

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y
CIVIL**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

**Implementación de un sistema de medición para ensayos
experimentales en estructuras mediante fotogrametría y
algoritmos de correlación digital de imágenes**

Para optar el título profesional de:

INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

Bach. Yuri Abraham PANIAGUA SEGOVIA

ASESOR:

Msc. Ing. Cristian CASTRO PÉREZ

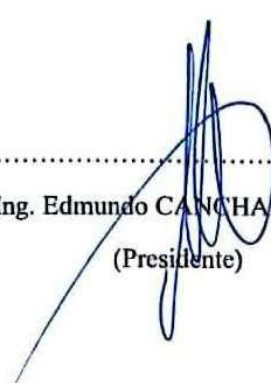
AYACUCHO - PERÚ

2019

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN PARA ENSAYOS
EXPERIMENTALES EN ESTRUCTURAS MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA Y
ALGORITMOS DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

APROBACIÓN DE LA BORRADORA DE TESIS: 12 DE DICIEMBRE DE 2019

APROBACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE TESIS: 19 DE DICIEMBRE DE 2019



.....
M.Sc. Ing. Edmundo CANCHARI GUTIÉRREZ
(Presidente)



.....
M.Sc. Ing. Adolfo LINARES FLORES
(Miembro)



.....
M.Sc. Ing. Cristian CASTRO PÉREZ
(Miembro)



.....
Arq. Juan C. SÁNCHEZ PAREDES
(Secretario Docente)



.....
Dr. Effaín E. PORRAS FLORES
(DECANO)

Según el acuerdo constatado en el acta levantada el 19 de diciembre de 2019, en la sustentación de tesis profesional, presentado por el Bachiller en Ciencias de la Ingeniería Civil Bach. YURI ABRAHAM PANIAGUA SEGOVIA, con el Trabajo de Investigación Experimental Titulado: **"IMPLEMENTACIACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN PARA ENSAYOS EXPERIMENTALES EN ESTRUCTURAS MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA Y ALGORITMOS DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES"**, fue calificado con la nota de DIECISEIS (16) por lo que se da la respectiva: **APROBACIÓN**.



.....
M.Sc. Ing. Edmundo CANCHARI GUTIÉRREZ
(Presidente)



.....
M.Sc. Ing. Adolfo LINARES FLORES
(Miembro)



.....
M.Sc. Ing. Cristian CASTRO PÉREZ
(Miembro)



.....
Arq. Juan C. SÁNCHEZ PAREDES
(Secretario Docente)



.....
Dr. Efraín E. PORRAS FLORES
(DECANO)

Resumen

En esta investigación, se ha propuesto una técnica de medición sin contacto llamada correlación digital de imágenes (DIC), es confiable para medir deformaciones en materiales durante ensayos experimentales de laboratorio y además obtener el coeficiente de Poisson en diversos materiales. DIC es un método óptico que emplea técnicas de seguimiento, rastreo de píxeles en base a registros fotográficos o imágenes digitales para mediciones precisas. Este método se usa para medir el desplazamiento de campo completo además de las deformaciones, y se aplica ampliamente en muchas áreas de la ciencia y la ingeniería. Se realizaron experimentos de tracción y compresión uniaxial en probetas de acero A36 y en ladrillos artesanales, la medición de deformación se realizó a través de un algoritmo de correlación digital de imágenes. Estos experimentos se desarrollaron en el laboratorio de Tecnología del Concreto de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga y en el Laboratorio de Materiales de la Universidad Nacional de Ingeniería. El objetivo de esta investigación fue evaluar la precisión de la técnica DIC y para tal fin se ha determinado el coeficiente de Poisson en muestras de Acero A36 y unidades de albañilería, para comparar así valores experimentales y técnicos del coeficiente de Poisson, validando así la técnica alternativa de medición sin contacto llamada correlación digital de imágenes DIC.

Palabras clave : Constantes elásticas, deformación, correlación digital de imágenes.

Abstract

In this investigation, a contactless measurement technique called digital image correlation (DIC) has been proposed, it is reliable to measure deformations in materials during experimental laboratory tests and also obtain the Poisson coefficient in various materials. DIC is an optical method that uses tracking techniques, pixel tracking based on photographic records or digital images for precise measurements. This method is used to measure full-field displacement in addition to deformations, and is widely applied in many areas of science and engineering. Traction and uniaxial compression experiments were performed on A36 steel specimens and on handmade bricks, the deformation measurement was performed through a digital image correlation algorithm. These experiments were carried out in the Concrete Technology laboratory of the National University San Cristóbal de Huamanga and in the Materials Laboratory of the National Engineering University. The aim of this investigation was to evaluate the accuracy of the DIC technique and for this purpose the Poisson coefficient has been determined in samples of A36 Steel and masonry units, to compare experimental and technical values of the Poisson coefficient, thus validating the technique Contactless measurement alternative called digital correlation of DIC images.

keywords : Elastic constants, deformation, digital image correlation.

Introducción

En la presente investigación, se va a desarrollar la técnica de Correlación Digital de Imágenes (DIC por sus siglas en inglés) para el cálculo de deformaciones en materiales bajo esfuerzos de compresión y tracción. DIC es una técnica óptica que permite la medición no invasiva de deformaciones en la superficie de una muestra analizando imágenes digitales capturadas mediante una cámara durante el ensayo mecánico. El método DIC es una técnica basada en el procesamiento de imágenes digitales, para analizar la deformación de píxeles en correlación con las deformaciones reales.

El procedimiento usado para obtener los resultados se basó en tres etapas como son la preparación de la muestra, montaje del experimento y finalmente el post-procesamiento de imágenes. El conocimiento de las constantes elásticas (como la relación de Poisson, el módulo de Young) de los materiales es indispensable para el diseño de la estructura y el control de calidad. Por lo tanto, su determinación es de suma importancia para todas las aplicaciones de ingeniería. Por lo tanto se busca evaluar la precisión de las constantes elásticas obtenidas con la técnica de correlación digital de imágenes DIC, respecto a los valores técnicos de comportamiento elástico de los materiales.

El propósito de esta tesis es proporcionar un sistema alternativo de medición de deformaciones en materiales durante los ensayos mecánicos de compresión y tracción uniaxial, además de suplir la falta de dispositivos electrónicos de medición de deformaciones llamados extensómetros para los laboratorios de ensayos de materiales en la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga y diversos laboratorios que presenten esta falta de dispositivos electrónicos de medición.

Dedico esta Tesis a mis padres Abraham y Juana, quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional en todo momento de mi vida, por sus enseñanzas, consejos y por su eterna paciencia. A mis hermanos María , José, Jesús , Oscar y Juan, por sus consejos y alientos para seguir adelante en este proyecto trazado.

Agradecimientos

Al Msc. Ing. Cristian Castro Pérez, asesor de la presente tesis, por sus sugerencias, recomendaciones, apreciaciones y por brindarme la información necesaria para la formulación del presente trabajo de investigación.

A mis jurados el Msc. Ing. Edmundo Canchari Gutierrez y Msc. Ing. Adolfo Linares Flores, por todo el apoyo y consejos brindados durante la revisión de este trabajo.

Al Msc. Ing. Mitchell Huacre Vila, por su apoyo en la autorización de los ensayos de compresión de materiales en la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Al Ing. Victor Portal Quicaña, por su apoyo en la realización de los ensayos de compresión de materiales en el laboratorio de materiales INGEOTECN en la Ciudad de Ayacucho.

Agradezco también al Tec. Angel Sherman Ascho Guzmán por su apoyo y disponibilidad para la obtención de materiales necesarios para los ensayos de tracción en el laboratorio de ensayo de materiales LEM-UNI.

Finalmente, a mis amigos y compañeros de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga y todas las personas que contribuyeron en el desarrollo de este trabajo.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

AYACUCHO, DICIEMBRE DE 2019

Bach. Yuri Abraham Paniagua Segovia

Índice General

Resumen	ii
Introducción	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Índice General	vii
Índice de Figuras	x
Índice de Tablas	xv
Glosarios	xvii
Lista de Acrónimos	xix
Símbolos	xx

Capítulo I

Planteamiento del Problema	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Delimitación del problema	2
1.2.1. Temporal	3
1.2.2. Temática y unidad de análisis	3
1.3. Formulación del problema	3
1.3.1. Problema general	3
1.3.2. Problemas específicos	3
1.4. Justificación e importancia	4
1.5. Importancia de la investigación	4
1.6. Limitaciones de la investigación	5
1.7. Objetivo general	5
1.7.1. Objetivos específicos	5

Capítulo II

Estado del arte	6
2.1. Antecedentes	6
2.1.1. Investigaciones internacionales	7
2.2. Bases teóricas	10
2.2.1. Correlación digital de imágenes DIC	10
2.2.2. Configuración de la técnica DIC	11
2.3. Marco conceptual	13
2.3.1. Ensayo de tracción	13
2.3.2. Ensayo de compresión	17

2.3.3. Valores técnicos del coeficiente de Poisson	18
2.3.4. Imagen digital	20
2.3.5. Subconjuntos y parámetros de deformación	21
2.3.6. Optimización de los parámetros de deformación.	24
2.3.7. Posicionamiento y rastreo de píxeles.	26
Capítulo III	
Metodología de la Investigación	31
3.1. Enfoque	31
3.2. Nivel de investigación	31
3.3. Diseño de investigación.	31
3.4. Población y muestra	31
3.4.1. Muestra del estudio	32
3.5. Hipótesis	32
3.5.1. Hipótesis general	32
3.5.2. Hipótesis específicas	32
3.6. Operacionalización de variables	33
3.7. Técnicas e instrumentos	34
3.7.1. Técnicas de Investigación	34
3.7.2. Instrumentos Utilizados	34
3.8. Desarrollo del trabajo de tesis	36
3.8.1. Introducción	37
3.8.2. Muestras	38
3.8.3. Montaje experimental	42
3.8.4. Protocolo experimental de la técnica de correlación digital de imágenes	45
3.8.5. Ensayos de tracción uniaxial	46
3.8.6. Ensayos de compresión uniaxial	48
3.8.7. Proceso computacional mediante correlación digital de imágenes	53
3.8.8. Optimización de parámetros en el proceso computacional DIC	55
3.8.9. Metodología de validación en ensayos a tracción uniaxial	58
3.8.10. Metodología de validación en ensayos a compresión uniaxial	77
3.8.11. Medición de deformaciones y desplazamientos en una pila de albañilería mediante la técnica DIC	91
3.8.12. Obtención de los desplazamientos en ensayos de tracción	94

Capítulo IV

Resultados.....	98
4.1. Contrastación de la hipótesis.....	98
4.1.1. Hipótesis estadísticas.....	98
4.1.2. Ensayos de tracción.....	99
4.1.2.1. Coeficiente de Poisson.....	99
4.1.3. Ensayos de compresión.....	102
4.1.3.1. Coeficiente de Poisson.....	102
4.2. Análisis e interpretación.....	106
4.2.1. Validación de la precisión de la técnica DIC.....	106
4.2.2. Precisión en ensayos de tracción axial.....	107
4.2.3. Precisión en ensayos de compresión axial.....	109
Conclusiones.....	110
Conclusiones.....	110
Recomendaciones.....	111
Trabajos futuros.....	111
Referencias bibliográficas.....	112
Correlación Digital de Imágenes.....	112
 Anexo A	
Certificados de calibración.....	114
 Anexo B	
Informes de laboratorio.....	118
 Anexo C	
Instrucciones para el empleo del software “Ncorr”.....	119
 Anexo D	
Datos Maquina Universal ”Zwick/Roell SP-1000”.....	126
 Anexo E	
Matrices los mapas de deformación ”STRAIN MAPS” P-01, P-02, P-03.....	132

Índice de Figuras

Figura 1	(a) Laboratorio de tecnología del concreto - UNSCH, (b) Laboratorio de ensayo de materiales-INGEOTECON y (c) Laboratorio de ensayo de materiales LEM-UNI	2
Figura 2	(a) Ubicación geográfica de los ensayos de compresión, (b) Ubicación geográfica de los ensayos de tracción.	2
Figura 3	Aplicación del patrón de moteado.	8
Figura 4	Configuración de la técnica DIC.	8
Figura 5	Desplazamientos verticales.	9
Figura 6	Comparación experimental de la medición DIC y LDVT en diferentes posiciones.	9
Figura 7	Imágenes experimentales reales de una muestra de goma sometida a flexión de tres puntos: (a) imagen de referencia y (b) imagen deformada.	10
Figura 8	Cálculo de la muestra de caucho utilizando el método DIC basado en el algoritmo IC-GN propuesto con un subconjunto de 41×41 píxeles: (a) campo de desplazamiento U, (b) campo de desplazamiento V y (c) distribuciones de coeficientes ZNCC	10
Figura 9	Fotografía esquemática del ensayo de la técnica DIC.	11
Figura 10	Sistema típico de adquisición de imágenes ópticas para el método DIC 2D.	12
Figura 11	Imagen típica en el sistema DIC (a): no deformado, (b): deformado	12
Figura 12	Diagrama de flujo simple que representa el proceso DIC.	13
Figura 13	Probeta para ensayo de tracción.	13
Figura 14	Máquina para ensayo de tracción.	14
Figura 15	Diagrama esfuerzo-deformación de materiales dúctiles en tensión (fuera de escala).	15
Figura 16	Deformaciones permanentes en un material.	16
Figura 17	Ensayo de compresión en una probeta cilíndrica.	17
Figura 18	Valores del coeficiente de Poisson para diferentes materiales.	18
Figura 19	Valores del coeficiente de Poisson para diferentes materiales.	19
Figura 20	Base de datos del Acero A36.	19
Figura 21	Ejemplo de valores de intensidad y la imagen digital correspondiente.	20
Figura 22	(a) Imagen de referencia y subconjunto (b) Imagen deformada y subconjunto coincidente.	21

Figura 23	Ejemplo ampliado de un subconjunto de 7x7 en la imagen de referencia.	22
Figura 24	Mapeo de píxeles del subconjunto de referencia en un subconjunto deformado	23
Figura 25	Parámetros de análisis software DIC.	26
Figura 26	Seguimiento del desplazamiento de un subconjunto de píxeles, definidos en la imagen original en el tiempo t_0 y rastreados en la imagen sometida a deformación en el tiempo t_2	27
Figura 27	Esquema de deformación teórica de un cuerpo sometido a fuerzas externas. .	27
Figura 28	Diseño de investigación.	33
Figura 29	Cámara digital Canon EOS Rebel T6i de 18MP.	35
Figura 30	Software de correlación digital de imágenes - NCorr.	35
Figura 31	Desarrollo del trabajo de tesis.	36
Figura 32	Maquina universal "Zwick/Roell SP-1000" - Universidad Nacional de Ingeniería.	37
Figura 33	Prensa Hidráulica "Tokyokoki Seizosho " para los ensayos de compresión. .	38
Figura 34	Probeta empleada según las normas (ASTM A370).	38
Figura 35	Probeta con el patrón estocástico.	38
Figura 36	Unidad de ladrillo KingKong Tipo IV con el patrón de moteado.	39
Figura 37	Ladrillos industriales Tipo IV con el patrón de moteado.	40
Figura 38	Patrón de moteado o "speckle".	41
Figura 39	Técnica de aplicación del patrón de manchas con cepillo.	42
Figura 40	Muestras de albañilería finales para los ensayos de compresión.	42
Figura 41	Esquema del montaje para un ensayo de tracción.	43
Figura 42	Montaje experimental para el ensayo de compresión - MAQUINA DE ENSAYOS UNIVERSAL: "PINZUAR PC42D INGEOTECON".	43
Figura 43	Montaje experimental para el ensayo de compresión - MAQUINA DE ENSAYOS UNIVERSAL: "TECNOTEST MODENA LS200-UNSCH".	44
Figura 44	Montaje experimental para el ensayo de tracción - MAQUINA DE ENSAYOS UNIVERSAL: "Zwick/Roell SP1000 - UNI".	44
Figura 45	MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSAL: "Zwick/Roell SP1000 -UNI". . .	46
Figura 46	Probeta seleccionada para la investigación (ASTM A370).	47
Figura 47	Probeta de acero sujeta a la maquina de ensayos.	47
Figura 48	Software testXpertII de la maquina universal Zwick/Roell SP-1000.	48
Figura 49	Muestras de albañilería para los ensayos de compresión.	49
Figura 50	Toma de medidas de las unidades de albañilería.	49
Figura 51	Registro dimensional de las unidades de albañilería.	50
Figura 52	Prensa hidráulica "PINZUAR LTDA" modelo PC42D.	50
Figura 53	La ubicación de la cámara - ensayo de compresión axial.	51
Figura 54	Distribución uniforme de la carga aplicada mediante placas rígidas.	51

Figura 55	Pila de albañilería para el monitoreo de desplazamientos horizontales y verticales.	52
Figura 56	Pila de albañilería P-02.....	52
Figura 57	Software DIC.	53
Figura 58	Software Ncorr.	53
Figura 59	Importación de imágenes en el software Ncorr.....	54
Figura 60	Patrones estocásticos con diferente densidad	55
Figura 61	Irregularidad del patrón estocástico.	56
Figura 62	Division en el proceso computacional.	57
Figura 63	CPU vs GPU.....	58
Figura 64	Gráfica Esfuerzo-Deformación Probeta P-01.....	59
Figura 65	Gráfica Esfuerzo-Deformación Probeta P-02.....	59
Figura 66	Gráfica Esfuerzo-Deformación Probeta P-03.....	60
Figura 67	Mapas de deformación longitudinal de la probeta P-02.....	61
Figura 68	Mapas de deformación longitudinal de la probeta P-02.....	62
Figura 69	Mapas de deformación transversal de la probeta P-02.....	63
Figura 70	Mapas de deformación transversal de la probeta P-02.....	64
Figura 71	Análisis de deformación en 3 puntos de la probeta P-02.	65
Figura 72	Análisis de deformación en 3 puntos de la probeta P-03.	65
Figura 73	Mapa de deformación en el límite elástico P-01.....	66
Figura 74	Mapa de deformación en el límite elástico P-02.....	67
Figura 75	Mapa de deformación en el límite elástico P-03.....	68
Figura 76	Obtención del módulo de Poisson experimental.....	69
Figura 77	Deformaciones axiales P-01	70
Figura 78	Mapa de deformaciones - Probeta P-01.	70
Figura 79	Deformaciones laterales y axiales para la probeta P-01 obtenido por la técnica DIC.....	71
Figura 80	Deformaciones axiales P-02	72
Figura 81	Mapa de deformaciones - Probeta P-02.	72
Figura 82	Deformaciones laterales y axiales para la probeta P-02 obtenido por la técnica DIC.....	73
Figura 83	Deformaciones axiales P-03	74
Figura 84	Mapa de deformaciones - Probeta P-03.	74
Figura 85	Deformaciones laterales y axiales para la probeta P-03 obtenido por la técnica DIC.....	75
Figura 86	Reporte del ensayo de tracción.	76
Figura 87	Obtención del módulo de Poisson experimental.....	77
Figura 88	Mapa de deformación - Ladrillo A-01.	78
Figura 89	Deformación longitudinal final - Ladrillo A-01.....	78

