	52.805001259
1.057879199	0.034362323	52.904999733
1.059850096	0.034231139	53.004999161
1.061840099	0.034002917	53.105000019
1.063919131	0.034005211	53.204998970
1.065998105	0.033580311	53.305000782
1.067975420	0.034375507	53.404999733
1.069952661	0.034985810	53.504999638
1.071929932	0.034529270	53.605000496
1.073913634	0.034609488	53.704999447
1.075935405	0.034381261	53.805001259
1.077957189	0.034279925	53.904999733
1.079928101	0.033353355	54.004999161
1.081854512	0.033842609	54.105000019
1.083806390	0.034765699	54.204998970
1.085885378	0.034311862	54.305000782
1.087913552	0.034149741	54.404999733
1.089909914	0.034735097	54.504999638
1.091893530	0.034650713	54.605000496
1.093883533	0.035333265	54.704999447
1.095848129	0.035147670	54.805001259
1.097863540	0.034735753	54.904999733
1.099942572	0.035589763	55.004999161
1.101945280	0.035549991	55.105000019
1.103973394	0.035750573	55.204998970
1.105969772	0.034367927	55.305000782
1.107953431	0.035071580	55.404999733
1.109937046	0.036086218	55.504999638
1.111946185	0.036018213	55.605000496
1.113948849	0.034707614	55.704999447
1.115900697	0.034388486	55.805001259
1.117865235	0.035168711	55.904999733
1.119893423	0.035854181	56.004999161
1.121915207	0.034583335	56.105000019
1.123898808	0.034690504	56.204998970
1.125882482	0.033544686	56.305000782
1.127866155	0.033158032	56.404999733
1.129818032	0.033009663	56.504999638
1.131871570	0.032105127	56.605000496
1.133963320	0.031773731	56.704999447
1.135991479	0.032217899	56.805001259
1.137975109	0.031632167	56.904999733
1.139920583	0.031213363	57.004999161
1.141910572	0.031907112	57.105000019
1.143913309	0.031613284	57.204998970
1.145947826	0.032238443	57.305000782
1.147982315	0.032504753	57.404999733
1.149927804	0.033586987	57.504999638
1.151847857	0.032912215	57.605000496
1.153856952	0.033588187	57.704999447



1.155878679	0.033058621	57.805001259
1.157900508	0.032600775	57.904999733
1.159922336	0.031863527	58.004999161
1.161905951	0.031701762	58.105000019
1.163876907	0.032578944	58.204998970
1.165803260	0.033845050	58.305000782
1.167831477	0.033897242	58.404999733
1.169891344	0.033488565	58.504999638
1.171900483	0.033000006	58.605000496
1.173947705	0.034199140	58.704999447
1.175893151	0.034388211	58.805001259
1.177895887	0.034643614	58.904999733
1.179924002	0.034338861	59.004999161
1.181964893	0.034648085	59.105000019
1.183967630	0.034439998	59.204998970
1.185900444	0.034378849	59.305000782
1.187896763	0.033937208	59.404999733
1.189924922	0.033712618	59.504999638
1.191978547	0.032730996	59.605000496
1.193968506	0.033629677	59.704999447
1.195933059	0.034939450	59.805001259
1.197929392	0.035140570	59.904999733
1.199887629	0.033846458	60.004999161
1.201903069	0.034433816	60.105000019
1.203905762	0.035157269	60.204998970
1.205908484	0.035470220	60.305000782
1.207885769	0.034649546	60.404999733
1.209882175	0.033850487	60.504999638
1.211891213	0.034284733	60.605000496
1.213874857	0.034898144	60.704999447
1.215972938	0.033773330	60.805001259
1.218013786	0.033405037	60.904999733
1.219914819	0.034257886	61.004999161
1.221853905	0.034977197	61.105000019
1.223843923	0.033708721	61.204998970
1.225884786	0.033503192	61.305000782
1.227912901	0.032988603	61.404999733
1.229921982	0.033131134	61.504999638
1.231943839	0.033692474	61.605000496
1.233914707	0.033286421	61.704999447
1.235923817	0.034069958	61.805001259
1.237964723	0.034305571	61.904999733
1.239980105	0.034413770	62.004999161
1.241957376	0.033871421	62.105000019
1.243909210	0.034054788	62.204998970
1.245873835	0.034349476	62.305000782
1.247876527	0.035095804	62.404999733
1.249891968	0.034277334	62.504999638
1.251932874	0.035125413	62.605000496
1.253903727	0.035231916	62.704999447
1.255836542	0.035405742	62.805001259
1.257845623	0.035330971	62.904999733
1.259892801	0.035108151	63.004999161
1.261876474	0.034830052	63.105000019
1.263847400	0.033849522	63.204998970
1.265843748	0.033016749	63.305000782
1.267852844	0.034709107	63.404999733
1.269855566	0.034429607	63.504999638
1.271909103	0.033818457	63.605000496
1.273981747	0.034258926	63.704999447
1.275990828	0.034247036	63.805001259



1.277974516	0.034014045	63.905000210
1.279958116	0.034261028	64.005002022
1.281909936	0.034161953	64.104999542
1.283912716	0.033714049	64.204999924
1.285966267	0.033662452	64.304999352
1.287918160	0.032566477	64.405002594
1.289857231	0.033059144	64.505001068
1.291809080	0.033641217	64.604999542
1.293881767	0.034323265	64.704999924
1.295941678	0.033174879	64.804998398
1.297925366	0.031899330	64.905001640
1.299908996	0.031025704	65.005001068
1.301918062	0.031536557	65.104999542
1.303863537	0.031325013	65.204999924
1.305878977	0.030353610	65.304999352
1.307945291	0.030823635	65.405002594
1.309973464	0.031193694	65.505001068
1.311976142	0.032075609	65.604999542
1.313972491	0.030677522	65.704999924
1.315956120	0.030757010	65.804998398
1.317901653	0.030979850	65.905001640
1.319910720	0.031484857	66.005001068
1.321945238	0.030271047	66.104999542
1.323890698	0.030830089	66.204999924
1.325842590	0.031649311	66.304999352
1.327858015	0.031274226	66.405002594
1.329892504	0.029967794	66.505001068
1.331901585	0.028658466	66.604999542
1.333897933	0.029483714	66.704999924
1.335868816	0.029539461	66.804998398
1.337846159	0.029516760	66.905001640
1.339874289	0.029459021	67.005001068
1.341934258	0.029639753	67.104999542
1.343968761	0.027957707	67.204999924
1.345965109	0.028143380	67.304999352
1.347910613	0.028069530	67.405002594
1.349894272	0.028424831	67.505001068
1.351903309	0.027972959	67.604999542
1.353906060	0.027756141	67.704999924
1.355959655	0.028214362	67.804998398
1.357917805	0.028353719	67.905001640
1.359837886	0.028551783	68.005001068
1.361885137	0.027796502	68.104999542
1.363919640	0.028158636	68.204999924
1.365928678	0.029265676	68.304999352
1.367950492	0.029185215	68.405002594
1.369946855	0.028208808	68.505001068
1.371892315	0.028640712	68.604999542
1.373850551	0.028838377	68.704999924
1.375872322	0.028698926	68.804998398
1.377951354	0.028047958	68.905001640
1.379954076	0.028218458	69.005001068
1.381982176	0.028346881	69.104999542
1.383946801	0.028141345	69.204999924
1.385924072	0.028511543	69.304999352
1.387914090	0.027911281	69.405002594
1.389923142	0.029237930	69.505001068
1.391932194	0.028895376	69.604999542
1.393877712	0.028979116	69.704999924
1.395874075	0.028460306	69.804998398
1.397946733	0.029540066	69.905001640



1.399993926	0.028996476	70.005001068
1.401971211	0.028582897	70.104999542
1.403935807	0.027870481	70.204999924
1.405932155	0.027206146	70.304999352
1.407903066	0.026694681	70.405002594
1.409943914	0.026640344	70.505001068
1.411984820	0.026386178	70.604999542
1.413974824	0.026525322	70.704999924
1.415913895	0.025733640	70.804998398
1.417923020	0.025868466	70.905001640
1.419881242	0.024972382	71.005001068
1.421852125	0.024293181	71.104999542
1.423924783	0.024101829	71.204999924
1.425952942	0.024376765	71.304999352
1.427879353	0.024215946	71.405002594
1.429831216	0.023959885	71.505001068
1.431846671	0.023794073	71.604999542
1.433912956	0.023424444	71.704999924
1.435953774	0.023793460	71.804998398
1.437956540	0.024378449	71.905001640
1.439933811	0.024696698	72.005001068
1.441904766	0.024403253	72.104999542
1.443901157	0.024351747	72.204999924
1.445961039	0.024952372	72.304999352
1.447970106	0.025623730	72.405002594
1.449972799	0.026025450	72.505001068
1.451950113	0.026111532	72.604999542
1.453914694	0.025807765	72.704999924
1.455904741	0.026620988	72.804998398
1.457888327	0.026945561	72.905001640
1.459922816	0.027083614	73.005001068
1.461919208	0.026526409	73.104999542
1.463877445	0.026019578	73.204999924
1.465892856	0.026872363	73.304999352
1.467946422	0.026239401	73.405002594
1.469961877	0.026120977	73.505001068
1.471926400	0.026395681	73.604999542
1.473897326	0.026587018	73.704999924
1.475868281	0.027609462	73.804998398
1.477858270	0.025718618	73.905001640
1.479924540	0.024558734	74.005001068
1.482003572	0.025585489	74.104999542
1.484006265	0.025009477	74.204999924
1.485970861	0.025409588	74.304999352
1.487935428	0.025330320	74.405002594
1.489912727	0.024995981	74.505001068
1.491953590	0.025291978	74.604999542
1.493981748	0.025609162	74.704999924
1.495959004	0.027083669	74.804998398
1.497872727	0.027040842	74.905001640
1.499811886	0.026726107	75.005001068
1.501871797	0.027499710	75.104999542
1.503919018	0.026746359	75.204999924
1.505915352	0.026366495	75.304999352
1.507911715	0.026708277	75.405002594
1.509927111	0.027934864	75.505001068
1.511891693	0.027626111	75.604999542
1.513875337	0.028256531	75.704999924
1.515935292	0.027341224	75.804998398
1.517937984	0.028807446	75.905001640
1.519927988	0.028463919	76.005001068