Figura 90	Deformaciones laterales y axiales para el ladrillo A-01 obtenido por la técnica DIC.....	79
Figura 91	Deformaciones laterales y axiales para el ladrillo A-01 obtenido por la técnica DIC.....	80
Figura 92	Mapa de deformación - Ladrillo A-02.	81
Figura 93	Deformación longitudinal final - Ladrillo A-02.	81
Figura 94	Mapa de deformaciones longitudinales - Ladrillo A-02.....	82
Figura 95	Mapa de deformaciones transversales - Ladrillo A-02.....	83
Figura 96	Deformaciones laterales y axiales para el ladrillo A-02 obtenido por la técnica DIC.....	84
Figura 97	Mapa de deformaciones - Ladrillo A-03..	85
Figura 98	Deformación longitudinal final - Ladrillo A-03.	85
Figura 99	Mapa de deformaciones longitudinales - Ladrillo A-03.....	86
Figura 100	Mapa de deformaciones transversales - Ladrillo A-03.....	87
Figura 101	Deformaciones laterales y axiales para el ladrillo A-03 obtenido por la técnica DIC.....	88
Figura 102	Reporte del ensayo de compresión - deformaciones horizontales.	89
Figura 103	Reporte del ensayo de compresión - deformaciones verticales.	90
Figura 104	Mapa de deformaciones verticales antes de la falla.	91
Figura 105	Mapa de desplazamientos verticales instante antes de la falla.	92
Figura 106	Mapa de desplazamientos verticales posterior a la falla.....	92
Figura 107	Gráfica de la evolución de los desplazamientos verticales.	93
Figura 108	Gráfica de la evolución de las deformaciones verticales.	93
Figura 109	Medición de la longitud final de la probeta.	94
Figura 110	Comparación de desplazamientos.....	95
Figura 111	Mapa de desplazamiento global: Probeta P-01.....	95
Figura 112	Mapa de desplazamiento global: Probeta P-02.....	96
Figura 113	Mapa de desplazamiento global: Probeta P-03.....	96
Figura 114	Gráfica de probabilidad P-01.	99
Figura 115	Prueba de hipótesis P-01.....	100
Figura 116	Gráfica de probabilidad P-02.	100
Figura 117	Prueba de hipótesis P-02.....	101
Figura 118	Gráfica de probabilidad P-03.	101
Figura 119	Prueba de hipótesis P-03.....	102
Figura 120	Gráfica de probabilidad A-01.	102
Figura 121	Prueba de hipótesis A-01.	103
Figura 122	Gráfica de probabilidad A-02.	103
Figura 123	Histograma A-02..	104

Figura 124	Gráfica de probabilidad A-03.	104
Figura 125	Histograma A-03..	105
Figura 126	Coeficiente de Poisson -DIC.....	106
Figura 127	Coeficiente de Poisson - TÉCNICOS.....	106
Figura 128	Resultados módulos de elasticidad experimentales.	107
Figura 129	Resultados del coeficiente de Poisson experimental.....	108
Figura 130	Resultados del coeficiente de Poisson experimental.....	109

Índice de Tablas

Tabla 1	Estudios históricos de la correlación digital de imágenes	7
Tabla 2	Operacionalización de las variables	34
Tabla 3	Especificaciones de la probeta para el ensayo de tracción uniaxial (ASTM A370). 39	
Tabla 4	Datos del ladrillo industrial Tipo IV.	40
Tabla 5	Configuración de la cámara digital.	45
Tabla 6	Datos iniciales de las probetas.	48
Tabla 7	Tiempo de Procesamiento.	54
Tabla 8	Indicador de tamaño de bloque.	55
Tabla 9	Relación tamaño de bloque - Pérdida de información.	56
Tabla 10	Indicador iluminación.	56
Tabla 11	Irregularidad del patrón estocástico.	57
Tabla 12	Cantidad de núcleos.	57
Tabla 13	Propiedades mecánicas P-01.	59
Tabla 14	Propiedades mecánicas P-02.	60
Tabla 15	Propiedades mecánicas P-03.	60
Tabla 16	Datos para el cálculo del límite elástico - Probeta 01.	66
Tabla 17	Datos para el cálculo del límite elástico - Probeta 02	67
Tabla 18	Datos para el cálculo del límite elástico - Probeta 02	68
Tabla 19	Promedios para cada mapa de deformación longitudinal y transversal.	71
Tabla 20	Comparación de la relación de Poisson especificada en valores técnicos y las determinadas experimentalmente por la técnica DIC.	71
Tabla 21	Promedios para cada mapa de deformación longitudinal y transversal.	73
Tabla 22	Comparación de la relación de Poisson especificada en valores técnicos y las determinadas experimentalmente por la técnica DIC.	73
Tabla 23	Promedios para cada mapa de deformación longitudinal y transversal.	75
Tabla 24	Comparación de la relación de Poisson especificada en valores técnicos y las determinadas experimentalmente por la técnica DIC.	75
Tabla 25	Valores de deformaciones transversales y longitudinales calculados por la técnica DIC en el ladrillo A-01.	80
Tabla 26	Módulo de Poisson - Ladrillo A-01	80
Tabla 27	Valores de deformaciones transversales y longitudinales calculados por la técnica DIC en el ladrillo A-02	84

Tabla 28	Módulo de Poisson - Ladrillo A-02	84
Tabla 29	Valores de deformaciones transversales y longitudinales calculados por la tecnica DIC en el ladrillo A-03	88
Tabla 30	Módulo de Poisson - Ladrillo A-03	88
Tabla 31	Mediciones de las probetas en laboratorio.	94
Tabla 32	Comparación de desplazamientos.. . . .	97
Tabla 33	Módulos de elasticidad o Young obtenidos experimentalmente.. . . .	107
Tabla 34	Coeficientes de Poisson obtenidos experimentalmente.	108
Tabla 35	Coeficientes de Poisson obtenidos experimentalmente.	109

Glosarios

Coefficiente de Poisson El coeficiente de Poisson es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento.

Constante elástica Una constante elástica es cada uno de los parámetros físicamente medibles que caracterizan el comportamiento elástico de un sólido deformable elástico. A veces se usa el término constante elástica también para referirse a los coeficientes de rigidez de una barra o placa elástica.

Ensayo no destructivo Se denomina ensayo no destructivo (también llamado END, o en inglés NDT de nondestructive testing) a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o nulo.

Fluencia La fluencia o cedencia es la deformación irrecuperable de la probeta, a partir de la cual solo se recuperará la parte de su deformación correspondiente a la deformación elástica, quedando una deformación irreversible. Este fenómeno se sitúa justo encima del límite elástico, y se produce un alargamiento muy rápido sin que varíe la tensión aplicada. Mediante el ensayo de tracción se mide esta deformación característica que no todos los materiales experimentan.

Formación de cuello o estricción En el esfuerzo último, el área de la sección transversal comienza a disminuir en una zona localizada de la probeta, en lugar de hacerlo en toda su longitud. Este fenómeno es causado por planos de deslizamiento que se forman dentro del material y las deformaciones producidas son causadas por esfuerzos cortantes. Como resultado, tiende a desarrollarse una estricción o cuello en esta zona a medida que el espécimen se alarga cada vez más.

Galgas extensiométricas Una galga extensométrica o extensómetro es un sensor que mide la deformación, presión, carga, par, posición, etcétera, y se basa en el efecto piezorresistivo, que es la propiedad que tienen ciertos materiales de cambiar el valor nominal de su resistencia cuando se les somete a ciertos esfuerzos y se deforman en dirección de los

ejes mecánicos.

Imagen digital Una imagen se define como una función de dos dimensiones $f(x,y)$ donde x e y son las coordenadas de un plano que contiene todos los puntos de la misma, y $f(x,y)$ es la amplitud en el punto (x,y) a la cual se le llama intensidad o nivel de gris de la imagen en ese punto. En el caso de que tanto las coordenadas x e y como los valores de intensidad de la función f sean discretos y finitos, se habla de una imagen digital.

Límite elástico El límite elástico o límite de elasticidad, es la tensión máxima que un material elastoplástico puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes. Si se aplican tensiones superiores a este límite, el material experimenta un comportamiento plástico con deformaciones permanentes y no recupera espontáneamente su forma original al retirar las cargas. En general, un material sometido a tensiones inferiores a su límite de elasticidad es deformado temporalmente de acuerdo con la ley de Hooke.

Módulo de Young El módulo de Young o módulo de elasticidad es la constante que relaciona el esfuerzo de tracción o compresión con el respectivo aumento o disminución de longitud que tiene el objeto sometido a estas fuerzas.

Procesamiento digital de imágenes El procesamiento de imágenes digitales es el conjunto de técnicas que se aplican a las imágenes digitales con el objetivo de mejorar la calidad o facilitar la búsqueda de información.

Resistencia Máxima de Tensión Tensión de ingeniería más alta desarrollada en un material antes de la rotura. Normalmente, los cambios en el área debido a la carga que cambia y al estrangulamiento se descartan para determinar la resistencia máxima.

Lista de Acrónimos

ASTM	: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
CC	: Coeficiente de correlacion cruzada
DIC	: Correlación Digital de Imágenes
LVDT	: Transformadores Diferenciales de Variación Lineal
MATLAB	: Laboratorio de Matrices
MCC	: Métodos de los Mínimos Cuadrados
MDF	: Método de Diferencias Finitos
MEF	: Método de Elementos Finitos
MMC	: Mecánica de Medios Continuos
MNR	: Método de Newton-Raphson
NDT	: Ensayo no Destructivo
NSSD	: Suma de diferencias cruzadas normalizadas
NTP	: Norma Técnica Peruana.
RoI	: Region de interes
SSD	: Suma de diferencias cuadradas

Símbolos

ν	Coefficiente de Poisson
C	Coefficiente de Correlación
ϵ	Deformación
q	Desplazamiento [mm]
$\sigma_{\text{máx}}$	Esfuerzo de Rotura [Kg/cm^2]
ϵ_{xx}	Deformaciones normales horizontales
ϵ_{yy}	Deformaciones normales verticales
ϵ_{xy}	Deformaciones de corte
f, g	Imágenes referencia y deformadas
(x, y)	Coordinación de píxeles (puntos) en la región de interés (RoI)
u	Campo de desplazamiento del ROI
$u(x, y), v(x, y)$	Desplazamientos en las direcciones x,y
M, N	El número de píxeles (puntos)
C_{SSD}	Criterio de la suma de la diferencia al cuadrado (SSD)
C_{CC}	Criterio del coeficiente de correlación cruzada (CC)
σ_E	Límite de Elasticidad [Kg/cm^2]
γ	Peso Especifico [tn/m^3]
E	Módulo de elasticidad [Kg/cm^2]
σ_R	Resistencia a la tracción [Kg/cm^2]

Capítulo I

Planteamiento del Problema

En este capítulo se presentan las generalidades de este trabajo de tesis, describiendo los objetivos, la justificación del mismo, así como el planteamiento del problema, lo cual conduce a una hipótesis sobre el mismo.

1.1 Descripción del problema

Existen numerosas formas de medir las deformaciones durante un ensayo de materiales siendo necesario el uso de extensómetros o galgas extensiométricas las cuales se encuentran entre las más utilizadas con el problema que su uso se limita a lugares predeterminados o específicos. Sin embargo, esta forma de calcular deformaciones mediante dispositivos electrónicos tiene algunos inconvenientes o limitaciones en comparación a la técnica óptica de campo completo DIC, estos inconvenientes vienen a ser que las mediciones se realizan en ubicaciones discretas y la superficie investigada debe ser lo suficientemente lisa como para fijar el medidor electrónico. Las mediciones ópticas son capaces de capturar incluso deformaciones complejas hasta el fallo final del material.

Los avances en la ciencia de los materiales han presentado, en las últimas décadas, nuevos desafíos para el investigador de materiales, los materiales compuestos requieren un tipo especial de galgas extensiométricas (generalmente de alta resistencia) para compensar sus conductividades térmicas más bajas en comparación a los metales.

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, no contamos con un sistema para medición de deformaciones, y el método de medición óptico es una solución frente a este problema.

1.2 Delimitación del problema

En la presente investigación se desarrollaron ensayos de compresión uniaxial en la Ciudad de Ayacucho, Provincia de Huamanga en el laboratorio de tecnología del concreto de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga y en el laboratorio de ensayo de materiales de la empresa INGEOTECON, los ensayos de tracción se desarrollaron en la Ciudad de Lima, en el laboratorio de materiales (LEM-UNI) de la Universidad Nacional de Ingeniería.

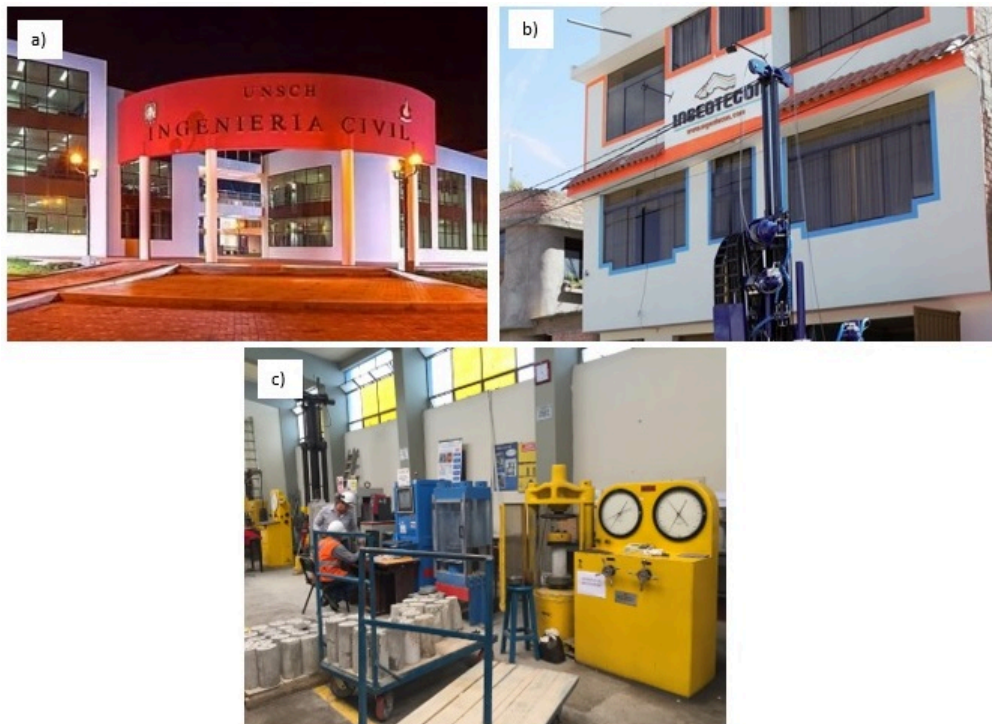


Figura 1 (a) Laboratorio de tecnología del concreto - UNSCH, (b) Laboratorio de ensayo de materiales-INGEOTECON y (c) Laboratorio de ensayo de materiales LEM-UNI

Fuente: Elaboración Propia.

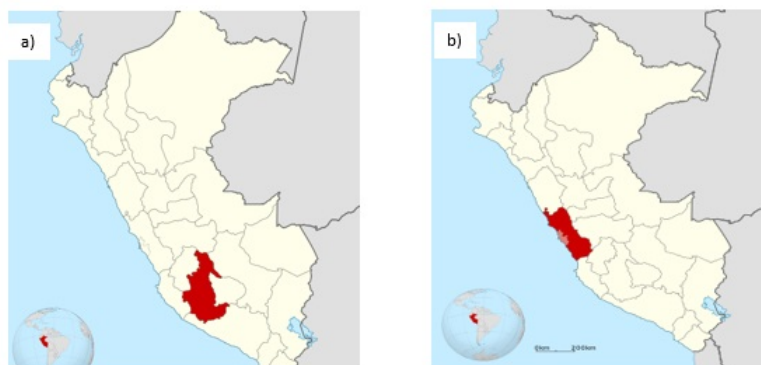


Figura 2 (a) Ubicación de geográfica de los ensayos de compresión, (b) Ubicación de geográfica de los ensayos de tracción.

Fuente: Elaboración Propia.

1.2.1 Temporal

La investigación se realizó dentro de los 2 primeros trimestres del año 2019.

1.2.2 Temática y unidad de análisis

El propósito de la presente investigación es encontrar la precisión de la técnica de correlación digital de imágenes DIC, utilizando como unidad de análisis muestras de albañilería y probetas de acero A36 en ensayos experimentales de compresión y tracción uniaxial.

Este trabajo de investigación presenta las siguientes unidades de análisis:

1. Probetas de acero A36.
2. Ladrillos de arcilla Tipo II y Tipo IV.

De estas unidades de análisis se obtendrán registros fotográficos durante los ensayos de tracción y compresión respectivamente, posteriormente mediante la técnica sin contacto llamada correlación digital de imágenes - DIC, se obtendrán campos de deformación globales mediante los cuales se podrán determinar las constantes elásticas del material como el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson para determinar la precisión de la técnica DIC.

1.3 Formulación del problema

1.3.1 Problema general

¿Cómo determinar la precisión de la técnica de correlación digital de imágenes DIC en la obtención de deformaciones durante ensayos experimentales?

1.3.2 Problemas específicos

- a) ¿Durante ensayos experimentales de compresión axial, como determinar la precisión de la técnica DIC?
- b) ¿Durante ensayos experimentales de tracción axial, como determinar la precisión de la técnica DIC?
- c) ¿Finalizado el ensayo experimental, como determinar la exactitud de la técnica DIC?

1.4 Justificación e importancia

La investigación experimental se limita a probar, y para el caso de la presente investigación se ha propuesto una técnica de medición sin contacto llamada correlación de imágenes digitales (DIC), para medir las deformaciones y finalmente obtener la relación de Poisson y el módulo de elasticidad donde las técnicas de medición convencionales no son factibles.

Una deformación es magnitud dimensional que describe la elongación (tracción) o contracción (compresión) que experimenta un material, esta magnitud solo es posible determinarla mediante dispositivos electrónicos como son las galgas extensiométricas o sensores de desplazamiento LVDT las cuales no poseemos en los laboratorios de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, motivo por el cual se desarrolla la presente investigación, en la cual podremos obtener deformaciones de diversos materiales mediante la técnica óptica de correlación digital de imágenes, estableciéndose así un método alternativo cuando se presente la carencia de estos dispositivos electrónicos.