1.521924365	0.029032596	76.104999542
1.523895335	0.027858547	76.204999924
1.525866232	0.028293030	76.304999352
1.527900720	0.029112417	76.405002594
1.529941597	0.029396806	76.505001068
1.531931630	0.027923003	76.604999542
1.533870731	0.027483213	76.704999924
1.535860734	0.027089356	76.804998398
1.537907956	0.028746705	76.905001640
1.539917022	0.028313307	77.005001068
1.541919744	0.028515692	77.104999542
1.543897029	0.028764511	77.204999924
1.545874315	0.028598731	77.304999352
1.547889784	0.028296778	77.405002594
1.549962413	0.028296924	77.505001068
1.551984140	0.028388264	77.604999542
1.553967813	0.029151769	77.704999924
1.555900613	0.028951491	77.804998398
1.557890602	0.028486737	77.905001640
1.559906086	0.027644851	78.005001068
1.561946890	0.027167765	78.104999542
1.564000442	0.027745308	78.204999924
1.565990475	0.028060815	78.304999352
1.567916916	0.028492887	78.405002594
1.569875094	0.028607528	78.505001068
1.571871428	0.028221027	78.604999542
1.573886926	0.027092826	78.704999924
1.575915026	0.028485477	78.804998398
1.577917748	0.028573155	78.905001640
1.579882373	0.028943651	79.005001068
1.581834193	0.027984528	79.104999542
1.583836944	0.028577760	79.204999924
1.585922291	0.028630165	79.304999352
1.587956765	0.028493053	79.405002594
1.589972235	0.028511169	79.505001068
1.591949520	0.028464305	79.604999542
1.593901383	0.028788475	79.704999924
1.595904061	0.028741990	79.804998398
1.597925861	0.028866697	79.905001640
1.599960378	0.028942853	80.005001068
1.601924931	0.029315697	80.104999542
1.603889483	0.029940024	80.204999924
1.605892205	0.029380640	80.304999352
1.607933082	0.028252389	80.405002594
1.609935774	0.028569982	80.505001068
1.611925807	0.029256710	80.604999542
1.613922155	0.029190795	80.704999924
1.615943940	0.028412214	80.804998398
1.617940317	0.028843277	80.905001640
1.619949384	0.028941979	81.005001068
1.621933014	0.030244030	81.104999542
1.623891236	0.029123108	81.204999924
1.625919351	0.028753900	81.304999352
1.627922058	0.028670801	81.405002594
1.629873965	0.028914808	81.505001068
1.631927560	0.028162545	81.604999542
1.633949330	0.028450181	81.704999924
1.635920227	0.029220616	81.804998398
1.637827561	0.029168788	81.905001640
1.639798516	0.030197256	82.005001068
1.641877563	0.028772785	82.104999542



1.643943833	0.029193873	82.204999924
1.645971992	0.028894731	82.304999352
1.647961966	0.030222901	82.405002594
1.649939237	0.030044948	82.505001068
1.651916507	0.029984762	82.604999542
1.653931948	0.030472887	82.704999924
1.655972796	0.029939472	82.804998398
1.657988236	0.030252544	82.905001640
1.659965579	0.030633874	83.005001068
1.661949180	0.030238389	83.104999542
1.663907402	0.031104111	83.204999924
1.665859250	0.031800244	83.304999352
1.667887438	0.031273662	83.405002594
1.669896476	0.030828071	83.505001068
1.671829319	0.031051684	83.604999542
1.673863764	0.031976412	83.704999924
1.675885578	0.032065997	83.804998398
1.677900989	0.031605834	83.905001640
1.679916459	0.032250992	84.005001068
1.681906419	0.032863710	84.104999542
1.683909126	0.031723307	84.204999924
1.685867333	0.030620528	84.304999352
1.687927317	0.030189803	84.405002594
1.689974481	0.030761228	84.505001068
1.691983605	0.031724073	84.604999542
1.693979968	0.031207170	84.704999924
1.695950894	0.032411995	84.804998398
1.697947242	0.033206900	84.905001640
1.699943590	0.033025221	85.005001068
1.701952671	0.032245843	85.104999542
1.703949034	0.032151747	85.204999924
1.705881776	0.032095072	85.304999352
1.707801857	0.031788598	85.405002594
1.709855438	0.031289414	85.505001068
1.711921737	0.031397675	85.604999542
1.713892678	0.030761102	85.704999924
1.715901773	0.029501725	85.804998398
1.717910811	0.029858928	85.905001640
1.719881751	0.029774321	86.005001068
1.721852677	0.030144605	86.104999542
1.723912603	0.030700247	86.204999924
1.725966184	0.031777567	86.304999352
1.727981580	0.031976751	86.405002594
1.730016156	0.031919841	86.505001068
1.731999771	0.032360020	86.604999542
1.733951634	0.032237510	86.704999924
1.735941623	0.033412735	86.804998398
1.737957005	0.033230350	86.905001640
1.739934349	0.032319920	87.005001068
1.741867090	0.032211681	87.104999542
1.743850764	0.032752732	87.204999924
1.745885238	0.031327796	87.304999352
1.747919770	0.029698857	87.405002594
1.749871590	0.029734893	87.505001068
1.751836156	0.031065583	87.604999542
1.753819859	0.031816825	87.704999924
1.755828882	0.030105365	87.804998398
1.757907914	0.029228196	87.905001640
1.759974199	0.029435413	88.005001068
1.761938765	0.029678693	88.104999542
1.763877925	0.029072167	88.204999924



1.765874244	0.028817029	88.304999352
1.767883368	0.028726380	88.405002594
1.769873357	0.027696091	88.505001068
1.771965064	0.027804219	88.604999542
1.773961412	0.027664827	88.704999924
1.775906974	0.026222475	88.804998398
1.777871526	0.025415259	88.905001640
1.779899641	0.027176655	89.005001068
1.781908722	0.026421525	89.104999542
1.783879619	0.027048332	89.204999924
1.785869666	0.027768167	89.304999352
1.787846908	0.026606489	89.405002594
1.789792397	0.027452498	89.505001068
1.791801507	0.027252360	89.604999542
1.793899573	0.026520742	89.704999924
1.795959513	0.024917125	89.804998398
1.797974954	0.025916508	89.905001640
1.799952239	0.026758237	90.005001068
1.801948572	0.027122251	90.104999542
1.803894120	0.025846726	90.204999924
1.805884094	0.025678040	90.304999352
1.807912253	0.026891379	90.405002594
1.809883164	0.027606576	90.505001068
1.811854076	0.026513258	90.604999542
1.813952185	0.026304789	90.704999924
1.816024800	0.027310914	90.804998398
1.817995770	0.027030477	90.905001640
1.819928497	0.027372708	91.005001068
1.821918500	0.026206541	91.104999542
1.823895785	0.026000388	91.204999924
1.825885789	0.026135736	91.304999352
1.827926724	0.027030053	91.405002594
1.829967528	0.027580337	91.505001068
1.831919362	0.026854749	91.604999542
1.833922113	0.026705525	91.704999924
1.835899369	0.027103938	91.804998398
1.837876684	0.027755199	91.905001640
1.839955687	0.027769527	92.005001068
1.841996578	0.026945466	92.104999542
1.843948383	0.027184382	92.204999924
1.845855746	0.028078152	92.304999352
1.847839390	0.028920546	92.405002594
1.849924767	0.028047944	92.505001068
1.851946581	0.026820201	92.604999542
1.853961934	0.027162866	92.704999924
1.855939277	0.028749966	92.804998398
1.857922922	0.028319869	92.905001640
1.859893848	0.027909434	93.005001068
1.861902929	0.027735297	93.104999542
1.863950136	0.028532319	93.204999924
1.865965532	0.028749130	93.304999352
1.867955551	0.029119155	93.405002594
1.869920146	0.029675229	93.505001068
1.871910150	0.030089438	93.604999542
1.873893780	0.031279740	93.704999924
1.875953691	0.031352626	93.804998398
1.877969145	0.030107155	93.905001640
1.879895601	0.029752671	94.005001068
1.881898250	0.029226551	94.104999542
1.883939141	0.029254918	94.204999924
1.885960926	0.029094778	94.304999352



1.887944527	0.027211494	94.405002594
1.889921841	0.026477376	94.505001068
1.891899155	0.025927541	94.604999542
1.893844630	0.026576535	94.704999924
1.895879104	0.026359870	94.804998398
1.897932714	0.026270162	94.905001640
1.899960858	0.025953381	95.005001068
1.901957250	0.025585725	95.104999542
1.903928176	0.025802411	95.204999924
1.905918121	0.025825554	95.304999352
1.907946309	0.025736603	95.405002594
1.909980783	0.025666856	95.505001068
1.911964500	0.027557501	95.604999542
1.913909960	0.026537821	95.704999924
1.915817295	0.025996820	95.804998398
1.917864574	0.026625503	95.905001640
1.919899049	0.026757614	96.005001068
1.921889008	0.026161185	96.104999542
1.923929871	0.025889460	96.204999924
1.925926234	0.025942650	96.304999352
1.927884441	0.026427357	96.405002594
1.929842649	0.026844352	96.505001068
1.931864477	0.027074437	96.604999542
1.933949796	0.027059513	96.704999924
1.935933455	0.028095923	96.804998398
1.937961584	0.027787377	96.905001640
1.939938928	0.027623720	97.005001068
1.941935247	0.028055188	97.104999542
1.943957031	0.027691926	97.204999924
1.945985190	0.027296707	97.304999352
1.947975165	0.026487118	97.405002594
1.949882557	0.027145850	97.505001068
1.951853483	0.026891589	97.604999542
1.953907078	0.025827042	97.704999924
1.955935149	0.024737186	97.804998398
1.957899804	0.023958647	97.905001640
1.959902525	0.025184661	98.005001068
1.961873437	0.025353885	98.104999542
1.963869785	0.026148544	98.204999924
1.965916977	0.025532223	98.304999352
1.967989665	0.025934495	98.405002594
1.970011421	0.026921661	98.505001068
1.971956925	0.025723438	98.604999542
1.973927865	0.025599472	98.704999924
1.975898747	0.026271109	98.804998398
1.977876062	0.026794950	98.905001640
1.979942375	0.026074041	99.005001068
1.981938811	0.026273740	99.104999542
1.983884198	0.025662795	99.204999924
1.985842391	0.026141829	99.304999352
1.987864205	0.027015869	99.405002594
1.989905111	0.027031946	99.505001068
1.991945901	0.026852052	99.604999542
1.993955084	0.026593806	99.704999924
1.995913277	0.026653772	99.804998398
1.997846004	0.027205870	99.905001640
1.999855100	0.027237926	100.005001068
2.001921384	0.026434175	100.104999542
2.003962290	0.027452803	100.204999924
2.005971241	0.027867062	100.304999352
2.007942297	0.028284092	100.405002594



2.009925869	0.028608542	100.505001068
2.011896926	0.028440997	100.604999542
2.013874124	0.028139760	100.704999924
2.015902312	0.027745158	100.804998398
2.017873194	0.029041719	100.905001640
2.019831445	0.027464710	101.005001068
2.021885011	0.027162866	101.104999542
2.023964014	0.027038911	101.204999924
2.025966649	0.028190496	101.304999352
2.027943905	0.026423320	101.405002594
2.029927680	0.027092951	101.505001068
2.031923970	0.026349137	101.604999542
2.033882221	0.025736151	101.704999924
2.035891288	0.025715499	101.804998398
2.037938480	0.026134093	101.905001640
2.039922168	0.025854866	102.005001068
2.041924832	0.026564592	102.104999542
2.043914865	0.026340621	102.204999924
2.045892179	0.026223817	102.304999352
2.047945803	0.026055831	102.405002594
2.049986593	0.025688115	102.505001068
2.051989373	0.024525398	102.604999542
2.053896635	0.024910359	102.704999924
2.055842197	0.024953125	102.804998398
2.057889476	0.024580955	102.905001640
2.059923892	0.024259346	103.005001068
2.061964769	0.024293796	103.104999542
2.063942025	0.023540528	103.204999924
2.065919369	0.024284067	103.304999352
2.067871217	0.023892587	103.405002594
2.069873852	0.023632636	103.505001068
2.071914787	0.023625463	103.604999542
2.073942946	0.023340926	103.704999924
2.075945609	0.022956853	103.804998398
2.077929210	0.022921425	103.905001640
2.079925674	0.024464255	104.005001068
2.081852028	0.023820892	104.104999542
2.083867439	0.023118919	104.204999924
2.085882879	0.022721450	104.304999352
2.087847388	0.022884802	104.405002594
2.089837420	0.023985619	104.505001068
2.091878327	0.023226523	104.604999542
2.093912888	0.022645175	104.704999924
2.095921896	0.023221944	104.804998398
2.097880119	0.023116965	104.905001640
2.099851030	0.023654525	105.005001068
2.101828373	0.023121869	105.104999542
2.103894716	0.023980103	105.204999924
2.105967258	0.024319311	105.304999352
2.108014538	0.023791228	105.405002594
2.109998226	0.023187487	105.505001068
2.111943555	0.022783037	105.604999542
2.113940049	0.022725036	105.704999924
2.115923679	0.023620681	105.804998398
2.117920027	0.023374807	105.905001640
2.119941695	0.024115791	106.005001068
2.121906349	0.023407195	106.104999542
2.123807266	0.023881485	106.204999924
2.125822735	0.024150026	106.304999352
2.127889078	0.025174725	106.405002594
2.129898145	0.025145246	106.505001068



2.131958143	0.024859106	106.604999542
2.133948175	0.024846199	106.704999924
2.135899966	0.024549877	106.804998398
2.137832693	0.025266622	106.905001640
2.139879914	0.024832494	107.005001068
2.141971694	0.023286198	107.104999542
2.143974416	0.024532499	107.204999924
2.146002545	0.024521409	107.304999352
2.147967054	0.023759155	107.405002594
2.149906213	0.023520396	107.505001068
2.151908993	0.023644621	107.604999542
2.153924375	0.024819729	107.704999924
2.155952505	0.025259918	107.804998398
2.157904382	0.024413379	107.905001640
2.159856260	0.024780526	108.005001068
2.161890734	0.026027408	108.104999542
2.163950703	0.026085568	108.204999924
2.165889775	0.026043936	108.304999352
2.167867147	0.026569639	108.405002594
2.169857064	0.026742882	108.505001068
2.171834349	0.026885325	108.604999542
2.173894318	0.026730597	108.704999924
2.175966976	0.026817949	108.804998398
2.177988732	0.027917208	108.905001640
2.179959731	0.027569867	109.005001068
2.181943331	0.027221115	109.104999542
2.183914301	0.026450911	109.204999924
2.185859717	0.026629226	109.304999352
2.187919687	0.027130281	109.405002594
2.189960534	0.025971094	109.505001068
2.191912441	0.025423662	109.604999542
2.193883265	0.024487300	109.704999924
2.195892448	0.024159899	109.804998398
2.197965019	0.023543865	109.905001640
2.199961455	0.023235943	110.005001068
2.201964118	0.022885658	110.104999542
2.203928714	0.023399910	110.204999924
2.205861470	0.023239864	110.304999352
2.207832469	0.022992006	110.405002594
2.209892351	0.023550089	110.505001068
2.211939602	0.022893052	110.604999542
2.213935979	0.022659022	110.704999924
2.215932298	0.022567084	110.804998398
2.217941394	0.022084950	110.905001640
2.219912247	0.022668552	111.005001068
2.221876872	0.021297414	111.104999542
2.223905001	0.022003765	111.204999924
2.225907723	0.023105645	111.304999352
2.227834193	0.022669729	111.405002594
2.229900419	0.021708388	111.505001068
2.231979452	0.021204883	111.604999542
2.233963140	0.021479545	111.704999924
2.235946711	0.021955235	111.804998398
2.237949433	0.021147502	111.905001640
2.239914029	0.021502888	112.005001068
2.241846814	0.022049044	112.104999542
2.243868599	0.022217292	112.204999924
2.245934884	0.021559269	112.304999352
2.247937606	0.021682703	112.405002594
2.249927638	0.021738082	112.505001068
2.251904865	0.022282686	112.604999542



2.253882121	0.021766249	112.704999924
2.255910309	0.022517766	112.804998398
2.257982880	0.022562051	112.905001640
2.259979316	0.022108821	113.005001068
2.261892951	0.021498546	113.104999542
2.263819450	0.019738914	113.204999924
2.265892050	0.020505027	113.304999352
2.267951961	0.019917580	113.405002594
2.269941993	0.020700685	113.505001068
2.271944773	0.020273334	113.604999542
2.273972990	0.020785620	113.704999924
2.275937470	0.020648088	113.804998398
2.277921129	0.020360830	113.905001640
2.279930108	0.020321586	114.005001068
2.281964757	0.019326954	114.104999542
2.283948299	0.019458869	114.204999924
2.285951050	0.020214531	114.304999352
2.287915675	0.020401356	114.405002594
2.289867407	0.020387198	114.505001068
2.291908255	0.019400543	114.604999542
2.293968195	0.018342736	114.704999924
2.295888320	0.018777669	114.804998398
2.297859261	0.019165832	114.905001640
2.299881075	0.017249097	115.005001068
2.301953733	0.017454878	115.104999542
2.303962654	0.018366392	115.204999924
2.305933740	0.018999583	115.304999352
2.307904593	0.018423354	115.405002594
2.309856587	0.018071561	115.505001068
2.311871969	0.017845383	115.604999542
2.313963603	0.018961452	115.704999924
2.315991733	0.018141948	115.804998398
2.317975450	0.017969680	115.905001640
2.319933672	0.017508548	116.005001068
2.321930020	0.018922924	116.104999542
2.323939058	0.019361574	116.204999924
2.325954527	0.018744934	116.304999352
2.327969938	0.018670744	116.405002594
2.329928160	0.019384472	116.505001068
2.331822820	0.018889305	116.604999542
2.333838289	0.018343579	116.704999924
2.335891826	0.016917202	116.804998398
2.337888145	0.015393501	116.905001640
2.339935454	0.015298148	117.005001068
2.341938089	0.016495538	117.104999542
2.343915345	0.015711935	117.204999924
2.345835441	0.015174826	117.304999352
2.347857226	0.014936615	117.405002594
2.349936287	0.015575589	117.505001068
2.351938980	0.016203506	117.604999542
2.353948104	0.015566870	117.704999924
2.355918987	0.015704831	117.804998398
2.357896301	0.015944415	117.905001640
2.359924314	0.016520222	118.005001068
2.361952560	0.016223983	118.104999542
2.363980748	0.015300331	118.204999924
2.365926164	0.015796245	118.304999352
2.367897134	0.016260270	118.405002594
2.369937982	0.015830965	118.505001068
2.371978830	0.015702081	118.604999542
2.373930736	0.016271547	118.704999924



2.375907963	0.017255855	118.804998398
2.377878904	0.017503811	118.905001640
2.379862533	0.016677357	119.005001068
2.381871658	0.016841257	119.104999542
2.383906161	0.017102896	119.204999924
2.385947068	0.016529324	119.304999352
2.387911547	0.016655298	119.405002594
2.389901550	0.015987595	119.505001068
2.391891554	0.016174317	119.604999542
2.393862495	0.015411750	119.704999924
2.395947871	0.015625189	119.804998398
2.398020559	0.015868207	119.905001640
2.399978810	0.015631461	120.005001068
2.401898819	0.015837251	120.104999542
2.403857012	0.016001950	120.204999924
2.405897831	0.017075781	120.304999352
2.407926077	0.018027739	120.405002594
2.409935085	0.017153880	120.505001068
2.411906025	0.017912799	120.604999542
2.413832437	0.018489780	120.704999924
2.415809664	0.017234541	120.804998398
2.417876036	0.018253772	120.905001640
2.419929544	0.018575077	121.005001068
2.421919606	0.018770505	121.104999542
2.423934988	0.018285283	121.204999924
2.425931423	0.018227901	121.304999352
2.427940432	0.018712262	121.405002594
2.429911401	0.018179448	121.505001068
2.431933186	0.018923811	121.604999542
2.433948626	0.018196661	121.704999924
2.435862378	0.017387311	121.804998398
2.437877760	0.018206071	121.905001640
2.439918637	0.019454432	122.005001068
2.441940422	0.018670129	122.104999542
2.443924081	0.019322680	122.204999924
2.445914084	0.019222062	122.304999352
2.447904088	0.018454069	122.405002594
2.449862193	0.018893002	122.505001068
2.451922162	0.018631824	122.604999542
2.453956724	0.019140332	122.704999924
2.455965732	0.018666754	122.804998398
2.457943105	0.018309301	122.905001640
2.459894866	0.019070042	123.005001068
2.461891330	0.018220471	123.104999542
2.463912999	0.019107146	123.204999924
2.465979371	0.018125159	123.304999352
2.467994811	0.019272669	123.405002594
2.469927567	0.019657089	123.505001068
2.471834829	0.020366897	123.604999542
2.473856672	0.019011377	123.704999924
2.475916641	0.019311554	123.804998398
2.477938338	0.018684811	123.905001640
2.479960211	0.017544187	124.005001068
2.481924806	0.017846190	124.104999542
2.483889344	0.017564143	124.204999924
2.485847508	0.017299169	124.304999352
2.487882040	0.017916140	124.405002594
2.489948383	0.017489855	124.505001068
2.491951105	0.018527599	124.604999542
2.493960201	0.016725874	124.704999924
2.495905675	0.016084372	124.804998398