1.5 Importancia de la investigación

Esta tesis es fundamental porque enfoca nuevas soluciones ante la falta de dispositivos de medición y así encontrar un método alternativo para medir las deformaciones y las constantes elásticas de un material ensayado bajo esfuerzos de compresión y tracción uniaxial.

El presente trabajo se centra en la aplicación de la técnica de correlación digital de imágenes digital - DIC para la medición de deformaciones en ensayos de tracción y compresión axial. El objetivo final es obtener la precisión de la técnica de correlación digital de imágenes DIC, a partir del cálculo del coeficiente de Poisson mediante esta técnica óptica y comparar estos resultados con valores técnicos del coeficiente.

A partir del resultado de este trabajo, se espera que esta técnica resulte muy útil para determinar las propiedades elásticas de una amplia gama de materiales, particularmente en aquellos casos en los que no es aplicable el uso de un extensómetro o sensor de desplazamiento.

1.6 Limitaciones de la investigación

Las limitaciones de la presente investigación se presentaron en cuanto a la disponibilidad de una máquina de ensayos universal para elementos sometidos a tracción, el cual se encuentra en mantenimiento en la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, motivo por el cual se viajó a la ciudad de Lima para realizar dichos ensayos en la Universidad Nacional de Ingeniería, otra de las limitaciones para la culminación de esta investigación es la carencia de dispositivos eléctricos de medición de deformaciones como son las galgas extensiométricas o sensores de desplazamiento.

1.7 Objetivo general

Determinar la precisión de la técnica DIC, comparando valores experimentales y teóricos del coeficiente de Poisson.

1.7.1 Objetivos específicos

- a) Calcular el coeficiente de Poisson en ladrillos artesanales tipo II utilizando la técnica DIC y comparar este valor experimental con valores técnicos del coeficiente.
- b) Calcular el coeficiente de Poisson en muestras de acero A36 utilizando la técnica DIC y comparar este valor experimental con valores técnicos del coeficiente.
- c) Medir el alargamiento en una probeta de acero A3 6 utilizando la técnica DIC y comparar con las mediciones hechas en laboratorio.

Capítulo II

Estado del arte

2.1 Antecedentes

Según Peters, Ranson, Sutton, Chu y Anderson (1983), la técnica de correlación digital de imágenes DIC fue introducida por primera vez en la década de 1980 como una medida de los componentes de desplazamiento en la metrología del punto láser por de la Universidad de Carolina del Sur.

Según Peters et al. (1983), uno de los primeros trabajos en proponer el uso de adquisición de imágenes por computadora y mediciones de deformación en sistemas de materiales se escribieron en 1982. La aplicación original preveía el desarrollo y el registro digital de un patrón de campo completo al someter un objeto a ondas ultrasónicas tanto antes de la carga (la imagen de referencia) como durante el proceso de carga (la imagen deformada).

Según Peters et al. (1983), utilizaron un algoritmo de correlación cruzada para correlacionar un subconjunto de píxeles entre las imágenes de referencia y las deformadas. En los años siguientes, la técnica de correlación de imágenes digitales ha sido altamente desarrollado para aumentar la velocidad de correlación, mejorar la precisión de la correlación, etc. La mayoría de los esfuerzos se centraron en la mejora de los algoritmos de correlación.

Las investigaciones en la técnica de Correlación Digital de Imágenes a través de los años, se menciona su origen hasta la actualidad, se cita las siguientes investigaciones a través de la cronología en la Tabla 1.

AÑO	ESTUDIO	AUTOR	DESCRIPCION
1983	Application of digital correlation methods to rigid body mechanics	W.H.Peters W.F.Ranson M.A.Sutton T.C.Chu	Se utiliza DIC con métodos de mínimos cuadrados para analizar eficazmente la deformación en 2-D de cuerpos rígidos.
1983	Determination of displacements using an improved digital correlation method	M.A.Sutton W.J.Woltors W.H.Peters W.F.Ranson S.R.McNeill	Mejoró el algoritmo de correlación usando interpolación bilineal, y redujo significativamente el tiempo de ejecución de la computadora.
1986	Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis	M.A.Sutton M.Chen W.H.Peters Y.J.Chao S.R.McNeill	Optimización del algoritmo utilizando el método de Newton-Raphson con correlaciones diferenciales.
1989	Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction	H.A.Bruck S.R.McNeill M.A.Sutton W.H.Peters	Se utiliza Newton-Raphson mejorado con correlación parcial en DIC y se reduce el tiempo de ejecución de la computadora, al tiempo que se alcanza la precisión equivalente en la correlación anterior de coarse-fine.
1996	Measurement of surface profile using digital image correlation	S.R.McNeill M.A.Sutton Z.Miao J.Ma	Se desarrolló un método de correlación de imagen digital 3D en mediciones de desplazamiento fuera del plano.
1998	Improved digital image correlation	G.Vendroux W.G.Knauss	Se analizó la precisión de los parámetros afectados. Se utilizaron métodos de mínimos cuadrados con matriz hessiana para optimizar el algoritmo.
1998	An experimental study of the deformation fields around a propagating crack tip	Y.J.Chao P.F.Luo J.F.Kalthof	Primera aplicación de la técnica de correlación de imagen digital en el estudio de la dinámica de fractura.

Tabla 1 Estudios históricos de la correlación digital de imágenes

2.1.1 Investigaciones internacionales

- **Using digital image correlation (DIC) technique to investigate Deformation of semi-interlocking masonry (sim)) (Hossain, Totoev & Masia, 2018).**

Según Hossain et al. (2018), se desarrolló un innovador sistema de construcción de mampostería en la Universidad de Newcastle, Australia. Consiste en paneles de mampostería diseñados sin mortero hechos de unidades de mampostería semi-entrelazadas (SIM) (ladrillos) que tienen una capacidad de disipación de energía significativa debido a la fricción en las juntas de la cama deslizante entre los ladrillos del panel durante un terremoto.

Según Hossain et al. (2018):

Este método especial de enclavar ladrillos SIM permite el deslizamiento relativo de los cursos de ladrillos en el plano de una pared y evita el movimiento relativo fuera del plano de los ladrillos. Este estudio examina el comportamiento de los paneles SIM sujetos a desplazamiento lateral cíclico en el plano. El movimiento horizontal y vertical de las unidades SIM se grabó utilizando la correlación digital de imágenes (DIC) cada 10 segundos durante aproximadamente 8 horas de prueba. Los patrones de grietas en los paneles SIM se mapean trazando los resultados de DIC. El desplazamiento vertical del panel para cada nivel de desplazamiento también se analizó en dicho estudio.

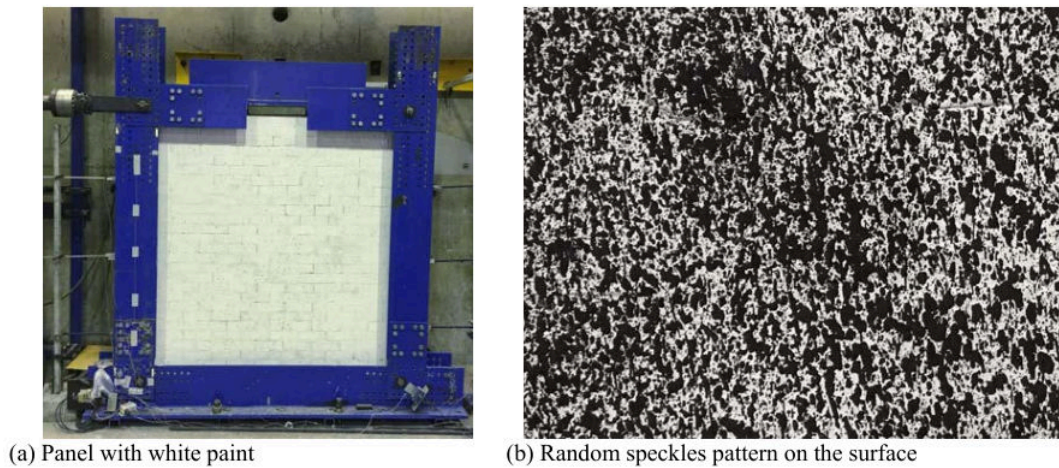


Figura 3 Aplicación del patron de moteado.

Fuente: Obtenido de Hossain, Totoev y Masia (2018).

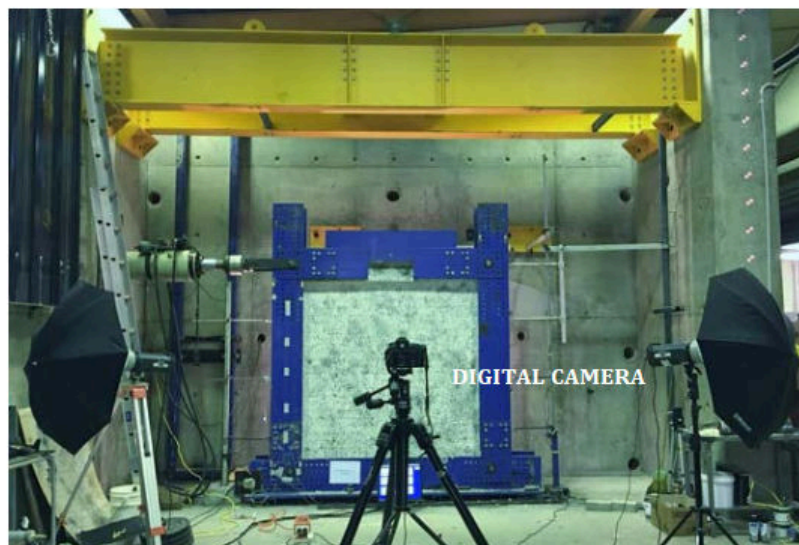


Figura 4 Configuración de la técnica DIC.

Fuente: Obtenido de Hossain, Totoev y Masia (2018).

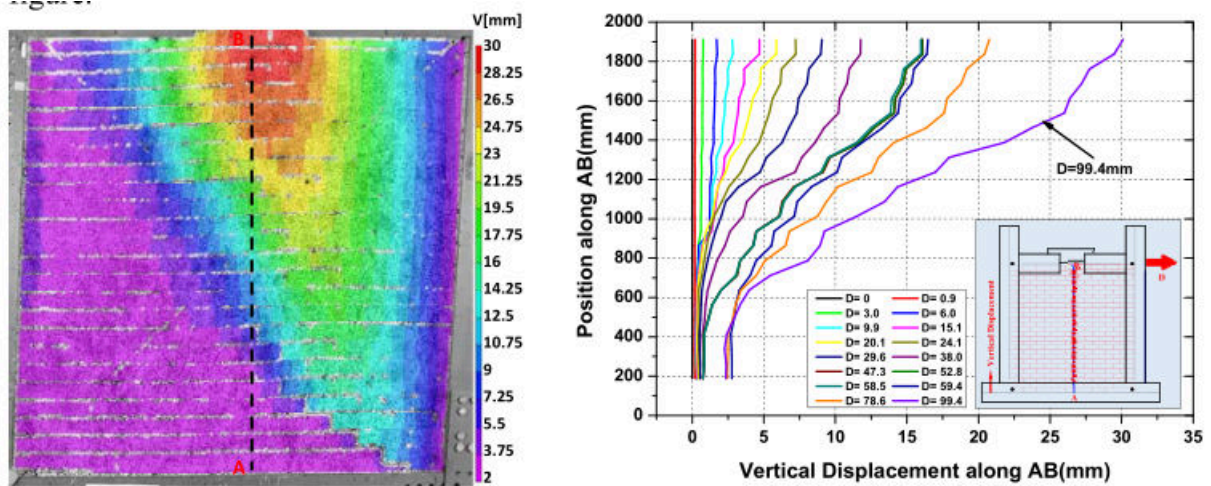
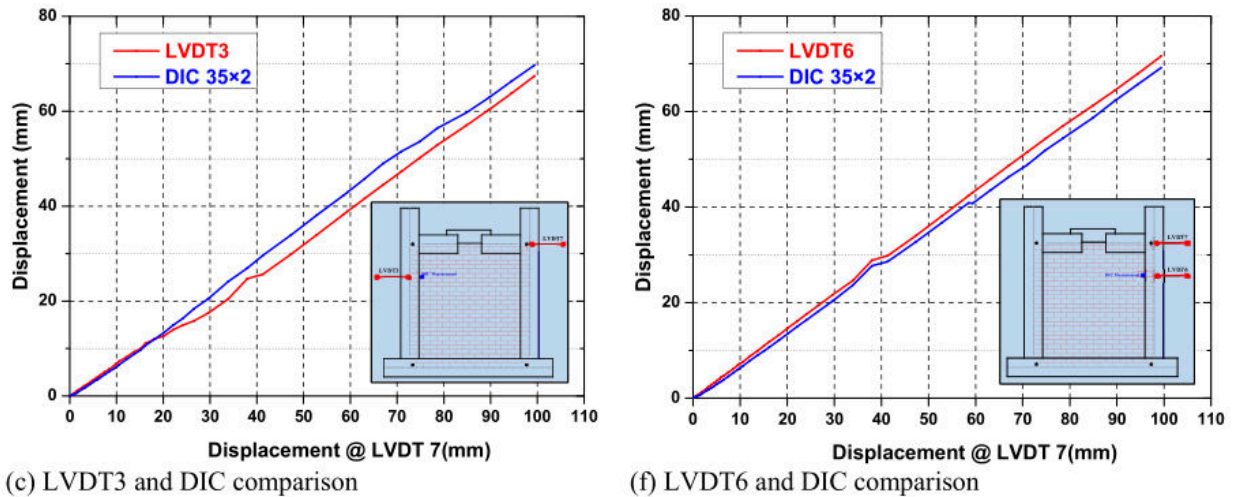


Figura 5 Desplazamientos verticales.

Fuente: Obtenido de Hossain, Totoev y Masia (2018).



(c) LVDT3 and DIC comparison

(f) LVDT6 and DIC comparison

Figura 6 Comparación experimental de la medición DIC y LDVT en diferentes posiciones.

Fuente: Obtenido de Hossain, Totoev y Masia (2018).

- **Fast, Robust and Accurate Digital Image Correlation Calculation Without Redundant Computations (Pan, Li & Tong, 2013).**

Según Pan et al. (2013):

El análisis de deformación de alta eficiencia y alta precisión utilizando la correlación digital de imágenes (DIC) se ha vuelto cada vez más importante en los últimos años, considerando la tendencia actual de usar cámaras digitales de mayor resolución y el requisito común de procesar una gran secuencia de imágenes grabadas en una prueba dinámica. En este trabajo, para eliminar los cálculos redundantes involucrados en el método DIC convencional utilizando la estrategia de coincidencia aditiva directa y el algoritmo clásico Newton-Raphson (FA-NR).

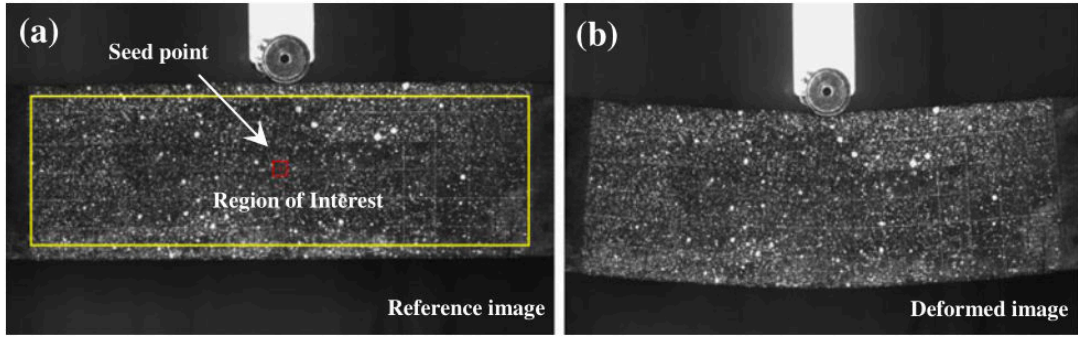


Figura 7 Imágenes experimentales reales de una muestra de goma sometido a flexión de tres puntos: (a) imagen de referencia y (b) imagen deformada.

Fuente: Obtenido de Pan, Li y Tong (2013).

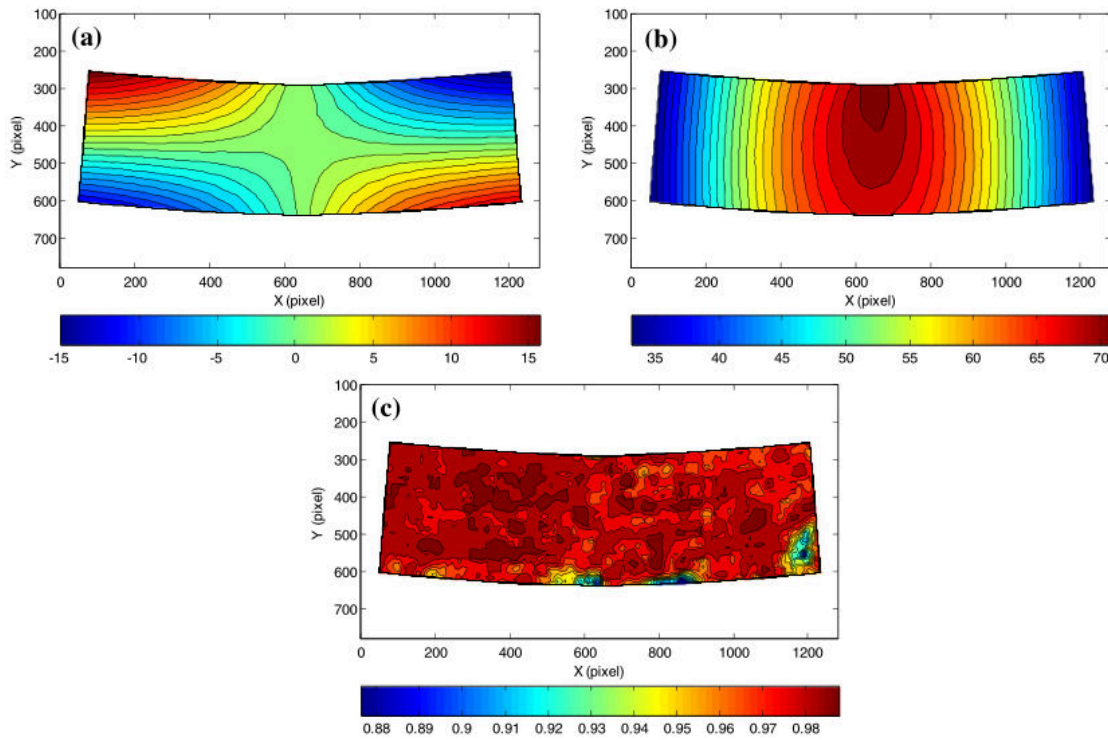


Figura 8 Cálculo de la muestra de caucho utilizando el método DIC basado en el algoritmo IC-GN propuesto con un subconjunto de 41×41 píxeles: (a) campo de desplazamiento U, (b) campo de desplazamiento V y (c) distribuciones de coeficientes ZNCC

Fuente: Obtenido de Pan, Li y Tong (2013).