2.497832058	0.017176066	124.905001640
2.499847498	0.017440373	125.005001068
2.501894662	0.016637689	125.104999542
2.503891068	0.016744697	125.204999924
2.505868411	0.018651238	125.304999352
2.507883764	0.019203286	125.405002594
2.509956335	0.017528125	125.505001068
2.511978266	0.017968135	125.604999542
2.513910993	0.018619367	125.704999924
2.515869215	0.018438796	125.804998398
2.517840097	0.018876405	125.905001640
2.519823785	0.018290442	126.005001068
2.521871036	0.018894722	126.104999542
2.523956355	0.019184432	126.204999924
2.525984455	0.019191283	126.304999352
2.527974488	0.018504074	126.405002594
2.529970894	0.019244031	126.505001068
2.531967300	0.019565991	126.604999542
2.533912804	0.020048709	126.704999924
2.535921871	0.019059094	126.804998398
2.537911758	0.018805430	126.905001640
2.539812820	0.019963190	127.005001068
2.541796421	0.020588635	127.104999542
2.543818206	0.020511829	127.204999924
2.545865456	0.021747187	127.304999352
2.547912707	0.022790314	127.405002594
2.549921657	0.022757291	127.505001068
2.551905403	0.021887348	127.604999542
2.553844533	0.021240675	127.704999924
2.555847168	0.021572662	127.804998398
2.557907166	0.021574833	127.905000687
2.559928922	0.021593894	128.004995346
2.561988920	0.021730016	128.104999542
2.563972550	0.022352777	128.205005646
2.565949777	0.021720507	128.304998398
2.567927062	0.022719051	128.405002594
2.569961624	0.021926625	128.504999161
2.571957943	0.021889619	128.604999542
2.573903446	0.021361652	128.705003738
2.575836319	0.020737954	128.804996490
2.577883482	0.021243807	128.905000687
2.579943335	0.021422769	129.004997253
2.581882582	0.021373335	129.104999542
2.583859779	0.021683059	129.205005646
2.585818118	0.020505563	129.304998398
2.587788913	0.020904449	129.405002594
2.589829790	0.021291539	129.504999161
2.591908909	0.020392299	129.604999542
2.593968820	0.021085021	129.705003738
2.595939673	0.020684178	129.804996490
2.597923391	0.021057613	129.905000687
2.599932428	0.020749011	130.004997253
2.601909684	0.020035623	130.104999542
2.603950503	0.019725657	130.205005646
2.606004186	0.020342202	130.304998398
2.607968694	0.021631597	130.405002594
2.609901479	0.021115763	130.504999161
2.611885138	0.020236132	130.604999542
2.613938763	0.019932061	130.705003738
2.615966892	0.019935203	130.804996490
2.617931459	0.020820176	130.905000687



2.619883220	0.019565995	131.004997253
2.621847845	0.019513727	131.104999542
2.623812412	0.019786740	131.205005646
2.625872352	0.020203599	131.304998398
2.627919603	0.019747179	131.405002594
2.629928727	0.019467546	131.504999161
2.631963114	0.018859441	131.604999542
2.633972326	0.019401084	131.705003738
2.635968558	0.018224897	131.804996490
2.637926897	0.018463166	131.905000687
2.639948565	0.018035344	132.004997253
2.641989471	0.017929988	132.104999542
2.643903135	0.017946406	132.205005646
2.645912260	0.018535030	132.304998398
2.647959511	0.018804357	132.405002594
2.649981267	0.018427355	132.504999161
2.651964896	0.018054874	132.604999542
2.653929492	0.018689192	132.705003738
2.655906777	0.018096170	132.804996490
2.657852252	0.017179356	132.905000687
2.659886668	0.016941020	133.004997253
2.854906721	0.016110557	133.104999542
2.856928564	0.017205846	133.205005646
2.858874097	0.016530350	133.304998398
2.860844950	0.016200860	133.405002594
2.862911351	0.016186561	133.504999161
2.864952199	0.016419045	133.604999542
2.866878611	0.016723301	133.705003738
2.868881391	0.016697601	133.804996490
2.870928554	0.016850607	133.905000687
2.872886776	0.016920449	134.004997253
2.874940343	0.016134660	134.104999542
2.877019346	0.016609253	134.205005646
2.878977568	0.016415964	134.304998398
2.880910353	0.016017934	134.405002594
2.882925706	0.015044375	134.504999161
2.884979302	0.014841721	134.604999542
2.886905859	0.014772782	134.705003738
2.888921241	0.014795142	134.804996490
2.891025593	0.013711256	134.905000687
2.892977442	0.013511564	135.004997253
2.894935635	0.013615633	135.104999542
2.896970138	0.012704306	135.205005646
2.898991981	0.012908270	135.304998398
2.900912077	0.012969516	135.405002594
2.902876731	0.012571453	135.504999161
2.904904773	0.012365256	135.604999542
2.906894806	0.012350315	135.705003738
2.908897528	0.013334756	135.804996490
2.910970128	0.013450105	135.905000687
2.912979282	0.012881984	136.004997253
2.914912038	0.012946450	136.104999542
2.916882979	0.013843126	136.205005646
2.918930142	0.014433904	136.304998398
2.920951927	0.012239635	136.405002594
2.922941931	0.012584848	136.504999161
2.924995555	0.013436675	136.604999542
2.926960122	0.013559933	136.705003738
2.928848320	0.012666591	136.804996490
2.930876537	0.012877997	136.905000687
2.932955511	0.013472354	137.004997253



2.934881864	0.013315009	137.104999542
2.936833771	0.011752980	137.205005646
2.938849153	0.010871871	137.304998398
2.940890088	0.010499863	137.405002594
2.942860971	0.009891093	137.504999161
2.944857464	0.009632826	137.604999542
2.946936380	0.010540444	137.705003738
2.948964539	0.010433990	137.804996490
2.950909984	0.010149646	137.905000687
2.952931798	0.010299818	138.004997253
2.954959898	0.010307322	138.104999542
2.956937242	0.011182226	138.205005646
2.958997095	0.010197090	138.304998398
2.961006248	0.010649083	138.405002594
2.962964470	0.010952989	138.504999161
2.964922634	0.010278780	138.604999542
2.966982604	0.009594260	138.705003738
2.968991757	0.009182856	138.804996490
2.970854519	0.009472454	138.905000687
2.972857270	0.011260026	139.004997253
2.974898118	0.010072758	139.104999542
2.976862655	0.009776288	139.205005646
2.978878096	0.010328962	139.304998398
2.980969730	0.011427870	139.405002594
2.982985287	0.009735784	139.504999161
2.984886291	0.007712879	139.604999542
2.986920765	0.008342232	139.705003738
2.988955181	0.009364297	139.804996490
2.990913403	0.009168354	139.905000687
2.992922498	0.009166387	140.004997253
2.994957031	0.008541508	140.104999542
2.996902505	0.009886860	140.205005646
2.998898854	0.008909461	140.304998398
3.000933386	0.008969967	140.405002594
3.002967918	0.008721630	140.504999161
3.004926082	0.007900710	140.604999542
3.006884363	0.008595609	140.705003738
3.008918837	0.008966539	140.804996490
3.010877059	0.009684217	140.905000687
3.012809786	0.010333501	141.004997253
3.014895250	0.009286772	141.104999542
3.016967850	0.010130102	141.205005646
3.018875199	0.010090044	141.304998398
3.020795237	0.009681307	141.405002594
3.022855177	0.009094690	141.504999161
3.024902428	0.008282575	141.604999542
3.026911494	0.008714293	141.705003738
3.028920502	0.008153727	141.804996490
3.030929627	0.008791714	141.905000687
3.032887820	0.008842385	142.004997253
3.034877824	0.008409187	142.104999542
3.036956827	0.008506349	142.205005646
3.038927796	0.008234305	142.304998398
3.040898708	0.007492826	142.405002594
3.042926866	0.007991351	142.504999161
3.044916899	0.008117128	142.604999542
3.046894184	0.008410484	142.705003738
3.048960469	0.007925659	142.804996490
3.051014093	0.007108369	142.905000687
3.052978602	0.007691910	143.004997253
3.054898698	0.008700388	143.104999542



3.056920483	0.009782977	143.205005646
3.058942297	0.008692221	143.304998398
3.060913179	0.008702767	143.405002594
3.062934877	0.008737004	143.504999161
3.064943943	0.008371360	143.604999542
3.066889505	0.008401525	143.705003738
3.068847698	0.008327711	143.804996490
3.070920444	0.008005484	143.905000687
3.072993073	0.008466143	144.004997253
3.074919427	0.008490467	144.104999542
3.076871333	0.008607442	144.205005646
3.078886773	0.009037374	144.304998398
3.080851340	0.009139821	144.405002594
3.082898504	0.008753450	144.504999161
3.084983910	0.008406519	144.604999542
3.086961195	0.008527664	144.705003738
3.088874859	0.008862817	144.804996490
3.090883984	0.007775072	144.905000687
3.092943924	0.007291645	145.004997253
3.094870277	0.008223917	145.104999542
3.096834931	0.008193570	145.205005646
3.098907502	0.007298139	145.304998398
3.100865753	0.007083820	145.405002594
3.102817631	0.006547043	145.504999161
3.104858450	0.005765211	145.604999542
3.106931166	0.006054639	145.705003738
3.108940204	0.005369213	145.804996490
3.110892139	0.006256912	145.905000687
3.112920152	0.006483081	146.004997253
3.114878462	0.005758771	146.104999542
3.116862092	0.004685452	146.205005646
3.118947439	0.004818215	146.304998398
3.120994603	0.006116721	146.405002594
3.122927446	0.005983017	146.504999161
3.124872979	0.005686912	146.604999542
3.126939235	0.005761492	146.705003738
3.128954675	0.006368150	146.804996490
3.130925528	0.006457545	146.905000687
3.132985614	0.007075918	147.004997253
3.134988248	0.007433544	147.104999542
3.136863816	0.007878940	147.205005646
3.138885513	0.008079682	147.304998398
3.140970890	0.007982025	147.405002594
3.142948233	0.007593409	147.504999161
3.144874703	0.007132815	147.604999542
3.146890027	0.006364739	147.705003738
3.148918157	0.006899232	147.804996490
3.150895500	0.006813737	147.905000687
3.152923658	0.007133436	148.004997253
3.154996288	0.006788693	148.104999542
3.156980034	0.007927991	148.205005646
3.158931766	0.008367995	148.304998398
3.160921799	0.007637274	148.405002594
3.162956302	0.007301289	148.504999161
3.164952679	0.007317987	148.604999542
3.167006216	0.007534575	148.705003738
3.169008996	0.008444025	148.804996490
3.170935408	0.007520930	148.905000687
3.172874509	0.007170100	149.004997253
3.174902697	0.008078048	149.104999542
3.176956263	0.007984513	149.205005646



3.178844519	0.007606193	149.304998398
3.180821834	0.006208367	149.405002594
3.182869114	0.005931853	149.504999161
3.184839908	0.007594859	149.604999542
3.186861839	0.007855075	149.705003738
3.188959730	0.007174922	149.804996490
3.190968913	0.007391034	149.905000687
3.192876175	0.007712274	150.004997253
3.194853605	0.008804900	150.104999542
3.196881735	0.007111574	150.205005646
3.198871767	0.007228565	150.304998398
3.200899868	0.007460886	150.405002594
3.202978900	0.008566239	150.504999161
3.204968874	0.009884732	150.604999542
3.206927009	0.009417320	150.705003738
3.208936192	0.008868648	150.804996490
3.210977040	0.009007784	150.905000687
3.212954267	0.008708006	151.004997253
3.214899771	0.007969341	151.104999542
3.216908837	0.007072151	151.205005646
3.218905185	0.007111875	151.304998398
3.220863466	0.006592473	151.405002594
3.222967905	0.006593681	151.504999161
3.225021414	0.007054259	151.604999542
3.226916015	0.006192076	151.705003738
3.228836169	0.006551248	151.804996490
3.230864357	0.007176861	151.905000687
3.232892486	0.008869847	152.004997253
3.234876116	0.007331336	152.104999542
3.236936056	0.006850411	152.205005646
3.238951409	0.007336054	152.304998398
3.240890626	0.007770379	152.405002594
3.242867882	0.007787137	152.504999161
3.244946885	0.006359961	152.604999542
3.246936889	0.006759795	152.705003738
3.248901456	0.007499293	152.804996490
3.250935988	0.008456056	152.905000687
3.252932278	0.007780017	153.004997253
3.254896903	0.007638886	153.104999542
3.256912285	0.007680087	153.205005646
3.258972312	0.008352620	153.304998398
3.260917729	0.008908239	153.405002594
3.262818733	0.007429227	153.504999161
3.264783300	0.008255636	153.604999542
3.266836866	0.007827147	153.705003738
3.268801491	0.007163937	153.804996490
3.270810528	0.006551365	153.905000687
3.272908623	0.007327458	154.004997253
3.274917777	0.007225806	154.104999542
3.276863135	0.006711580	154.205005646
3.278942226	0.006812614	154.304998398
3.281021258	0.006978780	154.405002594
3.282915801	0.006043300	154.504999161
3.284874023	0.005555601	154.604999542
3.286933992	0.005682351	154.705003738
3.288917651	0.006244884	154.804996490
3.290933033	0.006538084	154.905000687
3.293011978	0.006178014	155.004997253
3.295014787	0.005689730	155.104999542
3.296928422	0.005476773	155.205005646
3.298899450	0.005430232	155.304998398



3.300959361	0.005393783	155.405002594
3.302930243	0.006020600	155.504999161
3.304888494	0.005639980	155.604999542
3.306967468	0.006028162	155.705003738
3.308982996	0.006109637	155.804996490
3.310903005	0.007131534	155.905000687
3.312899382	0.006647387	156.004997253
3.314965608	0.007072170	156.104999542
3.316981136	0.007138378	156.205005646
3.318920149	0.007788179	156.304998398
3.320961026	0.008306013	156.405002594
3.322938399	0.007362853	156.504999161
3.324902907	0.007508535	156.604999542
3.326943814	0.007794158	156.705003738
3.328984603	0.007905557	156.804996490
3.330917447	0.007899659	156.905000687
3.332862863	0.008311462	157.004997253
3.334891109	0.008286468	157.104999542
3.336919122	0.008924866	157.205005646
3.338902898	0.009515860	157.304998398
3.340962750	0.007940838	157.405002594
3.342978191	0.008189852	157.504999161
3.344904631	0.008385160	157.604999542
3.346907295	0.008262809	157.705003738
3.348986444	0.007551264	157.804996490
3.350944608	0.006905606	157.905000687
3.352864645	0.006869229	158.004997253
3.354835615	0.008064288	158.104999542
3.356908273	0.008067991	158.205005646
3.358879185	0.006924581	158.304998398
3.360875533	0.006793095	158.405002594
3.362935473	0.007086931	158.504999161
3.364944423	0.006834905	158.604999542
3.366877296	0.006021626	158.705003738
3.368899052	0.006081895	158.804996490
3.567873617	0.005551437	158.905000687
3.569882771	0.006775771	159.004997253
3.571879264	0.006683072	159.104999542
3.573888331	0.006072180	159.205005646
3.575960960	0.005884875	159.304998398
3.577995405	0.006289930	159.405002594
3.580004472	0.005892349	159.504999161
3.582039033	0.006136121	159.604999542
3.583952668	0.005967782	159.705003738
3.585930041	0.005196347	159.804996490
3.587939020	0.005606360	159.905000687
3.589948174	0.006016985	160.004997253
3.591963497	0.006341563	160.104999542
3.593940870	0.006824333	160.205005646
3.595949936	0.006520176	160.304998398
3.597882634	0.006924131	160.405002594
3.599840915	0.005494258	160.504999161
3.601900884	0.006748663	160.604999542
3.603954450	0.006912157	160.705003738
3.605957143	0.006931975	160.804996490
3.607947088	0.006464147	160.905000687
3.609949839	0.005414613	161.004997253
3.611958789	0.006915429	161.104999542
3.613904351	0.007226997	161.205005646
3.615945228	0.005905157	161.304998398
3.618011600	0.004415673	161.405002594



3.619975934	0.004337028	161.504999161
3.621966054	0.005909063	161.604999542
3.623924276	0.005623537	161.705003738
3.625869809	0.004514880	161.804996490
3.627885191	0.004281498	161.905000687
3.629951563	0.005614398	162.004997253
3.631897154	0.005782301	162.104999542
3.633829940	0.006279458	162.205005646
3.635838948	0.005506615	162.304998398
3.637898772	0.005831244	162.405002594
3.639869741	0.004926329	162.504999161
3.641878953	0.005290457	162.604999542
3.643913398	0.004694355	162.705003738
3.645947902	0.004439701	162.804996490
3.647950682	0.003942192	162.905000687
3.649940598	0.004428075	163.004997253
3.651930543	0.004902875	163.104999542
3.653907857	0.004622364	163.205005646
3.655866138	0.004607638	163.304998398
3.657887864	0.004815272	163.405002594
3.659947804	0.005141315	163.504999161
3.661982191	0.004679205	163.604999542
3.664004180	0.004508281	163.705003738
3.665987868	0.004316995	163.804996490
3.667907935	0.004978952	163.905000687
3.669853497	0.004691485	164.004997253
3.671906888	0.004647975	164.104999542
3.673947707	0.005207172	164.205005646
3.675905900	0.005670467	164.304998398
3.677902510	0.006213359	164.405002594
3.679898742	0.005444831	164.504999161
3.681856906	0.005821523	164.604999542
3.683891409	0.007084436	164.705003738
3.686002106	0.005904234	164.804996490
3.687985882	0.006113366	164.905000687
3.689931415	0.006339822	165.004997253
3.691908671	0.007445797	165.104999542
3.693911363	0.007182217	165.205005646
3.695907653	0.005676232	165.304998398
3.697904060	0.005711543	165.405002594
3.699938767	0.005299120	165.504999161
3.701934882	0.005055572	165.604999542
3.703893133	0.004712124	165.705003738
3.705902200	0.004608397	165.804996490
3.707879572	0.005045120	165.905000687
3.709869401	0.005630289	166.004997253
3.711865953	0.004893759	166.104999542
3.713874961	0.004968804	166.205005646
3.715858562	0.005133231	166.304998398
3.717842163	0.006509965	166.405002594
3.719895612	0.005947273	166.504999161
3.721911344	0.004801885	166.604999542
3.723856644	0.006128108	166.705003738
3.725840419	0.005406480	166.804996490
3.727862146	0.005666791	166.905000687
3.729883989	0.004977751	167.004997253
3.731893114	0.005006042	167.104999542
3.733914869	0.006607291	167.205005646
3.735879291	0.006043269	167.304998398
3.737818566	0.005839949	167.405002594
3.739833948	0.004935073	167.504999161



3.741900146	0.004318564	167.604999542
3.743934678	0.005180078	167.705003738
3.745918395	0.005927419	167.804996490
3.747895564	0.004886518	167.905000687
3.749873023	0.005897574	168.004997253
3.751888376	0.005083142	168.104999542
3.753929341	0.004587535	168.205005646
3.755976504	0.005213729	168.304998398
3.757998347	0.005005374	168.405002594
3.759956482	0.004983488	168.504999161
3.761965549	0.003400566	168.604999542
3.763955494	0.004054507	168.705003738
3.765907546	0.003576882	168.804996490
3.767999035	0.002951601	168.905000687
3.770052863	0.003557478	169.004997253
3.771947318	0.004178492	169.104999542
3.773842007	0.004872216	169.205005646
3.775857418	0.004070765	169.304998398
3.777860140	0.003910529	169.405002594
3.779869294	0.004987326	169.504999161
3.781865584	0.004225657	169.604999542
3.783906519	0.003912543	169.705003738
3.785909037	0.002713721	169.804996490
3.787949943	0.003766781	169.905000687
3.789990908	0.004677944	170.004997253
3.791917290	0.003749172	170.104999542
3.793894663	0.002369171	170.205005646
3.795890982	0.003052639	170.304998398
3.797912854	0.003427640	170.405002594
3.799921746	0.003053189	170.504999161
3.801930929	0.002607088	170.604999542
3.803997184	0.003287996	170.705003738
3.805923683	0.004285900	170.804996490
3.807849978	0.004107992	170.905000687
3.809840069	0.003561581	171.004997253
3.811887145	0.003785498	171.104999542
3.813909076	0.003955598	171.205005646
3.815905366	0.003944042	171.304998398
3.817876335	0.003740085	171.405002594
3.819885402	0.003831429	171.504999161
3.821856342	0.003679467	171.604999542
3.823935345	0.004071954	171.705003738
3.826014174	0.003130544	171.804996490
3.828004235	0.003548261	171.905000687
3.829943424	0.003736082	172.004997253
3.831927170	0.003528232	172.104999542
3.833897877	0.003574364	172.205005646
3.835932497	0.003489097	172.304998398
3.838017874	0.004223641	172.405002594
3.840020712	0.004353131	172.504999161
3.841934260	0.004119882	172.604999542
3.843911545	0.003638463	172.705003738
3.845939704	0.004244806	172.804996490
3.847897984	0.004322289	172.905000687
3.849856148	0.003750625	173.004997253
3.851909802	0.003348704	173.104999542
3.853937902	0.003335971	173.205005646
3.855927993	0.004668388	173.304998398
3.857930657	0.004158002	173.405002594
3.859958786	0.003750163	173.504999161
3.861948731	0.004096639	173.604999542