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Correlación digital de imágenes DIC

Según (Sutton, Orteu & Schreier, 2009), la correlación digital de imágenes (DIC) es una técnica óptica no invasiva de campo completo que permite la medición de deformaciones en la superficie de la probeta o espécimen de prueba, mediante el análisis de imágenes digitales del objeto sometido a ensayos mecánicos o térmicos.

Según (Zhang, 2014), el principio fundamental de la técnica consiste en tomar imágenes digitales durante el ensayo mecánico de la probeta desde su estado inicial (imagen de referencia) hasta su estado final (imagen deformada).

Esta técnica ofrece una serie de ventajas respecto a otros métodos de medición las cuales son :

1. Montaje experimental y preparación de la muestra sencillo.
2. Baja vulnerabilidad ambiental.
3. Monitoreo continuo de desplazamientos.
4. Procesamiento de datos relativamente sencillo y automático

Según (Saldaña, Márquez Aguilar & Molina, 2015) La correlación digital de imágenes (DIC) es una técnica que cobra cada vez más importancia en el área de investigación y el sector industrial para la medición de las propiedades mecánicas de diversos materiales, tales como: metales, materiales compuestos y polímeros.



Figura 9 Fotografía esquemática del ensayo de la técnica DIC.

Fuente: Obtenido de Nazar (2016).

2.2.2 Configuración de la técnica DIC

La Figura 10 muestra una configuración típica para el sistema DIC. Un objeto plano con una superficie moteada se coloca perpendicular al eje óptico del sistema de imágenes. Se captura una imagen de la superficie del objeto en su estado no deformado. Después de ejercer una fuerza mecánica o térmica sobre el objeto, se captura otra imagen de la superficie del objeto en su estado deformado.

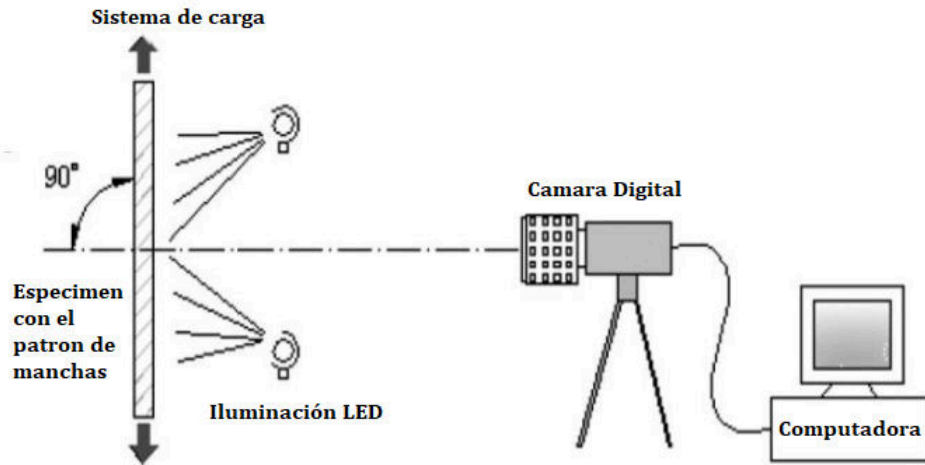


Figura 10 Sistema típico de adquisición de imágenes ópticas para el método DIC 2D.

Fuente: Obtenido de Blaber, Adair y Antoniou (2015)

La Figura 11 muestra imágenes típicas moteadas para la correlación antes y después de una deformación en el plano.

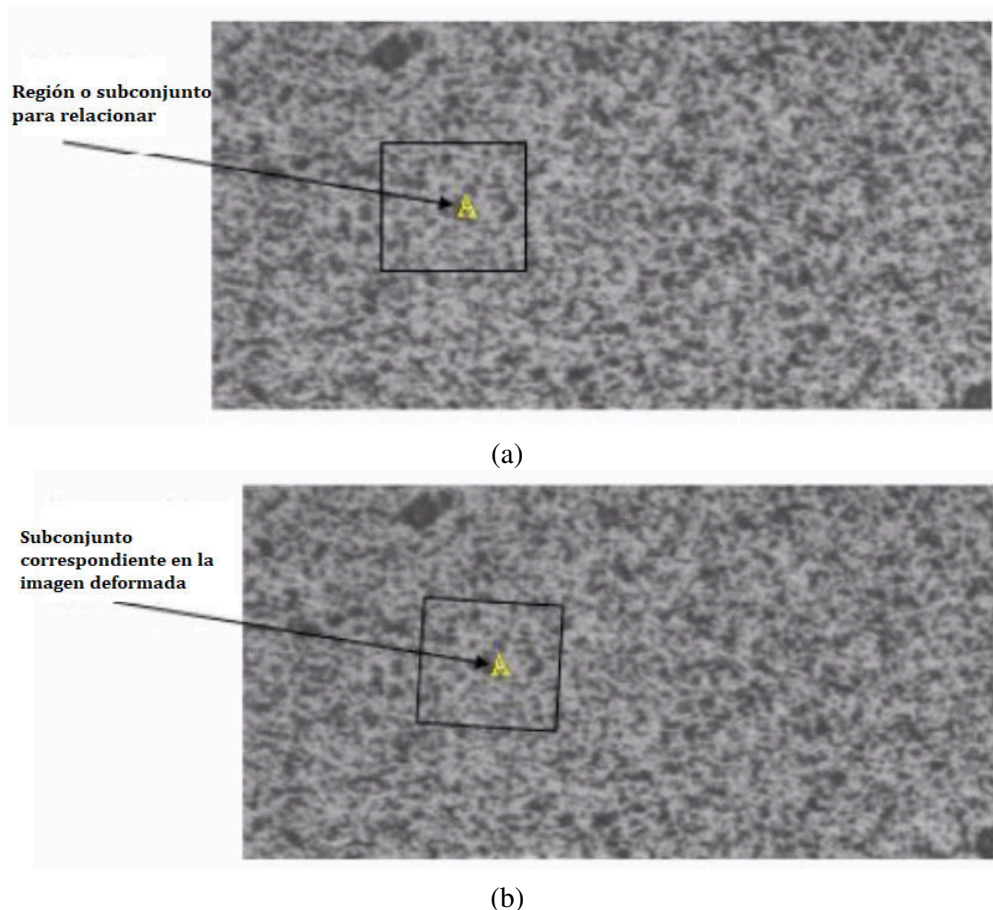


Figura 11 Imagen típica en el sistema DIC (a): no deformado, (b): deformado

Fuente: Obtenido de Bing Pan, Qian, Xie y Asundi (2009).

Luego se aplica el algoritmo DIC para hacer coincidir un patrón de intensidad en la imagen no deformada con un patrón de intensidad correspondiente en la imagen deformada y se

obtiene el campo de deformación. En el método DIC, se elige una serie de puntos en la imagen no deformada para calcular el campo de desplazamiento. Para cada punto, se elige una sub-imagen alrededor de este punto y se correlaciona con una sub-imagen correspondiente en la imagen deformada. La búsqueda de la mejor coincidencia de dos sub-imágenes se lleva a cabo mediante un proceso de búsqueda aproximada, o más eficientemente, un proceso de iteración no lineal. Para lograr una precisión de sub-píxeles, se deben implementar métodos de interpolación para construir una distribución continua del valor de gris para la imagen deformada.

El proceso general de la técnica DIC ha sido ilustrado en la Figura 12.

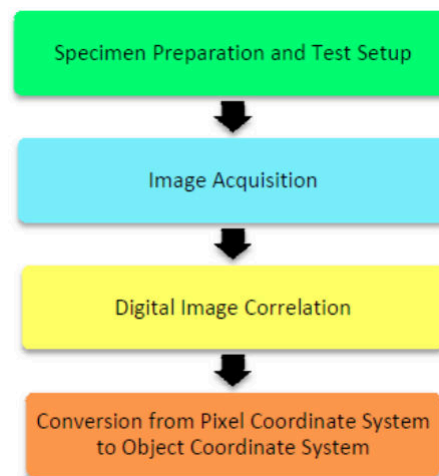


Figura 12 Diagrama de flujo simple que representa el proceso DIC.

Fuente: Obtenido de Wang (2015).

2.3 Marco conceptual

2.3.1 Ensayo de tracción

El ensayo se realiza en una Máquina Universal (Figura 14) y la operación consiste en someter una probeta (Figura 13) a una carga mono axial gradualmente creciente (es decir, estática) hasta que ocurra la falla.

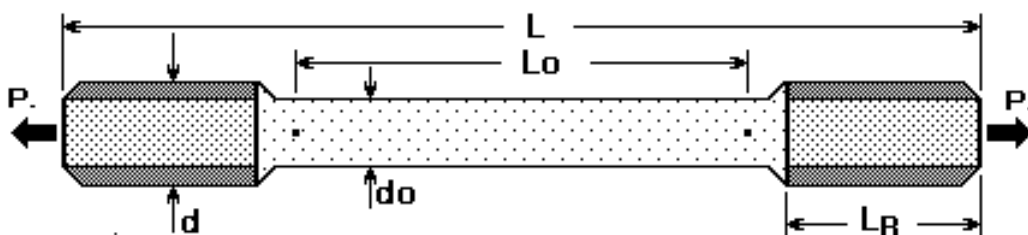


Figura 13 Probeta para ensayo de tracción.

Fuente: Obtenido de <https://www.wikipedia.org/>.

El esfuerzo axial σ en el espécimen de prueba (probeta) se calcula dividiendo la carga P entre el área de la sección transversal (A):

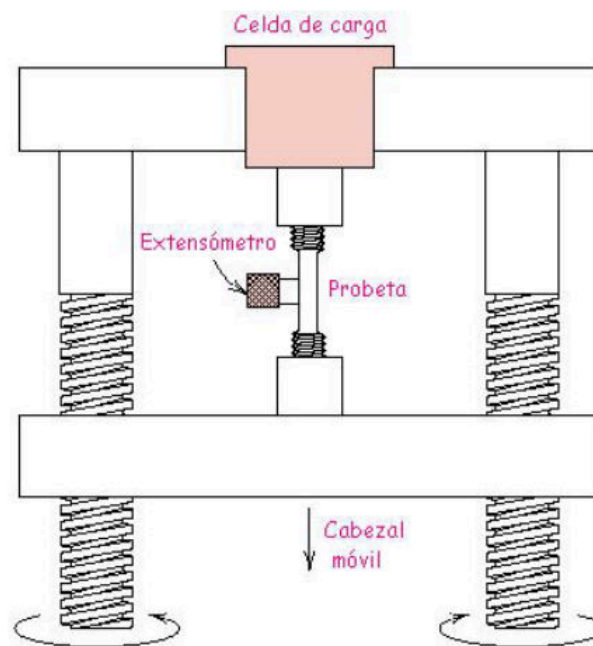


Figura 14 Máquina para ensayo de tracción.

Fuente: Obtenido de <https://www.wikipedia.org/>.

Cuando sobre un cuerpo actúa una fuerza pequeña que trata de deformarlo se produce una deformación elástica, que se recupera al desaparecer esa fuerza. Pero superado un cierto valor, la deformación que sufre el cilindro es permanente, o plástica.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Asimismo, la deformación que sufre el material debe ser considerada en relación con la longitud total del objeto, y se analiza la deformación unitaria, ε , obtenida al dividir la deformación total entre la longitud del objeto. A veces se habla de elongación como el tanto por ciento de deformación, y que se obtiene al multiplicar la deformación unitaria por 100:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_o} \quad (2.2)$$

Con estas premisas, el ensayo de tracción de un material consiste en someter un cilindro o una placa con dimensiones normalizadas de ese material a un estiramiento creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. Con esto se obtienen gráficas como la de la Figura 15), de un ensayo de tracción, en el que se observan varias zonas características de los materiales

elásticos:

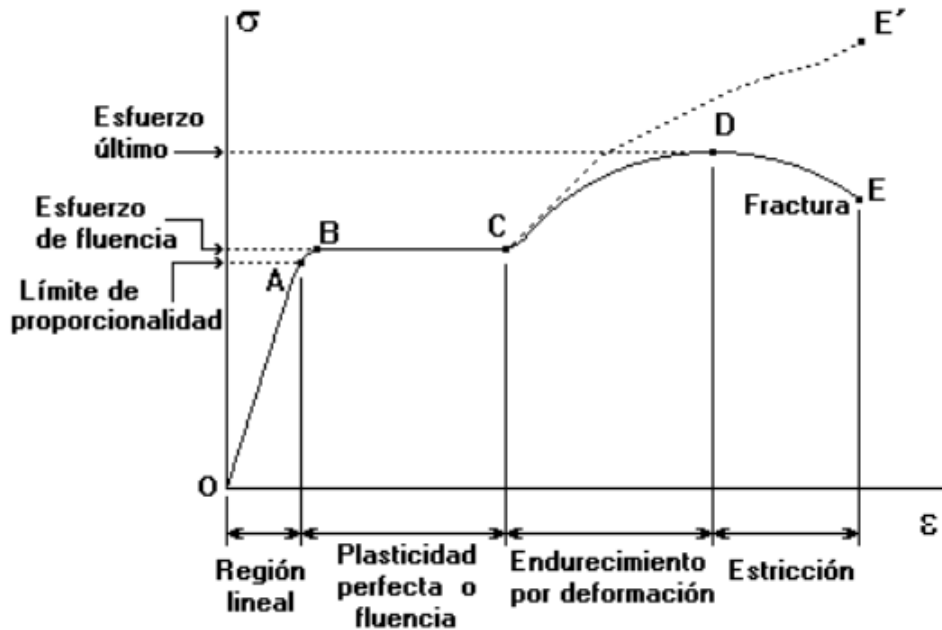


Figura 15 Diagrama esfuerzo-deformación de materiales dúctiles en tensión (fuera de escala).

Fuente: Obtenido de <https://www.wikipedia.org/>.

1. OA: Es la zona elástica del material hasta un esfuerzo denominado límite elástico (LE). En buena parte de la curva se mantiene la proporcional y a la pendiente de la curva se le llama módulo elástico o módulo de Young. La recta responde a una ecuación llamada Ley de Hooke:
2. AB: Esta es también una zona elástica, aunque en ella no se cumple la proporcionalidad.
3. BC: Esta zona se denomina de fluencia, en la que el material cede sin apenas aumentar el esfuerzo, el cual recibe el nombre de esfuerzo de fluencia (LF). Es el inicio de las deformaciones plásticas.
4. CD: Cuando se sigue aumentando el esfuerzo de tracción el material sigue alargándose de forma plástica. Al desaparecer el esfuerzo, aunque el material deja de estar estirado, no recupera su tamaño original y se queda deformado permanentemente.
5. DE: A partir de un cierto límite llamado esfuerzo de rotura (LR) el estiramiento es tan grande que se produce la estricción de la sección, es decir, el material adelgaza, y acaba rompiéndose.

Los diseños técnicos se realizan para que las piezas trabajen siempre en la zona elástica. Incluso se trabaja con un coeficiente de seguridad n , que limita un esfuerzo máximo de trabajo

σ_T :

$$\sigma_T = \frac{LE}{n} \quad (2.3)$$

Cuando se somete un material a un esfuerzo superior al límite de fluencia, éste se estira, y al desaparecer la fuerza, aunque el material deja de estar estirado, no recupera su tamaño original y se queda deformado permanentemente. Si ahora se vuelve a cargar ese material, resulta que su límite elástico es el valor del esfuerzo alcanzado anteriormente. A este efecto se le denomina provocar acritud en el material, y es una forma de mejorar sus propiedades

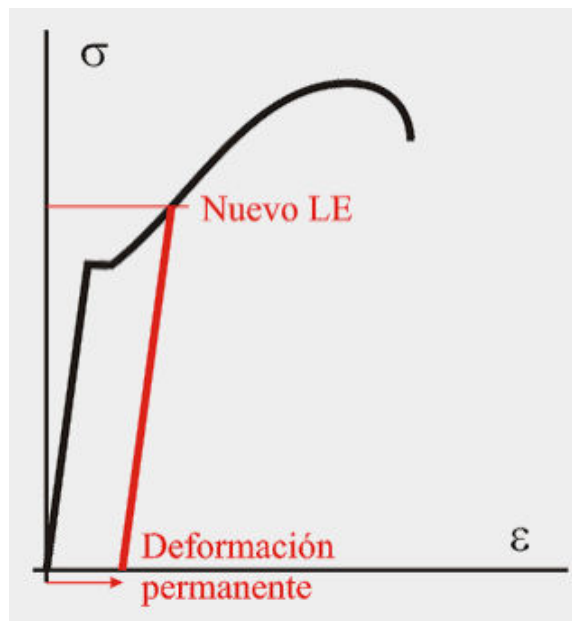


Figura 16 Deformaciones permanentes en un material.

Fuente: Obtenido de <https://www.wikipedia.org/>.

Cuando se alarga un metal por efecto de la tracción, a la vez sufre un estrechamiento que se puede calcular mediante el volumen de la pieza:

$$V = A_0 L_0 \quad (2.4)$$

Volumen que se mantiene cuando la pieza se alarga y se estrecha. Por este motivo, en la expresión del esfuerzo sería aconsejable indicar que se usa la sección inicial A_0 , aunque las ínfimas variaciones de la misma hacen despreciable ser tenidas en cuenta para los cálculos.

2.3.2 Ensayo de compresión

Este ensayo se hace sobre probetas elaboradas de antemano con el material que se quiere ensayar. Las probetas tendrán forma cilíndrica con diámetros determinados de acuerdo a las características del ensayo. Ambas bases del cilindro deben ser perfectamente paralelas. El ensayo se realiza en prensas especiales, una de cuyas placas debe ser fija, para evitar la distribución no uniforme de los esfuerzos sobre la probeta.



Figura 17 Ensayo de compresión en una probeta cilíndrica.

Fuente: Obtenido de <https://www.wikipedia.org/>.

Las fuerzas que se aplican a la probeta, van en aumento a partir de un régimen preestablecido, hasta que se rompe la misma; este esfuerzo de rotura quedará fijado en los indicadores de la prensa.

Se calcula a partir de la fórmula:

$$\sigma_c = \frac{F}{A_0} \quad (2.5)$$

- σ_c - límite de resistencia a compresión.
- F - Carga de rotura por compresión en kg .
- A_0 - área de la sección transversal de la probeta en cm^2 .