3.863919759	0.003772923	173.705003738
3.865941544	0.003899861	173.804996490
3.867950581	0.002219012	173.905000687
3.869985114	0.002921447	174.004997253
3.872000496	0.003904801	174.104999542
3.873990441	0.003615377	174.205005646
3.875878581	0.003265344	174.304998398
3.877805197	0.003268656	174.405002594
3.879807889	0.004515791	174.504999161
3.881848883	0.004409237	174.604999542
3.883864061	0.004191305	174.705003738
3.885854094	0.003573398	174.804996490
3.887850442	0.003326666	174.905000687
3.889796091	0.004113695	175.004997253
3.891830507	0.003889031	175.104999542
3.893890593	0.003809472	175.205005646
3.895893315	0.003329650	175.304998398
3.897895804	0.003667978	175.405002594
3.899879579	0.004516290	175.504999161
3.901901364	0.004007217	175.604999542
3.903878649	0.003926776	175.705003738
3.905868740	0.005031918	175.804996490
3.907954029	0.004960871	175.905000687
3.909975814	0.006004102	176.004997253
3.911921347	0.005229069	176.104999542
3.913904948	0.005093650	176.205005646
3.915920388	0.006339945	176.304998398
3.917910391	0.005849857	176.405002594
3.919913055	0.006432278	176.504999161
3.921941214	0.006388502	176.604999542
3.923969402	0.006307200	176.705003738
3.925933794	0.007761808	176.804996490
3.927968559	0.007437262	176.905000687
3.929977480	0.006312798	177.004997253
3.931922984	0.005326538	177.104999542
3.933919419	0.006385224	177.205005646
3.935960180	0.007693291	177.304998398
3.937975562	0.006844394	177.405002594
3.939959424	0.005541404	177.504999161
3.941981122	0.005360931	177.604999542
3.943958523	0.006155423	177.705003738
3.945884819	0.006422968	177.804996490
3.947862162	0.004931567	177.905000687
3.949941194	0.004447490	178.004997253
3.951981955	0.006398373	178.104999542
3.953959211	0.007880555	178.205005646
3.955962049	0.007722412	178.304998398
3.957951965	0.006678065	178.405002594
3.959935711	0.006449610	178.504999161
3.961931914	0.006939876	178.604999542
3.963934694	0.006847838	178.705003738
3.965937358	0.006713549	178.804996490
3.967895696	0.006692918	178.905000687
3.969917481	0.007384421	179.004997253
3.971894796	0.007354925	179.104999542
3.973846557	0.005893689	179.205005646
3.975868400	0.006867676	179.304998398
3.977928311	0.005996921	179.405002594
3.979905538	0.007603120	179.504999161
3.981844638	0.007175127	179.604999542
3.983879084	0.007449419	179.705003738



3.985926218	0.006581949	179.804996490
3.987922741	0.006651152	179.905000687
3.989893536	0.007730908	180.004997253
3.991934558	0.007459705	180.104999542
3.993950028	0.007390881	180.205005646
3.995971842	0.007447051	180.304998398
3.998018918	0.007485763	180.405002594
3.999958106	0.007809182	180.504999161
4.001922905	0.006375738	180.604999542
4.003906419	0.005384398	180.705003738
4.005940806	0.007224811	180.804996490
4.007930896	0.006970312	180.905000687
4.009946366	0.005991595	181.004997253
4.011980811	0.005663578	181.104999542
4.013951751	0.005273213	181.205005646
4.015884537	0.006841350	181.304998398
4.017906205	0.007146371	181.405002594
4.019959888	0.006844189	181.504999161
4.021975154	0.006887475	181.604999542
4.023927206	0.007678751	181.705003738
4.025904462	0.008135576	181.804996490
4.027932679	0.007234938	181.905000687
4.029909906	0.006989890	182.004997253
4.031937948	0.006951505	182.104999542
4.033991543	0.007544797	182.205005646
4.035949794	0.007069245	182.304998398
4.037907987	0.006712993	182.405002594
4.039910738	0.007201484	182.504999161
4.041875247	0.007737161	182.604999542
4.043897206	0.008591407	182.705003738
4.045944370	0.008080993	182.804996490
4.047921568	0.008133998	182.905000687
4.049873503	0.008031602	183.004997253
4.051844415	0.007662347	183.104999542
4.053891636	0.007442958	183.205005646
4.055875266	0.007364860	183.304998398
4.057820828	0.007698543	183.405002594
4.059848812	0.008150338	183.504999161
4.061902582	0.007664581	183.604999542
4.063898843	0.007192921	183.705003738
4.065857036	0.007259499	183.804996490
4.067866044	0.008260491	183.905000687
4.069875169	0.007335188	184.004997253
4.071858886	0.007634142	184.104999542
4.073880671	0.008415857	184.205005646
4.075921432	0.008791368	184.304998398
4.077949619	0.008327796	184.405002594
4.079977720	0.007963290	184.504999161
4.081980616	0.007636608	184.604999542
4.083900625	0.006991459	184.705003738
4.085858702	0.006436134	184.804996490
4.087874229	0.005961969	184.905000687
4.089978698	0.007208308	185.004997253
4.091936833	0.006981912	185.104999542
4.093907715	0.006381697	185.205005646
4.095904151	0.007546901	185.304998398
4.097875149	0.006852449	185.405002594
4.099903279	0.005451153	185.504999161
4.101995088	0.005734534	185.604999542
4.104029475	0.005870549	185.705003738
4.106000473	0.007081741	185.804996490



4.107958666	0.005709655	185.905000687
4.109929490	0.005686036	186.004997253
4.111887800	0.006411606	186.104999542
4.113845876	0.006669276	186.205005646
4.115905962	0.007947741	186.304998398
4.117914883	0.006201797	186.405002594
4.119873221	0.005642395	186.504999161
4.121869511	0.006015203	186.604999542
4.123891267	0.006391970	186.705003738
4.125875072	0.006795618	186.804996490
4.127858614	0.006716293	186.905000687
4.129880457	0.006464773	187.004997253
4.131864000	0.007822831	187.104999542
4.133873095	0.006849712	187.205005646
4.135920346	0.005675089	187.304998398
4.137967539	0.005988883	187.405002594
4.139906843	0.006511245	187.504999161
4.141858430	0.006425380	187.604999542
4.143880331	0.006343824	187.705003738
4.145914747	0.006151469	187.804996490
4.147917469	0.005965027	187.905000687
4.149907443	0.006687921	188.004997253
4.151916510	0.006257767	188.104999542
4.153874877	0.005355119	188.205005646
4.155833100	0.006008928	188.304998398
4.157880379	0.006070787	188.405002594
4.159946577	0.006282126	188.504999161
4.161987570	0.006310211	188.604999542
4.163951817	0.006128882	188.705003738
4.165929160	0.006400421	188.804996490
4.167919367	0.006294275	188.905000687
4.169922031	0.006695157	189.004997253
4.171994718	0.006851962	189.104999542
4.174003669	0.006794921	189.205005646
4.175955488	0.005926139	189.304998398
4.177945550	0.004692138	189.405002594
4.179948242	0.004850553	189.504999161
4.181925498	0.004074309	189.604999542
4.183960205	0.004174596	189.705003738
4.186045378	0.004545902	189.804996490
4.187978280	0.003974974	189.905000687
4.189860076	0.003526698	190.004997253
4.191843764	0.003463155	190.104999542
4.193865636	0.004010570	190.205005646
4.195855698	0.005260912	190.304998398
4.197870963	0.004464668	190.405002594
4.199892777	0.003259092	190.504999161
4.201914591	0.003786652	190.604999542
4.203949153	0.003771780	190.705003738
4.205996287	0.004584457	190.804996490
4.207929276	0.003746833	190.905000687
4.209849110	0.003145133	191.004997253
4.211845488	0.003938197	191.104999542
4.213867418	0.004605263	191.205005646
4.215851048	0.003726984	191.304998398
4.217872862	0.003435911	191.405002594
4.219939030	0.004211225	191.504999161
4.221929063	0.004075501	191.604999542
4.223810975	0.003452166	191.705003738
4.225769255	0.003690170	191.804996490
4.227848229	0.004062170	191.905000687



4.229914572	0.003623875	192.004997253
4.231917264	0.004183663	192.104999542
4.233894520	0.003215828	192.205005646
4.235884437	0.004057385	192.304998398
4.237849091	0.004296782	192.405002594
4.239896196	0.003720365	192.504999161
4.241969029	0.002765740	192.604999542
4.243978095	0.003193244	192.705003738
4.245948803	0.003275661	192.804996490
4.247913486	0.003789151	192.905000687
4.249865364	0.002430101	193.004997253
4.251893464	0.003598290	193.104999542
4.253959632	0.004139019	193.205005646
4.256019660	0.003475990	193.304998398
4.257977940	0.003461871	193.405002594
4.259910784	0.003648166	193.504999161
4.261932569	0.004163504	193.604999542
4.263928713	0.003894428	193.705003738
4.265899770	0.003808226	193.804996490
4.267915210	0.004435454	193.905000687
4.269968776	0.004028080	194.004997253
4.271965241	0.004386101	194.104999542
4.273910716	0.004435819	194.205005646
4.275919695	0.004892494	194.304998398
4.277941596	0.005032927	194.405002594
4.279899702	0.004520234	194.504999161
4.281883361	0.004014234	194.604999542
4.283924209	0.004312782	194.705003738
4.285939620	0.003995250	194.804996490
4.287986725	0.004338952	194.905000687
4.290046811	0.004202363	195.004997253
4.291953985	0.003959934	195.104999542
4.293861391	0.004941601	195.205005646
4.295838880	0.003802679	195.304998398
4.297879641	0.004385171	195.405002594
4.299863300	0.003872890	195.504999161
4.301821580	0.003203725	195.604999542
4.303862457	0.003607303	195.705003738
4.305839655	0.004513657	195.804996490
4.307848692	0.004405349	195.905000687
4.309883225	0.004282451	196.004997253
4.311911354	0.003235172	196.104999542
4.313926795	0.005312082	196.205005646
4.315897764	0.004639330	196.304998398
4.317893996	0.005314092	196.405002594
4.319909669	0.005554001	196.504999161
4.321899498	0.006376890	196.604999542
4.323965870	0.005407011	196.705003738
4.325994058	0.005055147	196.804996490
4.327945935	0.005598629	196.905000687
4.329897696	0.003744744	197.004997253
4.331881355	0.003711743	197.104999542
4.333852208	0.004075259	197.205005646
4.335835867	0.003608174	197.304998398
4.337883089	0.002969515	197.405002594
4.339911276	0.004810472	197.504999161
4.341901513	0.004909103	197.604999542
4.343916778	0.003601592	197.705003738
4.345970228	0.003056886	197.804996490
4.347928509	0.003454075	197.905000687
4.349924857	0.004286181	198.004997253