2.3.3 Valores técnicos del coeficiente de Poisson

Segun (Cerbu, Xu, Wang & Roşca, 2018) :

El conocimiento de las constantes elásticas (como la relación de Poisson, el módulo de Young, etc.) de los materiales es indispensable para el diseño de la estructura y el control de calidad. Por lo tanto, su determinación es de suma importancia para todas las aplicaciones de ingeniería. La relación de Poisson se define como la relación de deformaciones transversales a longitudinales de una muestra cargada. Cuando una muestra de material se estira en una dirección, tiende a adelgazarse en las otras dos direcciones. La relación de Poisson (ν) se determina midiendo deformaciones transversales y axiales durante las pruebas de tracción.

El módulo de Young o módulo de elasticidad (E) es la propiedad que describe el comportamiento de deformación de un material o estructura bajo carga. Los materiales se deforman de manera diferente cuando se aplican cargas, y la relación entre la tensión y la deformación generalmente se define por el módulo de Young.

Material	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio
Dentin	18.6	0.31
Titanium alloy	120	0.33
Gutta percha point	0.00069	0.45
Ceramic	96	0.29
Composite resin	8.3	0.28
Superbond C&B	1.8	0.25
Glass ionomer cement	4	0.35
Zinc phosphate cement	22.4	0.35
Panavia F	18.3	0.30
Zinc polycarboxylate cement	5.11	0.35
Alveolar bone	13.7	0.30
Periodontal membrane	0.0689	0.45

Figura 18 Valores del coeficiente de Poisson para diferentes materiales.

Fuente: Obtenido de LI et al. (2006).

La capacidad de cualquier material para resistir o transmitir carga es importante, y esta propiedad a menudo se usa para determinar si un material en particular es adecuado para un propósito específico. Principalmente, el módulo E de Young se deriva de la pendiente de la parte lineal de la curva de tensión-deformación durante las pruebas de tracción uniaxiales.

Para la siguiente investigación, para obtener los valores técnicos del coeficiente de Poisson del

Acero A36 se hizo el uso de la base de datos de la fabrica de metales "AMERICAN METALS - USA".



Figura 19 Valores del coeficiente de Poisson para diferentes materiales.

Fuente: Obtenido de <https://american-metals.com/>.

Mostrándose en la siguiente hoja de datos para el acero A36 las siguientes especificaciones mecánicas, químicas del material mencionado.

A36 Steel Technical Data Sheet		
ASTM A36 Steel, plate		
Material Notes:		
Steel for general structural purposes including bridges and buildings.		
Minimum Cu content when copper steel is specified.		
Tests performed in transverse direction for plates wider than 590 mm.		
Physical Properties	Metric	English
Density	7.85 g/cc	0.284 lb/in ³
Mechanical Properties	Metric	English
Tensile Strength, Ultimate	400 - 550 MPa	58000 - 79800 psi
Tensile Strength, Yield	250 MPa	36300 psi
Elongation at Break	20 %	20 %
	23 %	23 %
Modulus of Elasticity	200 GPa	29000 ksi
Bulk Modulus	160 GPa	23200 ksi
Poissons Ratio	0.28	0.28
Shear Modulus	79.3 GPa	11500 ksi
Component Elements Properties	Metric	English
Carbon, C	0.25 - 0.29 %	0.25 - 0.29 %
Copper, Cu	0.20 %	0.20 %
Iron, Fe	98 %	98 %
Manganese, Mn	1.03 %	1.03 %
Phosphorous, P	<= 0.040 %	<= 0.040 %

Figura 20 Base de datos del Acero A36.

Fuente: Obtenido de <https://american-metals.com/>.

Para la siguiente investigación, para obtener los valores técnicos del coeficiente de Poisson del ladrillo de arcilla Tipo II, se tomó como referencia los estudios realizados por (Gallegos & Ramos, 1986).

2.3.4 Imagen digital

Una imagen digital es un conjunto discreto de valores de intensidad, denominados píxeles (abreviatura de elementos de imagen), que se configuran cuando una cámara digital captura una imagen. Para capturar una imagen, los rayos de luz reflejados desde el objetivo entran en la lente de la cámara y excitan una variedad de sensores. La excitación de cada sensor crea una señal analógica, que luego se convierte en una señal digital y se almacena como un archivo digital. El proceso real de capturar una imagen es más complejo; sin embargo, esta explicación simplificada demuestra adecuadamente por qué una imagen digital se crea como un conjunto discreto de valores de intensidad (Poissant, 2007).

Los valores de intensidad almacenados en una imagen digital suelen ser enteros positivos de 8 bits y, como tales, varían de 0 a 255 (2^8 o 256 niveles). Los valores de 0 representan sin intensidad de luz o negro, y los valores de 255 representan la intensidad de luz máxima. Dado que el DIC generalmente se realiza con imágenes en escala de grises, los valores de intensidad de 255 se muestran en blanco, y cualquier valor entre los extremos es un tono de gris. La Figura 21 ilustra el vínculo entre los valores de intensidad discretos y su apariencia si se muestra como una imagen (Poissant, 2007).

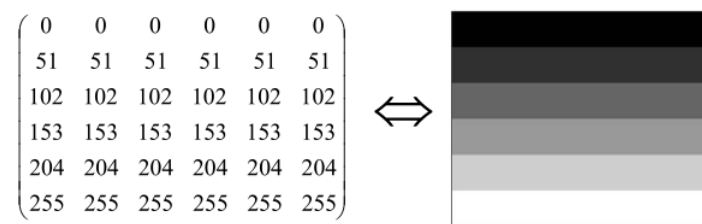


Figura 21 Ejemplo de valores de intensidad y la imagen digital correspondiente.

Fuente: Obtenido de Poissant (2007)

Una vez que se ha grabado una imagen digital, el procesamiento de la imagen se puede lograr fácilmente usando una computadora. Dentro de la computadora, la imagen digital se puede considerar como una matriz o matriz de valores como se muestra en el lado izquierdo de la Figura 21. La manipulación de los valores de la matriz cambia la imagen y, como tal, un subconjunto es un término importante tanto para el procesamiento de imágenes como para la correlación de imágenes digitales.(Poissant, 2007).

2.3.5 Subconjuntos y parámetros de deformación

Se analiza un sólido con un patrón de manchas en su superficie ubicada en un aparato de carga. Además, suponga que una cámara digital está fija con respecto al marco de referencia del laboratorio, posicionada de manera normal y enfocada en la superficie moteada. A medida que el objeto se deforma, la cámara capturará el patrón de intensidad de luz en cada configuración deformada. El método DIC supone una correspondencia biunívoca entre los cambios en el patrón de intensidad de luz grabada en las imágenes digitales y los cambios en la superficie del material. En otras palabras, se supone que, al obtener los campos de desplazamiento y deformación de la intensidad de la luz, las mismas deformaciones están presentes en la superficie del objeto (Poissant, 2007).

Considere la Figura 22, el patrón de la izquierda representa una sección de la imagen inicial o de referencia, y el cuadrado representa un subconjunto de esa imagen que contiene una característica de interés. A la derecha hay una sección de la imagen final o deformada y la coincidencia para el subconjunto de referencia está representada por el paralelogramo. Por lo tanto, se puede concluir que el subconjunto de referencia ha desplazado unos pocos píxeles a la derecha y varios píxeles hacia arriba en la imagen deformada (Poissant, 2007).

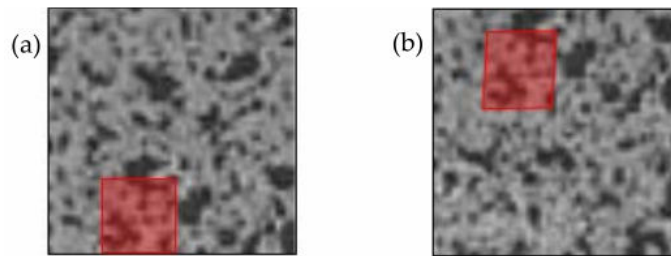


Figura 22 (a) Imagen de referencia y subconjunto (b) Imagen deformada y subconjunto coincidente.
Fuente: Obtenido de Poissant (2007).

Conceptualmente, la correlación de imagen digital implica realizar el análisis anterior cuantitativamente para determinar los desplazamientos del centro del subconjunto. Por lo tanto, considere un subconjunto cuadrado, $n \times n$ píxeles en la imagen de referencia. El tamaño del subconjunto n debe ser un número entero impar para garantizar que el centro del subconjunto esté definido en un solo píxel. Además, el valor de n se elige lo suficientemente grande como para contener algunas características aleatorias (lo que hace que el subconjunto sea estadísticamente único), pero debe ser lo suficientemente pequeño como para cumplir con los supuestos de la sección anterior. Si las coordenadas del centro del subconjunto se denotan como (X_p, Y_p) en las coordenadas de la imagen, entonces las intensidades de los puntos en el

subconjunto se definen para todas las coordenadas enteras de $(X_p - (n - 1)/2, Y_p - (n - 1)/2)$ a $(X_p + (n - 1)/2, Y_p + (n - 1)/2)$ como se ilustra en la Figura 23.

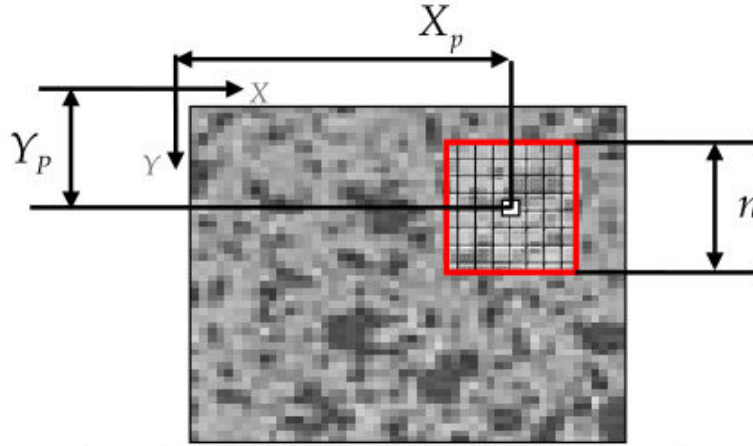


Figura 23 Ejemplo ampliado de un subconjunto de 7x7 en la imagen de referencia.

Fuente: Obtenido de Poissant (2007)

El objetivo del algoritmo DIC es encontrar el mejor conjunto de parámetros de deformación que relacionen el subconjunto de referencia con su coincidencia en la imagen deformada (el subconjunto deformado). Sin embargo, debido a que la imagen deformada es un conjunto discreto de intensidades de luz, el subconjunto deformado está limitado a valores enteros de posición (Poissant, 2007).

Para obtener resultados de subpíxeles, la imagen deformada se interpola; toda la imagen deformada ya no está representada por puntos discretos, sino por una superficie continua. Según los estudios realizados en la Universidad de Carolina del Sur, splines de quinto orden son ideales para la interpolación de superficie; sin embargo, las splines cúbicas son más comunes (Poissant, 2007).

Dado que el lenguaje de programación elegido para esta investigación fue Matlab, varias funciones de interpolación bidimensionales estaban fácilmente disponibles. Para verificar que estas funciones integradas funcionaban correctamente, las imágenes se interpolaron e inspeccionaron visualmente desde una vista superior, tanto como puntos discretos como como una superficie continua. En general, las diferencias entre los puntos discretos y la superficie continua eran insignificantes, si no imposibles de detectar visualmente (Poissant, 2007).

Actualmente, las coordenadas del subconjunto de referencia deben asignarse a la imagen

deformada para obtener la mejor coincidencia. El mapeo común, denominado deformación del subconjunto de primer orden, supone que el subconjunto de referencia se deformará por funciones lineales. La forma general de estas funciones lineales se da en la ecuación 2.6 :

$$u_{subset}(\Delta x, \Delta y) = u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \quad (2.6)$$

$$v_{subset}(\Delta x, \Delta y) = v + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x \quad (2.7)$$

Donde u_{subset} y v_{subset} son las funciones que asignan píxeles del subconjunto de referencia a puntos en la imagen deformada en las direcciones X e Y , respectivamente, $\left\{u, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, v, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}\right\}$ son los parámetros de deformación desconocidos, y Δx y Δy son los desplazamientos X e Y desde el centro del subconjunto a un punto en el subconjunto, respectivamente. Para simplificar, los parámetros desconocidos se agrupan en un vector:

$$\vec{q} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ \partial u / \partial x \\ \partial v / \partial y \\ \partial u / \partial y \\ \partial v / \partial x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{pmatrix}$$

Para visualizar mejor la referencia y los subconjuntos deformados, considere la Figura 24.

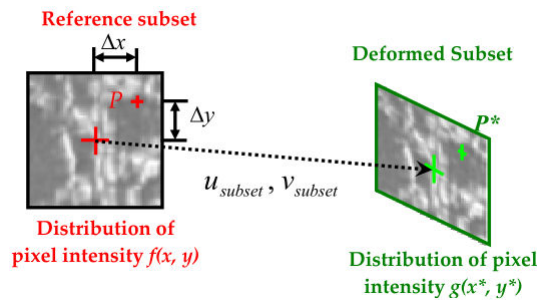


Figura 24 Mapeo de píxeles del subconjunto de referencia en un subconjunto deformado.

Fuente: Obtenido de Poissant (2007)

2.3.6 Optimización de los parámetros de deformación

Una vez definida la relación entre los subconjuntos de referencia y los subconjuntos deformados, el objetivo es ahora resolver los parámetros que mejor se adaptan a ambos. El coeficiente de correlación se introduce para medir qué tan bien las intensidades del subconjunto de referencia coinciden con las intensidades deformadas del subconjunto. Existen varios coeficientes de correlación, incluyendo el coeficiente de correlación cruzada S y el coeficiente de mínimos cuadrados C . Ambos coeficientes son válidos; sin embargo, la simplificación de Vendroux y Knauss, ha impulsado el uso del coeficiente de mínimos cuadrados como el mejor criterio de coincidencia:

$$C = \frac{\sum_{j=-M}^M \sum_{i=-M}^M [(f - g)^2]}{\sum_{j=-M}^M \sum_{i=-M}^M f^2} \quad (2.8)$$

Donde f representa las intensidades de la imagen de referencia y g representa las intensidades de la imagen deformada.

El valor $M = (n - 1)/2$ y los índices i y j se toman sobre todos los píxeles del subconjunto de referencia y los puntos correspondientes del subconjunto deformado. Por lo tanto, las intensidades del subconjunto de referencia sólo dependen del centro del subconjunto y de estos índices:

$$f = f(X_p + i, Y_p + j) \quad (2.9)$$

Sin embargo, las intensidades deformadas dependen de los parámetros de deformación:

$$g = g(X_p + i + u_{subset}(i, j), Y_p + j + v_{subset}(i, j)) \quad (2.10)$$

Donde las funciones u y v fueron definidas en la ecuación 2.7 .

Al encontrar $\vec{q}$ tal que C es un mínimo, se obtiene la mejor coincidencia. Para minimizar C , una función multivariable, de manera eficiente, se aplica un enfoque Newton-Raphson. El método de Newton-Raphson es una técnica bien documentada en los libros de texto de análisis numérico de pregrado, y afirma que la raíz de una función diferenciable y de buen

comportamiento se puede encontrar iterativamente usando lo siguiente:

$$x_{n+1} - x_n = -\frac{F(n)}{F'(x_n)} \vee x_{n+1} = x_n - \frac{F(n)}{F'(x_n)} \quad (2.11)$$

Para adaptar el método Newton-Raphson para DIC, la función F representa el gradiente de C , que debe ser cero en un mínimo local:

$$\nabla C = \frac{\partial C}{\partial q_k} = \frac{2}{\sum_{j=-M}^M \sum_{i=-M}^M f^2} \sum_{j=-M}^M \sum_{i=-M}^M \left[(f - g) \frac{\partial g}{\partial q_k} \right] \quad (2.12)$$

Observe que k se evalúa de 0 a 5 para todos los parámetros de deformación definidos en la ecuación 2.7 y que el operador derivado sólo afecta a la función g . Además, la función F' representa las derivadas de segundo orden (Hessian) de C :

$$H = \nabla(\nabla C) = \frac{\partial^2 C}{\partial q_k \partial q_l} = \frac{2}{\sum_{j=-M}^M \sum_{i=-M}^M f^2} \sum_{j=-M}^M \sum_{i=-M}^M \left[\frac{\partial g}{\partial q_l} \frac{\partial g}{\partial q_k} + (f - g) \frac{\partial^2 g}{\partial q_k \partial q_l} \right] \quad (2.13)$$

Sin embargo, como se menciona en Vendroux y Knauss, suponiendo que los valores de f están significativamente cerca de los valores de g y que la derivada de segundo orden $\partial^2 g / \partial q_k \partial q_l$ es pequeña, entonces el hessiano puede simplificarse de la siguiente forma:

$$H = \nabla(\nabla C) = \frac{\partial^2 C}{\partial q_k \partial q_l} = \frac{2}{\sum_{j=-M}^M \sum_{i=-M}^M f^2} \sum_{j=-M}^M \sum_{i=-M}^M \left[\frac{\partial g}{\partial q_l} \frac{\partial g}{\partial q_k} \right] \quad (2.14)$$

Dado que la suposición inicial $\vec{q}_0$ generalmente está dentro de aproximadamente 1 píxel, se mantiene la aproximación de Hesse. Así, la forma adaptada del método Newton Raphson se convierte en la siguiente:

$$\vec{q}_{n+1} - \vec{q}_n = -H(\vec{q}_n)^{-1} \nabla C(\vec{q}_n) \quad (2.15)$$

Al iterar $\vec{q}$ hasta que se cumpla una condición de detención, se obtienen los parámetros de

deformación que ofrecen el mejor mapeo.

Los parámetros u y v se almacenan como los desplazamientos del píxel central del subconjunto de referencia.

El valor final del coeficiente de correlación C también se almacena, pero como $1 - C$, que se conoce como la calidad de correlación. Dado que un valor C de 0 es una combinación perfecta, la calidad de la correlación sería del 100%. Se ha demostrado que los términos del gradiente de desplazamiento son limitados en precisión al estimar las deformaciones locales. Sin embargo, también se demostró que la precisión de estos valores mejora significativamente después de eliminar el ruido inherente de la imagen.

2.3.7 Posicionamiento y rastreo de píxeles.

El algoritmo de correlación de imágenes digitales (DIC), calcula los desplazamientos para todos los Puntos de Interés, definidos dentro de una Región de Interés particular de una Imagen de Referencia (ver Figura 25). Para realizar una medición utilizando un algoritmo DIC, el primer paso es tener una probeta adecuada a los requerimientos del algoritmo para el reconocimiento de desplazamientos de la muestra estudiada. Esto es, utilizar un patrón de manchas sobre la probeta, el cual permita la búsqueda y reconocimiento de un subconjunto "n" de píxeles en la imagen sometida a deformación, previamente definidos en la imagen original, como se gráfica en la Figura 26.

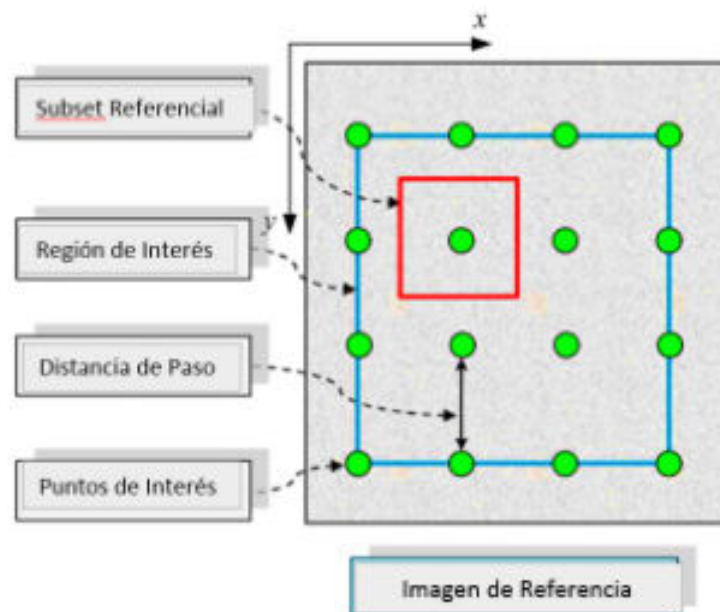


Figura 25 Parámetros de análisis software DIC.

Fuente: Obtenido de Poissant (2007)

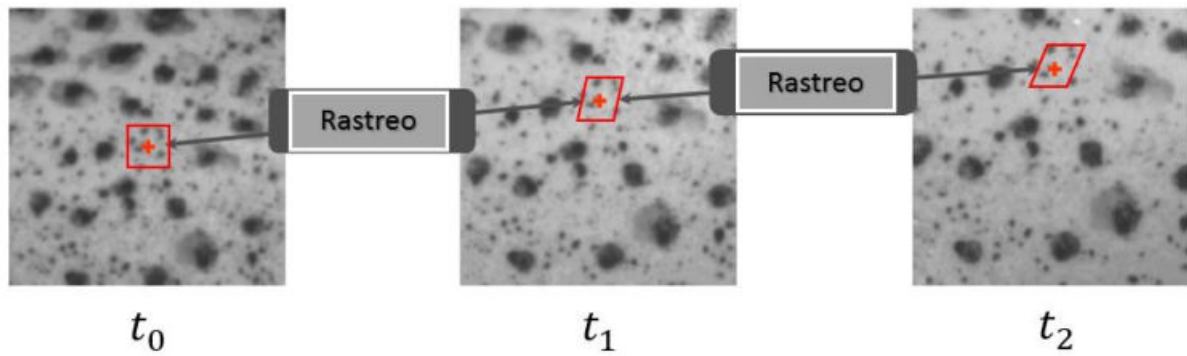


Figura 26 Seguimiento del desplazamiento de un subconjunto de píxeles, definidos en la imagen original en el tiempo t_0 y rastreados en la imagen sometida a deformación en el tiempo t_2 .

Fuente: Obtenido de Poissant (2007)

Cada subconjunto de píxeles definidos en la imagen de referencia, tiene un valor característico asociado, el cual lo diferencia de otros subconjuntos. Para encontrar la nueva ubicación del subconjunto de la imagen de referencia, se debe definir este valor y algún criterio de similitud que se maximice al reconocerlo en la imagen objetivo, obteniendo así el desplazamiento. Por lo general, se utiliza el valor de la escala de grises para reconocimiento del subconjunto y como criterio se utilizan funciones de correlación.

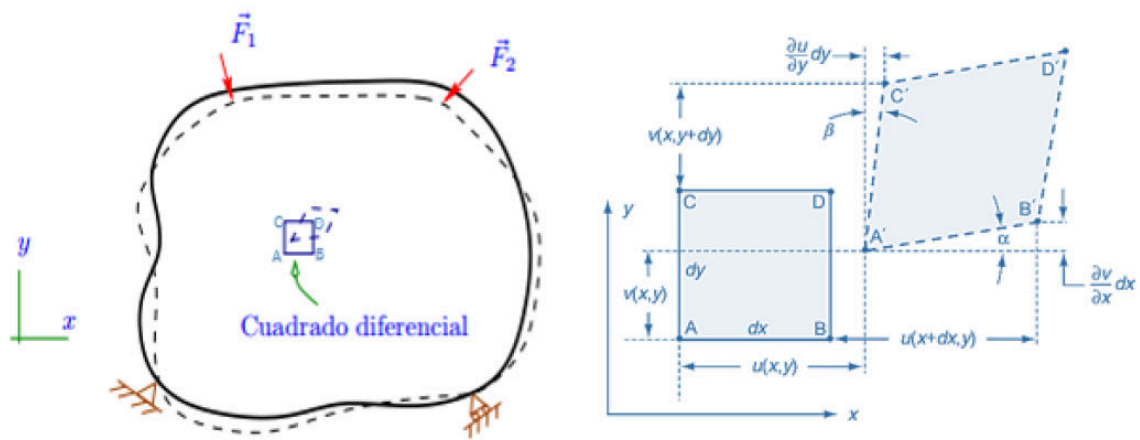


Figura 27 Esquema de deformación teórica de un cuerpo sometido a fuerzas externas.

Fuente: Obtenido de Jones y Iadicola (2018).

En cualquier cuerpo sometido a algún esfuerzo que propicie deformación del mismo (Figura 27 izquierda), se producirán desplazamientos de los puntos $P(x_0, y_0)$ originales que conforman dicho cuerpo. En este cuerpo, el campo de desplazamiento puede ser definido como el campo vectorial que para cada punto (x, y) indica cuanto se mueve dicho punto al deformarse a su nueva ubicación en $P(x^*, y^*)$. Formalmente, esto se define según las ecuaciones 2.16 y 2.17

$$x^* = x + u(x, y) \quad (2.16)$$

$$y^* = y + v(x, y) \quad (2.17)$$

Donde x e y , corresponden a las coordenadas de los puntos originales; x^* e y^* corresponden a las coordenadas de los puntos originales; $u(x, y)$ y $v(x, y)$, definen los desplazamientos horizontales y verticales respectivamente. Realizando una expansión de Taylor en torno al punto $P(x_0, y_0)$, las Ecuaciones 2.16 y 2.17 se pueden reescribir como:

$$x^* = x_0 + u_0 + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Delta x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Delta y^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \Delta x \Delta y \quad (2.18)$$

$$y^* = y_0 + v_0 + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \Delta x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \Delta y^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \Delta x \Delta y \quad (2.19)$$

Donde x_0 e y_0 son las coordenadas del punto inicial que se evalúa en la serie de Taylor; Δx corresponde a la diferencia entre $(x - x_0)$ y Δy a la diferencia $(y - y_0)$; u_0 y v_0 son los componentes que definen la traslación del punto $P(x_0, y_0)$. Como en general se trabaja con deformaciones pequeñas, los términos de mayor orden se desprecian, quedando así la siguiente expresión que define los desplazamientos horizontales y verticales respectivamente:

$$x^* = x_0 + u_0 + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \quad (2.20)$$

$$y^* = y_0 + v_0 + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \quad (2.21)$$

Para el caso bidimensional esquematizado en la Figura 27, se puede analizar un elemento infinitesimal de forma rectangular, el cual sufrirá deformaciones debido a las fuerzas externas y a restricciones de desplazamiento a las que está sometido. De esta forma, el elemento $ABCD$ ilustra el cuadrado diferencial antes de ser sometido a esfuerzos y el elemento romboideo

$A'B'C'D'$ de líneas segmentadas lo describe luego de ser sometido a esfuerzos.

El punto de referencia A se sitúa en las coordenadas (x, y) , así como los desplazamientos horizontales $u(x, y)$ y verticales $v(x, y)$. Por otra parte, para el punto B ubicado en $(x + dx, y)$, los desplazamientos horizontales corresponden a $u(x + dx, y)$ y los verticales a $v(x + dx, y)$. De manera análoga, se pueden definir los desplazamientos de los otros puntos de referencia. De acuerdo a la teoría de pequeños desplazamientos, se puede aproximar $u(x + dx, y) \approx u(x, y) + \frac{\partial u}{\partial x} dx$ y de manera análoga se puede hacer para el resto de los puntos.

En la definición de esfuerzos pequeños, la deformación normal horizontal es el cambio en el largo del elemento dividido por su largo inicial, lo que se puede traducir en la expresión 2.22, la cual es análoga para las otras dimensiones. Esta se define como:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{A'B' - AB}{AB} \quad (2.22)$$

Donde $A'B'$ y AB corresponden a los elementos de línea representados en la Figura 27. Haciendo un análisis geométrico y siendo consecuente con la aproximación de pequeñas deformaciones (despreciando términos de mayor orden), se tiene la siguiente expresión:

$$A'B' = \sqrt{\left(dx + \frac{\partial u}{\partial x} dx\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} dx\right)^2} = \sqrt{1 + 2\frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2} dx \approx \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right) dx \quad (2.23)$$

por lo que, como AB corresponde a dx (Figura 27), la expresión 2.22 se puede reescribir como:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.24)$$

Donde ε_{xx} corresponde a las deformaciones normales horizontales, y de forma análoga se tiene que la deformación normal vertical queda definida como:

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.25)$$

Donde ε_{yy} corresponde a las deformaciones normales verticales, por lo que la derivada parcial viene a ser el gradiente del desplazamiento, es decir, la representación de cómo varían los

desplazamientos a través del material.

Por otra parte, las deformaciones de corte están relacionadas con el cambio de ángulos que sufre el elemento diferencial. Si de nuevo se analiza la Figura 27 en la derecha, se puede observar que los ángulos α y β describen la deformación de corte, por lo que su definición queda acotada por el promedio de ambos como:

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\alpha + \beta}{2} \quad (2.26)$$

Bajo el supuesto de que las deformaciones son pequeñas, también los ángulos lo son, por lo que $\alpha \approx \tan(\alpha)$ y $\beta \approx \tan(\beta)$, así también los términos derivativos $\frac{\partial u}{\partial x} \ll 1$. Considerando lo anterior y haciendo un análisis geométrico se tiene que:

$$\tan(\alpha) = \frac{\frac{\partial v}{\partial x} dx}{dx + \frac{\partial u}{\partial x} dx} = \frac{\frac{\partial v}{\partial x}}{1 + \frac{\partial u}{\partial x}} \approx \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.27)$$

de manera análoga se puede demostrar:

$$\tan(\beta) \approx \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.28)$$

Donde finalmente:

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2.29)$$

por lo que las deformaciones de corte quedan definidas como ε_{xy} (Jones & Iadicola, 2018).

Capítulo III

Metodología de la Investigación

En este capítulo se desarrolló el procedimiento para la obtención de las imágenes digitales durante los ensayos mecánicos de compresión y tracción. Asimismo, se describen los cálculos realizados mediante la técnica DIC para la obtención de los mapas de deformación.

3.1 Enfoque

La presente investigación presenta un **enfoque cuantitativo**, debido a que se analizaron las deformaciones obtenidas en cada muestra mediante la técnica DIC, las cuales serán validadas estadísticamente y comprobadas mediante valores teóricos, además las hipótesis planteadas en la presente investigación fueron contrastadas mediante este enfoque puesto que se trata de una investigación objetiva y rigurosa en la que los resultados numéricos son significativos como son las deformaciones.

3.2 Nivel de investigación

El nivel de la presente investigación es del **tipo descriptivo**, puesto que se intervienen los parámetros de la técnica de correlación de imágenes DIC con el objetivo de mejorar el grado de precisión de las deformaciones.

3.3 Diseño de investigación

El diseño de la presente investigación es del **tipo pre-experimental**, pues no se está manipulando directamente la variable independiente.

3.4 Población y muestra

El universo de estudio para la presente investigación está conformado por todos los materiales diseñados para resistir esfuerzos de compresión y tracción, y se consideró para la población: ladrillos artesanales tipo II elaborados en la Ciudad de Huamanga y para los elementos

diseñados para resistir esfuerzos de tracción se utilizó planchas de acero A36 obtenidas en una distribuidora local en la Ciudad de Huamanga.

3.4.1 Muestra del estudio

Según las características de la investigación que se plantea se toma **muestras no probabilísticas**, por lo tanto para determinar las constantes elásticas de un material mediante la técnica DIC, para elementos sometidos a esfuerzos de tracción se ensayaron probetas de acero A36 cuyas medidas están definidas en la norma ASTM A370 cada una de ellas manufacturadas mediante un equipo de corte por láser en la ciudad de Huamanga y para elementos sometidos a esfuerzos de compresión se ensayaron unidades de albañilería entre ladrillos artesanales Tipo II, ladrillos industriales de 18 huecos tipo IV, además de pilas de albañilería conseguidas de igual manera en la ciudad de Huamanga, esta última considerada como un material compuesto.

Cada muestra de estudio de la presente investigación presentó un recubrimiento de pintura color blanco en su superficie además de un patrón de moteado color negro en forma de salpicaduras, esto como parte importante de la investigación sobre medición mediante la técnica de correlación digital de imágenes, pues es parte fundamental del método.

3.5 Hipótesis

3.5.1 Hipótesis general

1. Si se comparan valores experimentales y datos técnicos del comportamiento elástico de un material, entonces se podrá determinar la precisión de la técnica DIC.

3.5.2 Hipótesis específicas

1. Si se comparan valores experimentales y datos técnicos del coeficiente de Poisson, entonces se podrá determinar la precisión de la técnica DIC en ensayos de compresión axial.
2. Si se comparan valores experimentales y datos técnicos del coeficiente de Poisson, entonces se podrá determinar la precisión de la técnica DIC en ensayos de tracción axial.

3. Si se compara el alargamiento obtenido mediante la técnica DIC y las mediciones de laboratorio, entonces se obtendrá la exactitud para ensayos experimentales de tracción axial.

3.6 Operacionalización de variables

Las variables de investigación son:

- Variable independiente: Técnica de correlación digital de imágenes DIC. (**X**).
- Variable dependiente : Precisión de las deformaciones obtenidas. (**Y**).

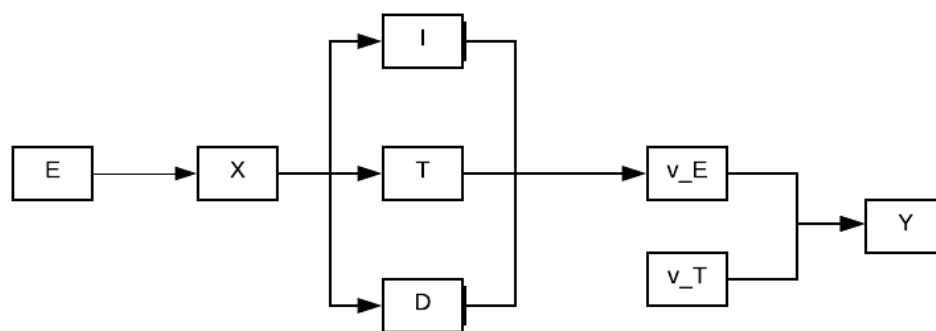


Figura 28 Diseño de investigación.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

- E: Experimentación de laboratorio.
- X: VARIABLE INDEPENDIENTE (Técnica de correlación digital de imágenes (DIC)).
- I: Indicador de iluminación.
- T: Indicador de tamaño de bloque.
- D: Indicador de dimensión del patrón estocástico.
- v_E : Coeficiente de Poisson experimental.
- v_T : Coeficiente de Poisson técnico.
- Y: VARIABLE DEPENDIENTE (Precisión).

VARIABLES	DIMENSION	INDICADORES
Técnica de correlación digital de imágenes	Parámetros internos	Dimensión de bloque
		Dimensión de la región de interés
	Parámetros Externos	Iluminación
		Resolución de cámara fotográfica
		Patrón estocástico
Precisión de las deformaciones obtenidas	Constantes elásticas de un material	Coefficiente de Poisson
		Módulo de Elasticidad

Tabla 2 Operacionalización de las variables .

Fuente: Elaboración propia

3.7 Técnicas e instrumentos

Para obtener los datos en la presente investigación se ha recurrido a lo siguiente:

3.7.1 Técnicas de Investigación

- **Observación** La forma de obtener los datos fue mediante una **observación indirecta** pues en la presente investigación se hace un seguimiento al proceso de rotura mediante una máquina de ensayo universal, con el fin de registrar este proceso de rotura mediante una cámara digital, así obteniéndose registros fotográficos los cuales que serán procesados mediante la técnica de correlación digital de imágenes DIC.
- **Análisis documental** Se usará esta técnica, para obtener información sobre los procedimientos para la realización de los ensayos de materiales en laboratorio según las Normas ASTM E8, ASTM E132, ASTM D370, NTP 350.4050 2015.

3.7.2 Instrumentos Utilizados

Para el caso de la presente investigación se utilizó una cámara fotográfica para obtener los registros digitales o fotografías que vienen a ser los datos a analizarse y la máquina de ensayo universal para obtener datos de carga y desplazamientos.

Por lo tanto, para la obtención de las deformaciones de los elementos sometidos a esfuerzos

de tracción y compresión, los datos que se van a analizar mediante la técnica DIC, son los **registros fotográficos** o imágenes digitales, estas generadas a partir de una **cámara fotográfica**.

Para llegar al objetivo de la tesis, las aplicaciones utilizadas son:

- **”Ncorr”** Ncorr es un programa de código abierto de correlación de imágenes digitales DIC de MATLAB. Tiene una interfaz gráfica de usuario accesible e intuitiva, utiliza muchos algoritmos DIC 2D novedosos, está totalmente contenido en el entorno de MATLAB y contiene herramientas de ploteo para la creación de figuras.
- **MATLAB** Es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M).



Figura 29 Cámara digital Canon EOS Rebel T6i de 18MP.