4.351952928	0.003246757	198.104999542
4.353981116	0.003143180	198.205005646
4.355977522	0.003203998	198.304998398
4.357973812	0.004664420	198.405002594
4.359963874	0.004518240	198.504999161
4.361902946	0.003360853	198.604999542
4.363861226	0.003501790	198.705003738
4.365908448	0.005014734	198.804996490
4.367923713	0.004678863	198.905000687
4.369913950	0.003202737	199.004997253
4.371891264	0.003411395	199.104999542
4.373868345	0.004382712	199.205005646
4.375858407	0.004570819	199.304998398
4.377835663	0.003481994	199.405002594
4.379895574	0.003604898	199.504999161
4.381917417	0.003766047	199.604999542
4.383901076	0.004850350	199.705003738
4.385948298	0.003415674	199.804996490
4.387944646	0.003082883	199.905000687
4.389890120	0.004584022	200.004997253
4.391892813	0.003987127	200.104999542
4.393971991	0.004512326	200.205005646
4.395955533	0.002521991	200.304998398
4.397888202	0.003160302	200.405002594
4.399878380	0.004091053	200.504999161
4.401931772	0.003173326	200.604999542
4.403902858	0.003980348	200.705003738
4.405835643	0.003778318	200.804996490
4.407844681	0.004061603	200.905000687
4.409879213	0.004273716	201.004997253
4.411951813	0.004735645	201.104999542
4.413986346	0.004252013	201.205005646
4.415976349	0.003747011	201.304998398
4.417940858	0.004452835	201.405002594
4.419924575	0.004045884	201.504999161
4.421997233	0.004109445	201.604999542
4.423993581	0.003529508	201.705003738
4.425951745	0.003595806	201.804996490
4.427992739	0.003904342	201.905000687
4.430008121	0.003415069	202.004997253
4.431921756	0.003812267	202.104999542
4.433873575	0.003718248	202.205005646
4.435927316	0.004030417	202.304998398
4.437980941	0.004267642	202.405002594
4.439939046	0.004080098	202.504999161
4.441897152	0.003451360	202.604999542
4.443893500	0.004180626	202.705003738
4.445877159	0.004190824	202.804996490
4.447905405	0.004355818	202.905000687
4.449997214	0.003522084	203.004997253
4.451974528	0.003629422	203.104999542
4.453989677	0.003103020	203.205005646
4.455973511	0.003498923	203.304998398
4.457957111	0.002732651	203.405002594
4.459946998	0.003242954	203.504999161
4.461924545	0.003099639	203.604999542
4.463946039	0.004068477	203.705003738
4.465891630	0.004356448	203.804996490
4.467856255	0.004155296	203.905000687
4.469897132	0.004429021	204.004997253
4.471893422	0.005384430	204.104999542



4.473851528	0.005605223	204.205005646
4.475860740	0.003705091	204.304998398
4.477907903	0.002365990	204.405002594
4.479929630	0.003847117	204.504999161
4.481900716	0.002969119	204.604999542
4.483928846	0.003165241	204.705003738
4.485918907	0.003981050	204.804996490
4.487902508	0.003621774	204.905000687
4.489898914	0.003235952	205.004997253
4.491939675	0.004275416	205.104999542
4.493967863	0.004888046	205.205005646
4.496002395	0.004238038	205.304998398
4.498037044	0.004504085	205.405002594
4.499963135	0.003350551	205.504999161
4.501877120	0.002688739	205.604999542
4.503873468	0.004257790	205.705003738
4.505984136	0.005063832	205.804996490
4.507955164	0.004010714	205.905000687
4.509926075	0.004618681	206.004997253
4.511966719	0.004416408	206.104999542
4.513931461	0.004770477	206.205005646
4.515934095	0.004343900	206.304998398
4.517962341	0.004266846	206.405002594
4.519996932	0.004013651	206.504999161
4.521967727	0.004381070	206.604999542
4.523913318	0.003552204	206.705003738
4.525896977	0.003565113	206.804996490
4.527874175	0.004269938	206.905000687
4.529851605	0.005250857	207.004997253
4.531924205	0.004934580	207.104999542
4.533971194	0.004516864	207.205005646
4.535935936	0.004401248	207.304998398
4.537900328	0.005168564	207.405002594
4.539909540	0.003903896	207.504999161
4.541905830	0.003768149	207.604999542
4.543889430	0.003468934	207.705003738
4.545885953	0.003768479	207.804996490
4.547888529	0.004244387	207.905000687
4.549853154	0.003833786	208.004997253
4.551887745	0.003904380	208.104999542
4.553960520	0.004054837	208.205005646
4.555912339	0.003663029	208.304998398
4.557864158	0.004006944	208.405002594
4.559866735	0.004160958	208.504999161
4.561856622	0.003972934	208.604999542
4.563878523	0.003530128	208.705003738
4.565874930	0.004430810	208.804996490
4.567922151	0.005332641	208.905000687
4.569893004	0.003441154	209.004997253
4.571832018	0.003389287	209.104999542
4.573834827	0.003060335	209.205005646
4.575882107	0.004575177	209.304998398
4.577929387	0.003530424	209.405002594
4.579951230	0.003665025	209.504999161
4.581934656	0.003683478	209.604999542
4.583892995	0.003944325	209.705003738
4.585876712	0.004240920	209.804996490
4.587955656	0.003287542	209.905000687
4.590009106	0.004152674	210.004997253
4.591967387	0.004980990	210.104999542
4.593951046	0.006061871	210.205005646



4.595947394	0.004615018	210.304998398
4.597880295	0.003773110	210.405002594
4.599908367	0.004221725	210.504999161
4.602000117	0.004685675	210.604999542
4.603977315	0.004601403	210.705003738
4.605903872	0.004549510	210.804996490
4.607843061	0.003853690	210.905000687
4.609871074	0.004391244	211.004997253
4.611867422	0.004543782	211.104999542
4.613838275	0.004022098	211.205005646
4.615866637	0.004374812	211.304998398
4.617881845	0.004068569	211.405002594
4.619884712	0.005366871	211.504999161
4.621925415	0.006487360	211.604999542
4.623921879	0.005003122	211.705003738
4.625905538	0.004209374	211.804996490
4.627882736	0.004569132	211.905000687
4.629898118	0.004214775	212.004997253
4.631920019	0.004181986	212.104999542
4.633929115	0.004363891	212.205005646
4.635982623	0.003814766	212.304998398
4.637998063	0.003898009	212.405002594
4.639873630	0.005028328	212.504999161
4.641787265	0.004607929	212.604999542
4.643809050	0.003912290	212.705003738
4.645881709	0.003191665	212.804996490
4.647871712	0.004630944	212.905000687
4.649861832	0.004998476	213.004997253
4.651883501	0.004057163	213.104999542
4.653854528	0.002680850	213.205005646
4.655882658	0.004216342	213.304998398
4.657974467	0.004176267	213.405002594
4.659958126	0.004349226	213.504999161
4.661954357	0.003970765	213.604999542
4.663931672	0.004379434	213.705003738
4.665921675	0.004512659	213.804996490
4.667937290	0.004989725	213.905000687
4.669978051	0.004224225	214.004997253
4.672044131	0.003268356	214.104999542
4.674034310	0.003712532	214.205005646
4.675948003	0.004629435	214.304998398
4.677912570	0.002993090	214.405002594
4.679896228	0.003509899	214.504999161
4.681841820	0.003175769	214.604999542
4.683857027	0.003936258	214.705003738
4.685897962	0.002853520	214.804996490
4.687926034	0.003136380	214.905000687
4.689890658	0.003505655	215.004997253
4.691918904	0.004405567	215.104999542
4.693934345	0.003283527	215.205005646
4.695886397	0.002456673	215.304998398
4.697850673	0.001206885	215.405002594
4.699891550	0.002964019	215.504999161
4.701907048	0.002541541	215.604999542
4.703954270	0.003592610	215.705003738
4.706014413	0.002906961	215.804996490
4.707965883	0.002116302	215.905000687
4.709867062	0.002988954	216.004997253
4.711837799	0.003027241	216.104999542
4.713872564	0.003867385	216.205005646
4.715881543	0.003082171	216.304998398



4.717865027	0.002633461	216.405002594
4.719867837	0.002138991	216.504999161
4.721870529	0.002662773	216.604999542
4.723866878	0.002042878	216.705003738
4.725901294	0.002393324	216.804996490
4.727961437	0.003074053	216.905000687
4.729970475	0.003179731	217.004997253
4.731922236	0.003055899	217.104999542
4.733886919	0.001916305	217.205005646
4.735883267	0.002584012	217.304998398
4.737854237	0.003143454	217.405002594
4.739920434	0.003631769	217.504999161
4.741999554	0.002756433	217.604999542
4.743957776	0.002901281	217.705003738
4.745915765	0.002948599	217.804996490
4.747924977	0.003020460	217.905000687
4.749934073	0.003113103	218.004997253
4.751917615	0.002228314	218.104999542
4.753913963	0.002990855	218.205005646
4.755923175	0.003766159	218.304998398
4.757919465	0.003692280	218.405002594
4.759941192	0.002844626	218.504999161
4.762014025	0.003119340	218.604999542
4.763991223	0.003677724	218.705003738
4.765955848	0.003445780	218.804996490
4.767971230	0.002694045	218.905000687
4.769986495	0.004222061	219.004997253
4.771957407	0.004671900	219.104999542
4.773928435	0.003924155	219.205005646
4.775931186	0.003627345	219.304998398
4.777908558	0.003476782	219.405002594
4.779873125	0.004181277	219.504999161
4.781913827	0.004788681	219.604999542
4.783961223	0.003718867	219.705003738
4.785982892	0.003469703	219.804996490
4.787953803	0.003343404	219.905000687
4.789924831	0.004994146	220.004997253
4.791908432	0.004088636	220.104999542
4.793866654	0.004230986	220.205005646
4.795888439	0.003885088	220.304998398
4.797948408	0.004756884	220.405002594
4.799906455	0.003773986	220.504999161
4.801890114	0.003849597	220.604999542
4.803924763	0.004124205	220.705003738
4.805870354	0.003918993	220.804996490
4.807866528	0.004139545	220.905000687
4.809926497	0.004965346	221.004997253
4.811948282	0.005324415	221.104999542
4.813906387	0.005462389	221.205005646
4.815864784	0.005020179	221.304998398
4.817899200	0.003732953	221.405002594
4.819914815	0.004392821	221.504999161
4.821853712	0.004968710	221.604999542
4.823888303	0.002536824	221.705003738
4.825935699	0.002766206	221.804996490
4.827963479	0.003482357	221.905000687
4.829966230	0.003791491	222.004997253
4.831962753	0.003814798	222.104999542
4.833908402	0.002756015	222.205005646
4.835891945	0.004055206	222.304998398
4.837875604	0.004451398	222.405002594