Fuente: Elaboración propia

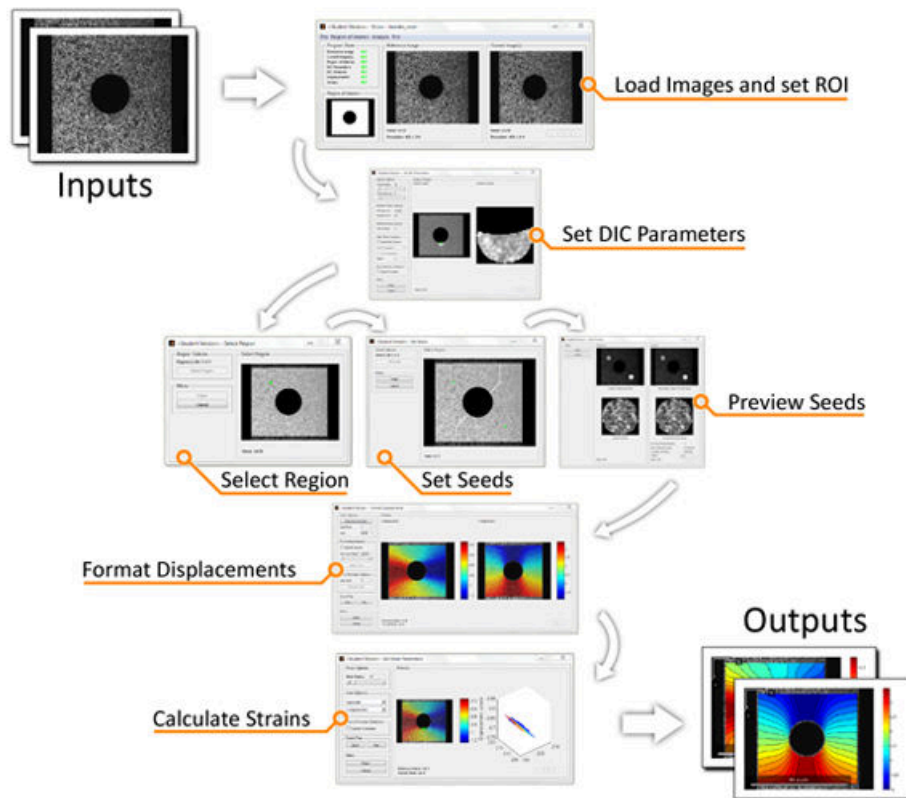


Figura 30 Software de correlación digital de imágenes - NCorr.

Fuente: Imagen extraída de <http://www.ncorr.com>.

3.8 Desarrollo del trabajo de tesis

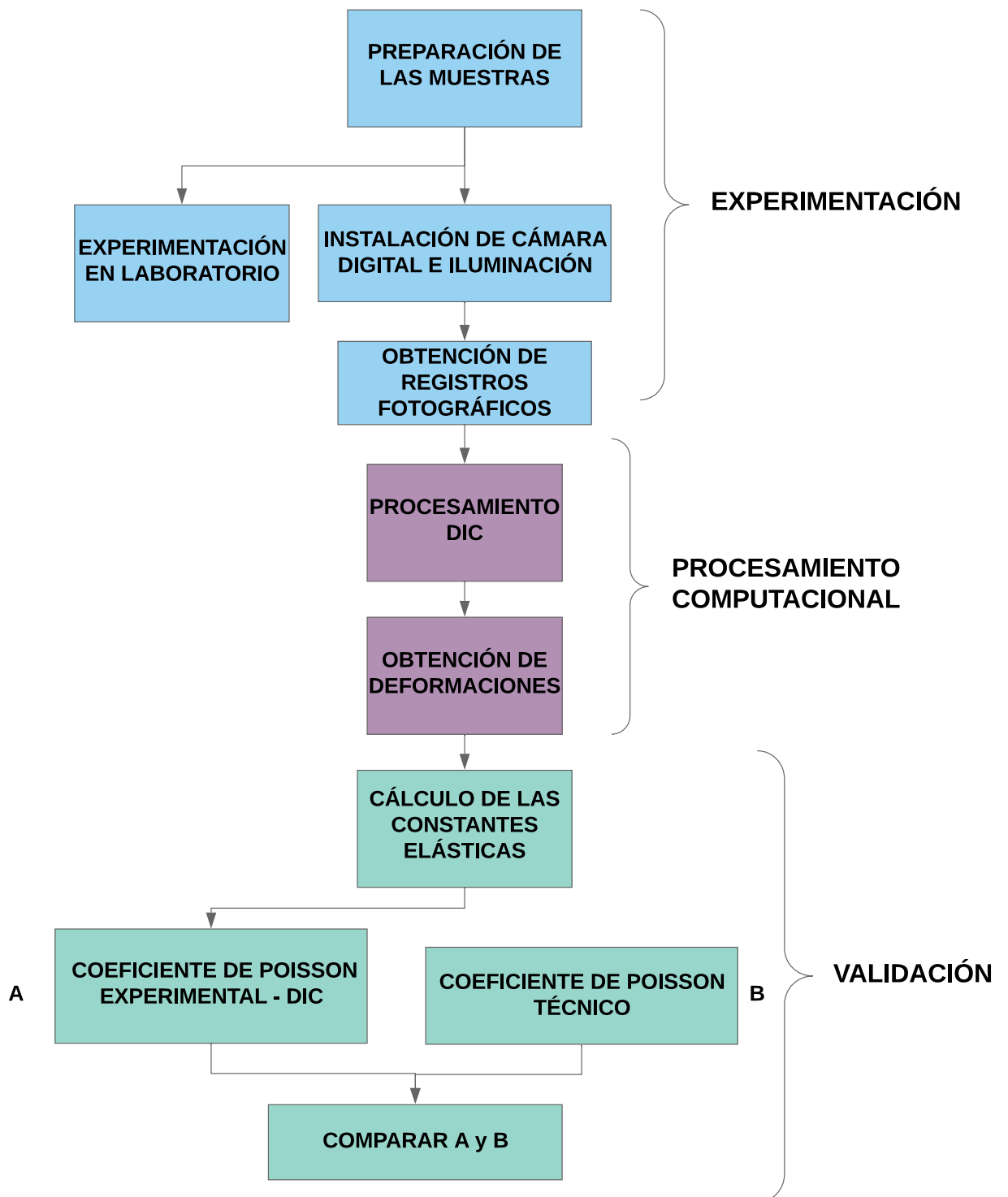


Figura 31 Desarrollo del trabajo de tesis.

Fuente: Elaboración propia.

3.8.1 Introducción

Durante los ensayos mecánicos de tracción y compresión de las muestras, se obtendrán fotografías de manera secuencial, desde un estado no deformado hasta la falla de cada material, estas serán procesadas mediante la técnica DIC para obtener los mapas de deformación. Estas pruebas experimentales se han realizado en el laboratorio de materiales de la Universidad Nacional de Ingeniería y en el laboratorio de tecnología del concreto de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.



Figura 32 Máquina universal "Zwick/Roell SP-1000" - Universidad Nacional de Ingeniería.
Fuente: Elaboración propia.

Primero, se realizaron las pruebas de tracción uniaxial en probetas de acero A36 obteniéndose datos experimentales de carga y desplazamiento proporcionados por la máquina de ensayos universal "Zwick/Roell SP-1000". Posteriormente, se realizaron ensayos de compresión uniaxial en unidades de albañilería obteniéndose datos experimentales de carga proporcionados por las máquinas de ensayo universal "TECNOTEST MODENA LS200" Y "PINZUAR PC42D".

Una vez que se ha registrado las imágenes digitales o fotografías de las muestras, se procesan mediante un algoritmo de correlación digital de imágenes o técnica DIC. Dentro de la computadora, la imagen digital se considera una matriz o matriz de valores. En todas las pruebas, se utiliza una cámara de alta resolución con una resolución de 18 MP (5.199 x 3.466 píxeles) para capturar las fotos apropiadas de las muestras.



Figura 33 Prensa Hidráulica "Tokyokoki Seizoshō" para los ensayos de compresión.
Fuente: Elaboración propia.

3.8.2 Muestras

Para indicar la muestra usada en cada ensayo experimental, todos los especímenes han sido categorizados según el tipo de esfuerzo aplicado, la dimensión y patrón de moteado de la siguiente manera:

- **Probetas planas de acero A36 para ensayos de tracción.**

Las muestras empleadas para los ensayos de tracción, fueron preparadas bajo la norma ASTM A370 "Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products", tal como se indica en la Figura 34 .

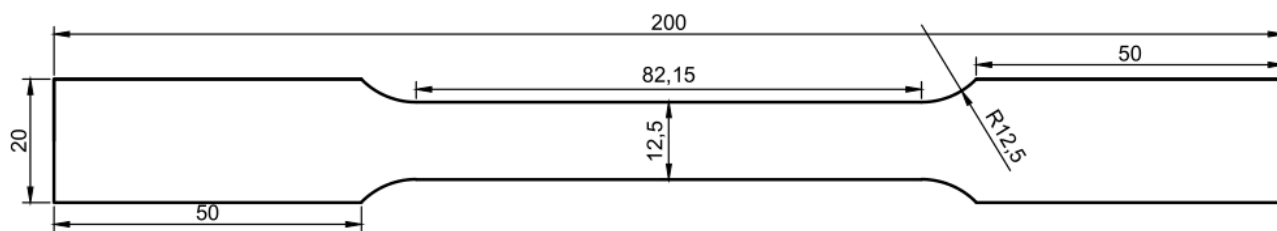


Figura 34 Probeta empleada según las normas (ASTM A370).
Fuente: Elaboración propia.



Figura 35 Probeta con el patrón estocástico.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3 Especificaciones de la probeta para el ensayo de tracción uniaxial (ASTM A370).

Partes de la muestra	Dimensiones
Ancho (W)	12.5 ± 0.2 mm
Radio del filete (R)	12.5 mm
Longitud total (L)	200 mm
Longitud de la sección reducida (A)	82.15 mm
Longitud de la sección de agarre (B)	50 mm
Ancho de la sección de agarre (C)	20 mm
Espesor	8 mm
Longitud de prueba (G)	60± 0.1 mm

El material seleccionado para la fabricación de las probetas fue un acero A36 de bajo contenido de carbono y laminado en caliente.

- **Unidades de albañilería para los ensayos de compresión.**

Las muestras empleadas para los ensayos de compresión uniaxial fueron unidades de ladrillo macizo de tamaño nominal 23x12.5x9 *cm* adquiridas en un distribuidor local en la ciudad de Huamanga, Ayacucho. Se utilizaron muestras de ladrillos industriales Tipo IV de tipo KingKong 18 huecos y artesanales de Tipo II. El ensayo de compresión uniaxial cumple con las especificaciones de NTP 399.605. La Figura 36 muestra las unidades típicas de ladrillo pintadas y preparadas para el ensayo de compresión.

**Figura 36** Unidad de ladrillo KingKong Tipo IV con el patrón de moteado.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 37 Ladrillos industriales Tipo IV con el patrón de moteado.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4 Datos del ladrillo industrial Tipo IV.

Tipo de ladrillo: Ladrillo king Kong 18 huecos
Usos: Muros portantes
Medidas: 23cm x 12.5 cm x 9 cm
Peso: 2.1 Kg
Marca: Ladrillos Lark

- **Modo de pintado para las muestras**

La superficie de las muestras que son utilizadas en los ensayos de compresión y tracción deben presentar una imagen con una distribución aleatoria de intensidad en escala de grises, es decir un patrón de puntos irregularmente distribuidos, conocido como patrón “speckle” o patrón de moteado. Este patrón permite realizar un correcto rastreo de desplazamientos de píxeles en la imagen para su posterior análisis, el patrón indicado puede originarse directamente en la muestra si el color y la textura del material en función del acabado superficial así lo permiten, caso contrario será necesario aplicar una capa de pintura para lograr el patrón “speckle” como se muestra en la Figura 38. Gracias al patrón citado, el software de correlación digital de imágenes es capaz de identificar y calcular los desplazamientos de los píxeles con gran precisión, obteniendo resultados con bajos porcentajes de error y altos coeficientes de correlación. En esta investigación, debido al acabado superficial de los materiales utilizados, se debe generar obligatoriamente el patrón “speckle” con el uso de pintura.

Antes de realizar el patrón “speckle” es necesario limpiar la superficie frontal de las probetas y unidades de albañilería para eliminar la acumulación de grasa y suciedad. La limpieza de la probeta permite una mejor adherencia de la pintura a la superficie del metal, evitando el desprendimiento prematuro de la misma. Una vez limpia la superficie lateral del material, se procede a generar el patrón “speckle” con pintura en spray blanca y negra.

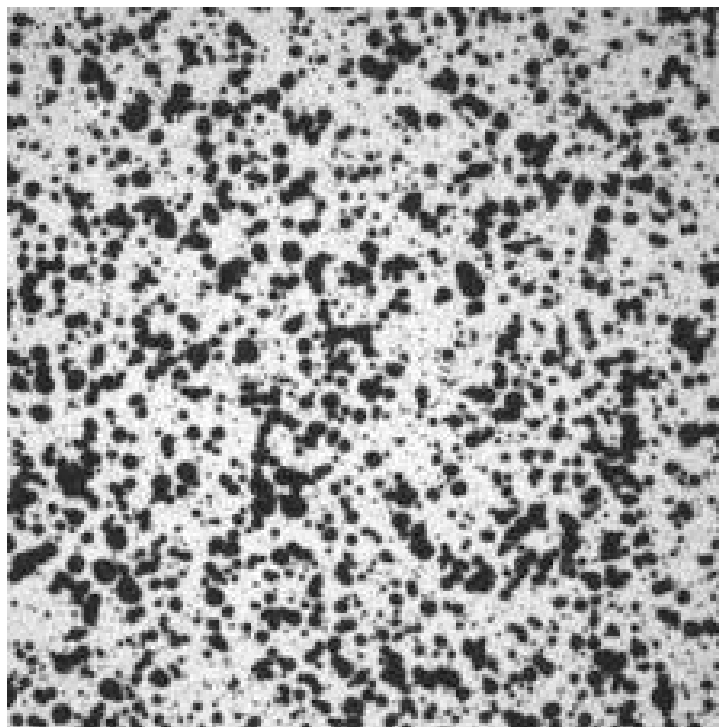


Figura 38 Patrón de moteado o “speckle”.

Fuente: Elaboración propia

El procedimiento, para la elaboración de este patrón se explica a continuación:

1. Aplicar cuatro capas de pintura color blanco mate sobre la superficie lateral de muestra. La pintura se debe aplicar desde una distancia de 15 centímetros de la muestra. Al colocar las capas de pintura, se debe evitar la formación de burbujas y grumos de pintura sobre la superficie. Cada capa de pintura debe curar (endurecimiento o secado) por un período de 30 minutos, antes de la aplicación de la siguiente.
2. Para generar el patrón “speckle” en la muestra, se debe aplicar cuatro capas de pintura color negro mate sobre las capas de pintura blanca, a una distancia de 30 centímetros y a un ángulo de 45 grados respecto a la superficie de la muestra. En la Figura 38, se puede observar el patrón “speckle” utilizado para la correlación digital de imágenes de las muestras a estudiar.



Figura 39 Técnica de aplicación del patrón de manchas con cepillo.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 40 Muestras de albañilería finales para los ensayos de compresión.

Fuente: Elaboración propia.

3.8.3 Montaje experimental

En la Figura 41 se ve un esquema del montaje de un ensayo de tracción uniaxial donde las deformaciones se miden utilizando la técnica de correlación de imágenes DIC. El extremo inferior de la probeta está sujeto por una mordaza fija mientras que el superior está sujeto por una mordaza que puede desplazarse verticalmente y que, por tanto, es la que aplica la deformación que termina rompiendo la probeta.

Esta mordaza superior está unida a la máquina de tracción mediante una rótula que permite libremente el giro; de esta manera se garantiza una correcta aplicación de la carga sin añadir esfuerzos adicionales sobre la probeta.

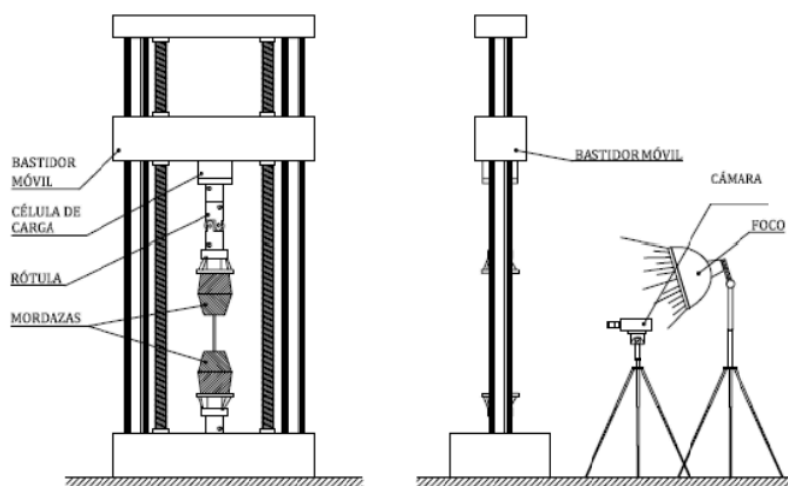


Figura 41 Esquema del montaje para un ensayo de tracción.

Fuente: Elaboración propia.

Las plataformas de pruebas diseñadas para realizar los experimentos, se ilustra en las Figuras 42,43,44. La plataforma del experimento consta de los siguientes componentes: Máquina de ensayos universal "Zwick/Roell SP-1000" para los ensayos de tracción, para los ensayos a compresión las máquinas "Tokyokoki Seizosho D200", "PINZUAR PC42D" y "TECNOTEST MODENA LS200", una cámara digital Canon EOS Rebel T6i de 18MP con un lente de 18.55 mm, un trípode, dos luces Led de alta intensidad, las probetas y unidades de albañilería con el patrón "speckle".

Máquinas de ensayo para las pruebas de compresión y tracción.

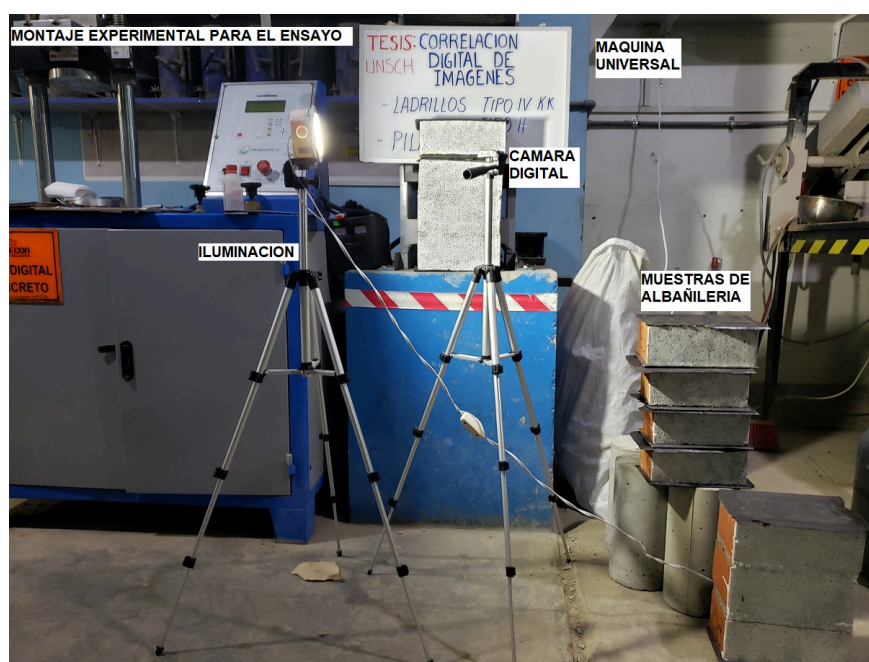


Figura 42 Montaje experimental para el ensayo de compresión - MAQUINA DE ENSAYOS UNIVERSAL: "PINZUAR PC42D INGEOTECON".