4.839922767	0.004848003	222.504999161
4.841919173	0.003557585	222.604999542
4.843966279	0.003084318	222.705003738
4.846013617	0.003647869	222.804996490
4.847927252	0.002850021	222.905000687
4.849879188	0.003259384	223.004997253
4.851926409	0.004001748	223.104999542
4.854011699	0.004237272	223.205005646
4.855982610	0.004270319	223.304998398
4.857940832	0.004211645	223.405002594
4.859930719	0.004163115	223.504999161
4.861869849	0.004023148	223.604999542
4.863891809	0.003383932	223.705003738
4.865938798	0.004100261	223.804996490
4.867948184	0.004368540	223.905000687
4.869969795	0.003186842	224.004997253
4.871953570	0.003181850	224.104999542
4.873911734	0.003488015	224.205005646
4.875907965	0.004415871	224.304998398
4.877878935	0.003368298	224.405002594
4.879907123	0.003431796	224.504999161
4.881897010	0.003890800	224.604999542
4.883836431	0.003512180	224.705003738
4.885838949	0.004162782	224.804996490
4.887892515	0.002250543	224.905000687
4.889857140	0.003197623	225.004997253
4.891853605	0.004154727	225.104999542
4.893862526	0.003452797	225.205005646
4.895935301	0.002938516	225.304998398
4.897906096	0.002763176	225.405002594
4.899921478	0.003478047	225.504999161
4.901962471	0.003305641	225.604999542
4.903914174	0.002533922	225.705003738
4.905878799	0.003280620	225.804996490
4.907900700	0.002872846	225.905000687
4.907972645	0.002601193	232.403335571
4.909998737	0.003376986	232.503334045
4.911940234	0.002874620	232.603332520
4.913864347	0.001959832	232.703336080
4.915839527	0.003011531	232.803329468
4.917780713	0.003030739	232.903333028
4.919705136	0.002706379	233.003331502
4.921756530	0.002576643	233.103332520
4.923841916	0.002242456	233.203338623
4.925749265	0.002700677	233.303332011
4.927639539	0.002979367	233.403335571
4.929665554	0.002098027	233.503334045
4.931742636	0.003035480	233.603332520
4.933751576	0.002520334	233.703336080
4.935777591	0.003576895	233.803329468
4.937769690	0.002379282	233.903333028
4.939710877	0.002118728	234.003331502
4.941720127	0.001724897	234.103332520
4.943881805	0.003174728	234.203338623
5.076383124	0.004233050	234.310001373



VALIDACIÓN DE INSTRUMENTOS

VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO - JUICIO DE EXPERTO

Tesis: ANÁLISIS NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE LA INTERFAZ FIBRA DE ICHU Y MATRIZ CEMENTICIA POR ARRANCAMIENTO (PULL-OUT)”

Responsable: ADAN RENZO AGUILAR HILARI

Instrucción: Luego de analizar y cotejar el instrumento de investigación “FORMATO A” instrumento para la recolección de datos de la prueba de arrancamiento (pull-out) de la tesis: ANÁLISIS NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE LA INTERFAZ FIBRA DE ICHU Y MATRIZ CEMENTICIA POR ARRANCAMIENTO (PULL-OUT)”, se solicita que, en base a su criterio y experiencia profesional, valide dicho instrumento para su aplicación.

Nota: Para cada criterio considere la escala de 1 a 5, donde:

1: Muy poco	2: Poco	3: Regular	4: Aceptable	5: Muy aceptable
-------------	---------	------------	--------------	------------------

Criterio de Validez	Puntaje					Observación y/o sugerencia
	1	2	3	4	5	
Validez de contenido					x	-----
Validez de criterio metodológico					x	-----
Validez de objetividad de medición y observación					x	-----
Presentación y formalidad del instrumento					x	-----
Parcial					20	
TOTAL	20					

Puntuación:


De 04 a 11: No valida, Reformular

De 12 a 14: No valida, Modificar

De 15 a 17: Valido, Mejorar

De 18 a 20: Valido, Aplicar

x

Apellidos y Nombres:	Samuel Charca Mamani	 Firma
Grado Académico:	PhD	
Mención:	Ingeniería Civil	
		DNI:



VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO - JUICIO DE EXPERTO

Tesis: ANÁLISIS NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE LA INTERFAZ FIBRA DE ICHU Y MATRIZ CEMENTICIA POR ARRANCAMIENTO (PULL-OUT)”

Responsable: ADAN RENZO AGUILAR HILARI

Instrucción: Luego de analizar y cotejar el instrumento de investigación “FORMATO A” instrumento para la recolección de datos de la prueba de arrancamiento (pull-out) de la tesis: ANÁLISIS NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE LA INTERFAZ FIBRA DE ICHU Y MATRIZ CEMENTICIA POR ARRANCAMIENTO (PULL-OUT)”, se solicita que, en base a su criterio y experiencia profesional, valide dicho instrumento para su aplicación.

Nota: Para cada criterio considere la escala de 1 a 5, donde:

1: Muy poco	2: Poco	3: Regular	4: Aceptable	5: Muy aceptable
-------------	---------	------------	--------------	------------------

Criterio de Validez	Puntaje					Observación y/o sugerencia
	1	2	3	4	5	
Validez de contenido					x	Ninguna
Validez de criterio metodológico				x		Se sugiere optimizar el molde para las probetas con la finalidad de que estas sean arrancadas con la menor manipulación posible
Validez de objetividad de medición y observación					x	Ninguna
Presentación y formalidad del instrumento					x	Ninguna
Parcial				4	15	
TOTAL	19					

Puntuación:

De 04 a 11: No valida, Reformular

De 12 a 14: No valida, Modificar

De 15 a 17: Valido, Mejorar

De 18 a 20: Valido, Aplicar

x

Apellidos y Nombres:	Flores Barreda Carmen Elena	 Firma DNI: 07933106
Grado Académico:	Magister	
Mención:	Química	



ANEXOS

MATRIZ DE CONSISTENCIA					
TÍTULO: ANÁLISIS NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE LA INTERFAZ FIBRA DE <i>ICHU</i> Y MATRIZ CEMENTICIA POR ARRANCAMIENTO (<i>PULL-OUT</i>)					
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	INSTRUMENTOS
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Independientes		
¿Cuáles son las características del tipo de curva carga - desplazamiento, del modo de falla, y la magnitud del esfuerzo de corte interfacial y de la longitud crítica de la fibra en la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia mediante análisis numérico y experimental por arrancamiento (<i>pull-out</i>)?	Determinar las características del tipo de curva carga - desplazamiento, del modo de falla, y la magnitud del esfuerzo de corte interfacial y de la longitud crítica de la fibra en la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia mediante análisis numérico y experimental por arrancamiento (<i>pull-out</i>).	Las características del tipo de curva carga – desplazamiento y del modo de falla en la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia obtenidos mediante el análisis numérico y experimental por arrancamiento (<i>pull-out</i>) son: Curva del tipo <i>softening</i> y modo de falla por <i>debonding</i> , la magnitud del esfuerzo de corte interfacial y de la longitud crítica de la fibra son: 0.09 MPa y 100 mm., respectivamente.	<ul style="list-style-type: none"> Interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia 	<ul style="list-style-type: none"> Magnitud de la longitud de fibra (mm.) 	<ul style="list-style-type: none"> Ficha de observación
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Sub Hipótesis	Dependientes		
<p>PE-1: ¿Cuál es la magnitud máxima del esfuerzo de de corte interfacial generado por el arrancamiento (<i>pull-out</i>) en la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia?</p> <p>PE-2: ¿Cuál es el tipo de curva carga – desplazamiento generado por el arrancamiento (<i>pull-out</i>) en la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia?</p> <p>PE-3: ¿Cuál es el principal modo de falla generado por el arrancamiento (<i>pull-out</i>) en la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia?</p> <p>PE-4: ¿Cuál es la longitud crítica de la fibra resistente a arrancamiento (<i>pull-out</i>) en la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia?</p>	<p>OE-1: Determinar la magnitud máxima del esfuerzo de corte interfacial generado por el arrancamiento (<i>pull-out</i>) en la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia.</p> <p>OE-2: Determinar el tipo de curva carga – desplazamiento generado por el arrancamiento (<i>pull-out</i>) en la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia.</p> <p>OE-3: Determinar el principal modo de falla generado por el arrancamiento (<i>pull-out</i>) en la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia.</p> <p>OE-4: Determinar la longitud crítica de la fibra resistente a arrancamiento (<i>pull-out</i>) en la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia.</p>	<p>SH-1: La magnitud máxima del esfuerzo de corte interfacial generados por el arrancamiento (<i>pull-out</i>) en la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia son mayores que 0.09 MPa.</p> <p>SH-2: El tipo de curva carga – desplazamiento generado por el arrancamiento (<i>pull-out</i>) en la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia es del tipo <i>softening</i> (ablandamiento).</p> <p>SH-3: El principal modo de falla generado por el arrancamiento (<i>pull-out</i>) en la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia es desunión entre las fases (<i>debonding</i>).</p> <p>SH-4: La longitud crítica de la fibra resistente a arrancamiento (<i>pull-out</i>) en la interfaz fibra de <i>Ichu</i> y matriz cementicia es de 100 mm.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Arrancamiento (<i>pull-out</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> Esfuerzos interfaciales (MPa.) Tipo de respuesta Modo de falla Longitud crítica de la fibra (mm.) 	<ul style="list-style-type: none"> Ficha de observación