Fuente: Elaboración propia.



Figura 43 Montaje experimental para el ensayo de compresión - MAQUINA DE ENSAYOS UNIVERSAL: "TECNOTEST MODENA LS200-UNSCH".

Fuente: Elaboración propia.



Figura 44 Montaje experimental para el ensayo de tracción - MAQUINA DE ENSAYOS UNIVERSAL: "Zwick/Roell SP1000 - UNI".

Fuente: Elaboración propia

Las muestras con el patrón "speckle" fueron montadas en las máquinas de ensayo universal. Con la muestra acoplada en el equipo, se ubicó las luces Led en la parte lateral de la máquina de ensayo enfocando la pieza, tal como se muestra en la Figura 42. El objetivo de usar las luces led es para incrementar y mejorar el contraste de las imágenes. Por otra parte, se monta la cámara digital en un trípode, asegurándose fijación, que esté nivelada y se ubica el lente de la cámara a una distancia de 30 centímetros de la muestra.

Finalizado el montaje del experimento, se procede a configurar las opciones de la cámara, para obtener una imagen clara y con alto contraste. En la Tabla 5 se especifican dichas configuraciones.

Configuración	Valor
Valor ISO	500
Distancia focal F	F5.6
Intervalo de obturación	1 segundo
Velocidad de obturación	1/200

Tabla 5 Configuración de la cámara digital.

3.8.4 Protocolo experimental de la técnica de correlación digital de imágenes

Los siguientes pasos son un resumen del procedimiento a realizar durante la prueba de tracción uniaxial y compresión uniaxial. Este protocolo está destinado para una prensa hidráulica o maquina universal de ensayos, una cámara digital y el software de correlación de imágenes: Gom Correlate y NCorr. Si se utiliza para implementar el método de correlación digital de imágenes, debe adaptarse de acuerdo con las condiciones experimentales y el equipo utilizado.

A. Preparación de las muestras:

1. Limpieza y desengrase de las muestras a ensayar;
2. Aplique pintura en aerosol blanca sobre la superficie a analizar y deje secar por un momento;
3. Aplicar salpicaduras de pintura en aerosol negro para crear un patrón aleatorio, pero uniformemente aplicado en la superficie de la muestra.

B. Montaje experimental:

1. Coloque la muestra en la máquina de ensayos;
2. Coloque la cámara sobre el trípode y ajuste su altura y distancia de la muestra. Verifique con un nivel si la línea de visión de la cámara es perpendicular al plano de la superficie de la pieza de prueba y si la imagen está correctamente enmarcada;
3. Configure la iluminación para que no cause reflejos de luz o sombras. Si no se utiliza iluminación, omita este paso;
4. Compruebe el enfoque de la cámara y tome algunas fotos de prueba para asegurarse de que la imagen esté enfocada, reflectante, alineada y perpendicular a la muestra;
5. Conecte la cámara a la computadora que contiene el software de captura de imagen remota y ajuste los parámetros de frecuencia de almacenamiento y captura de imagen.

3.8.5 Ensayos de tracción uniaxial

Se realizaron las pruebas de tracción en la máquina de ensayos universal "Zwick/Roell SP-1000". La máquina universal cuenta con una fuerza de carga máxima de 100 toneladas y está equipada con dispositivos de medición de carga y desplazamientos. El software de la máquina permite el registro, con una alta frecuencia de adquisición de los siguientes datos: Carga Kg , desplazamiento mm y el tiempo s . La velocidad de carga fue de 25 mm/min en los ensayos de tracción.



Figura 45 MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSAL: "Zwick/Roell SP1000 -UNT".

Fuente: Elaboración propia.

Para realizar el ensayo, se sujetan los extremos de la probeta a ensayar en una máquina que permite imponer un desplazamiento relativo de éstos a una velocidad constante. A través de una célula de carga, la máquina proporciona registros de la evolución de la carga aplicada, así como del desplazamiento relativo de los extremos.

Ensamblada la plataforma final de pruebas, se procede a realizar el ensayo de tracción. La tasa de desplazamiento programado en la máquina de tracción fue de 25 mm / min, de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM A370.

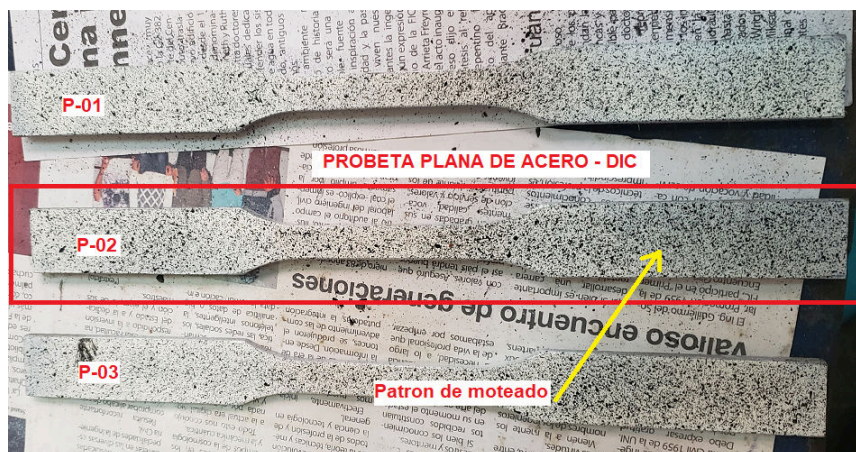


Figura 46 Probeta seleccionada para la investigación (ASTM A370).

Fuente: Elaboración propia

Se obtendrán las gráficas esfuerzo-deformación del material a partir de los registros de la carga aplicada y del desplazamiento relativo. A la hora de obtener esta gráfica esfuerzo-deformación se suele manejarse el concepto de esfuerzo y deformación ingenieril.

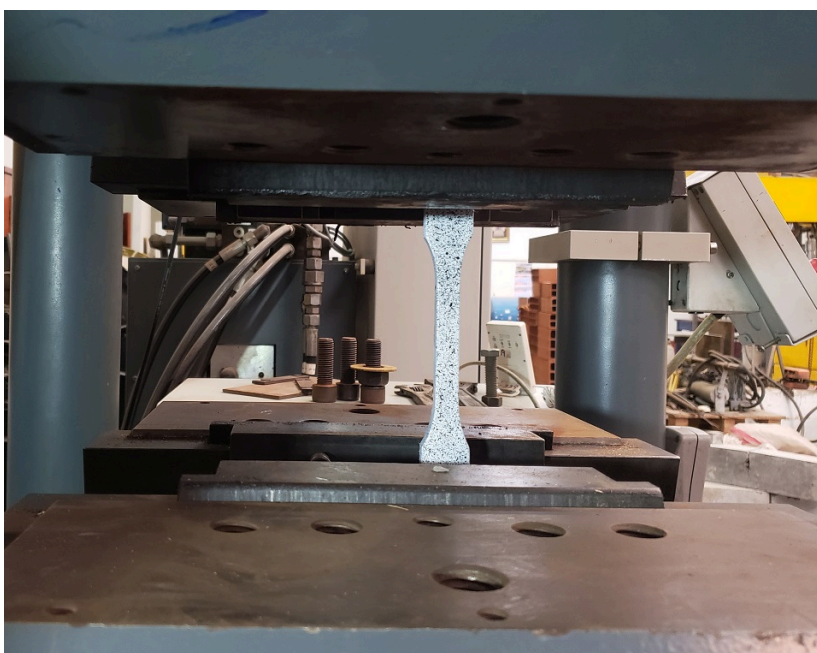


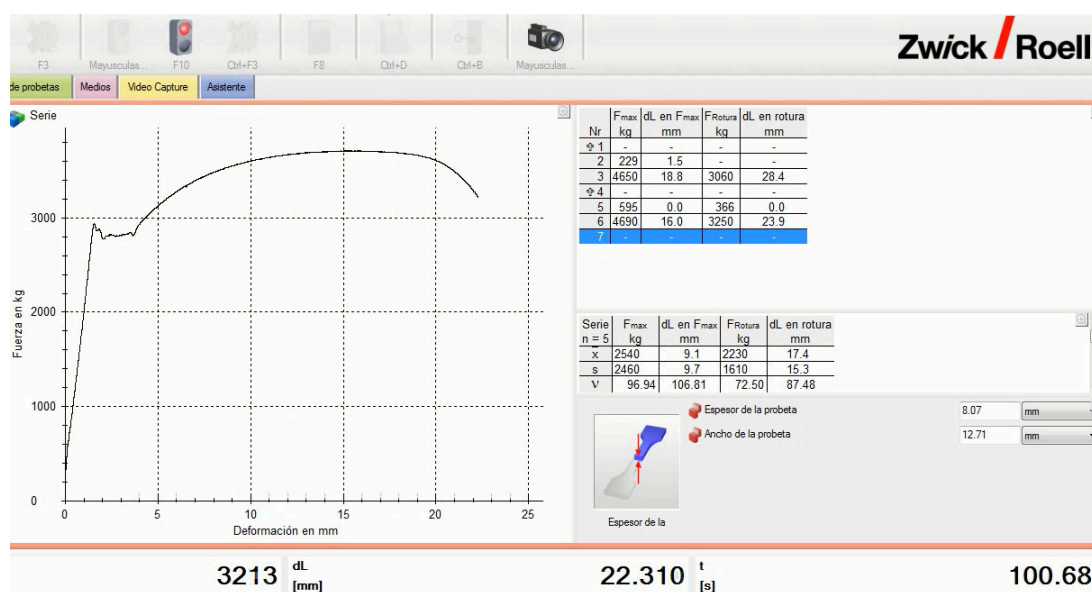
Figura 47 Probeta de acero sujeta a la maquina de ensayos.

Fuente: Elaboración propia.

Simultáneamente a la aplicación de la carga en el ensayo de tracción con la maquina “Zwick-/Roell SP1000 -UNI”, se registran las imágenes digitales para cada instante del ensayo de tracción, desde un estado inicial de deformación hasta la rotura de la probeta, terminando así el procedimiento experimental, cabe resaltar que para la obtención de las imágenes digitales se hace uso de trípode y un juego de luces para iluminación.

Tabla 6 Datos iniciales de las probetas.

Datos Iniciales P-01		Datos Iniciales P-02		Datos Iniciales P-03	
Longitud Recta	130 mm	Longitud Recta	130 mm	Longitud Recta	130 mm
Longitud Inicial	60 mm	Longitud Inicial	60 mm	Longitud Inicial	60 mm
Espesor de probeta	7 mm	Espesor de probeta	7mm	Espesor de probeta	5.8 mm
Ancho de probeta	12.71 mm	Ancho de probeta	12 mm	Ancho de probeta	12 mm

**Figura 48** Software testXpertII de la maquina universal Zwick/Roell SP-1000.

Fuente: Elaboración propia

Durante todo el ensayo experimental, la resolución de las imágenes capturadas fue de 5184 x 3456 pixeles, con un tamaño de 6.22 MB aproximadamente. Todas las imágenes fueron tomadas sobre la cara frontal de las probetas en relación a su posición de montaje en la máquina de ensayos universal.

Los datos resultantes de las pruebas de tracción, fueron recolectadas por el software "Horizon" de la máquina de tracción "Zwick/Roell SP1000", datos que pueden ser exportados en formato .CSV, para su posterior análisis en otro software especializado compatible.

3.8.6 Ensayos de compresión uniaxial

Los ensayos de compresión uniaxial se realizaron en ladrillos industriales tipo IV de 18 huecos y ladrillos artesanales tipo II de la región Ayacucho. Antes de ensayar cada ladrillo se tomaron todas sus medidas para tener una correcta caracterización geométrica de los mismos.



Figura 49 Muestras de albañilería para los ensayos de compresión.

Fuente: Elaboración propia.

Luego, con el fin que las bases del ladrillo resulten superficies planas y paralelas entre sí, y al mismo tiempo normales al eje longitudinal del ladrillo, se realizó un encabezado o "capeo" menor a cinco milímetros con una capa de adhesivo para cerámica. Además, se introdujo una placa rígida de acero entre el ladrillo y la celda de carga, logrando así una distribución uniforme de la carga aplicada, evitando la concentración de tensiones.



Figura 50 Toma de medidas de las unidades de albañilería.

Fuente: Elaboración propia.

INGEOTECON

VARIACION DIMENSIONAL
(NTP 399.613 Y NTP 339.604)

PROYECTO: TESIS: CORRELACION DIGITAL DE IMAGENES - UNSCH - BACH: YURI A. PANAGUA SEGONIA
FECHA: 19 JUNIO - 2019

MUESTRA	LONGITUD (mm)				ANCHO (mm)				ALTURA (mm)			
	L1	L2	L3	L4	A1	A2	A3	A4	H1	H2	H3	H4
A-1	197	196	198	197	101	102	101	102	75	75	75	77
A-2	196	196	197	197	100	101	101	101	71	72	73	73
A-3	196	196	195	195	101	100	100	101	75	73	77	75
I-1	217	216	217	216	117	118	117	117	80	81	80	81
I-2	217	217	217	216	117	117	117	116	81	80	81	80
I-3	217	218	218	218	117	117	117	117	80	81	81	80
P-1	220	219	219	220	116	117	116	117	288	285	288	287
P-2	220	219	219	219	117	116	116	117	294	295	293	293

Figura 51 Registro dimensional de las unidades de albañilería.

Fuente: Elaboración propia.

El ensayo a compresión axial se realizó con una prensa hidráulica "PINZUAR LTDA" modelo PC42D. La celda de carga se encuentra fija y la carga se aplica a una velocidad de 150 kg/s hasta llegar a la rotura.



Figura 52 Prensa hidráulica "PINZUAR LTDA" modelo PC42D.

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, se realizó un patrón de moteado con pintura en el ladrillo, generando un patrón estocástico de buen contraste para poder medir la deformación mediante la técnica DIC con el software libre "Ncorr". Las imágenes se tomaron utilizando una cámara digital Canon EOS Rebel T6i de 18MP. La ubicación de la cámara es tal que el ladrillo queda en el centro de la imagen, a una distancia fija de 30cm como en la Figura 53.



Figura 53 La ubicación de la cámara - ensayo de compresión axial.

Fuente: Elaboración propia.

La prensa hidráulica "PINZUAR LTDA" modelo PC42D tiene una capacidad máxima de 250 KN. Posteriormente se usó la técnica DIC para obtener la deformación de campo completo de las muestras en diferentes etapas de carga del control de desplazamiento axial.

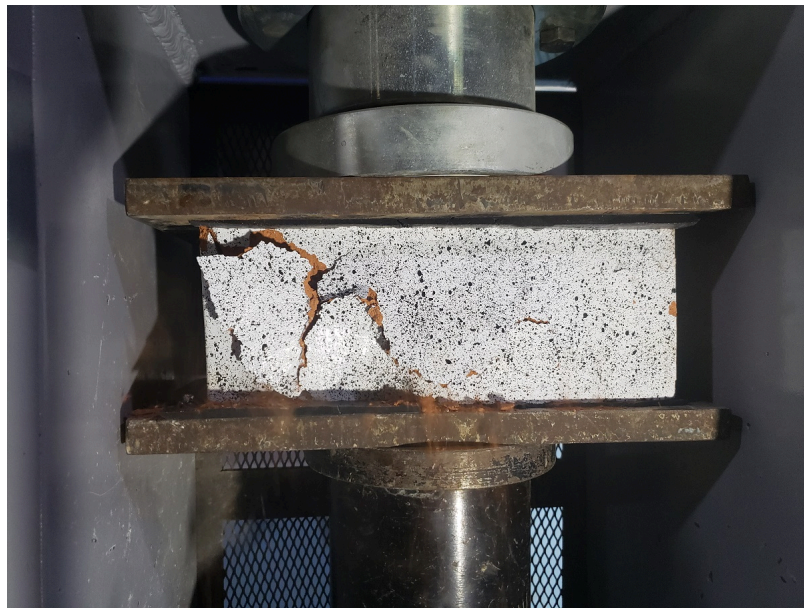


Figura 54 Distribución uniforme de la carga aplicada mediante placas rígidas.

Fuente: Elaboración propia.

El uso del software de correlación digital de imágenes consiste básicamente en importar las fotografías tomadas con la cámara digital, definir la superficie de análisis y luego de elegir los parámetros necesarios, introducir una escala de medición para obtener seguidamente las deformaciones y los desplazamientos horizontales y verticales.

Ensayo de compresión para la medición de desplazamientos en pilas de albañilería

Finalmente, para el presente trabajo de investigación se realizaron ensayos en pilas de ladrillos industriales Tipo IV de 18 huecos. Antes de ensayar cada pila se tomaron todas sus medidas para tener una correcta caracterización geométrica de los mismos. Luego, con el fin que las bases de la pila resulten superficies planas y paralelas entre sí, y al mismo tiempo normales al eje longitudinal del ladrillo, se realizó un encabezado o "capeo" menor a cinco milímetros con una capa de adhesivo para cerámica.



Figura 55 Pila de albañilería para el monitoreo de desplazamientos horizontales y verticales.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 56 Pila de albañilería P-02.
Fuente: Elaboración propia.

Además, se introdujo una placa rígida de acero entre el ladrillo y la celda de carga, logrando

así una distribución uniforme de la carga aplicada, evitando la concentración de tensiones.

3.8.7 Proceso computacional mediante correlación digital de imágenes

Después de terminar los ensayos de tracción y compresión, todas las imágenes tomadas durante los ensayos se importaran en un rutina de código abierto desarrollado en la plataforma MATLAB(®), esta rutina llamada "Ncorr" fue desarrollada por Justin Blaber jblaber3@gatech.edu investigador del Instituto Tecnológico de Massachusetts - USA.

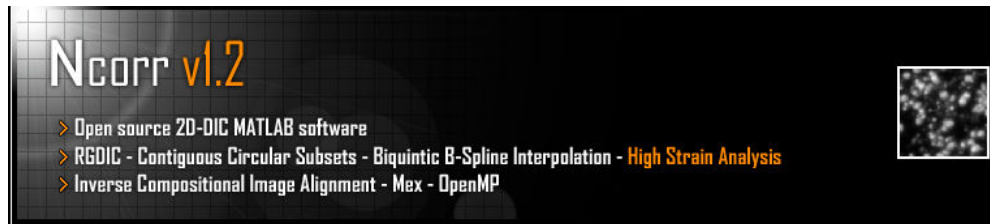


Figura 57 Software DIC.

Fuente: Imagen extraída de <http://www.ncorr.com/>.

Funcionamiento: Una de las cualidades de este software es la claridad y simplicidad con la que se presentan los pasos. En la esquina superior izquierda de la interfaz del programa se encuentra el orden de los diferentes procesos a realizar para llevar a cabo según su precedencia y el orden en que se llevan a cabo los pasos de este método, ver Anexo C .

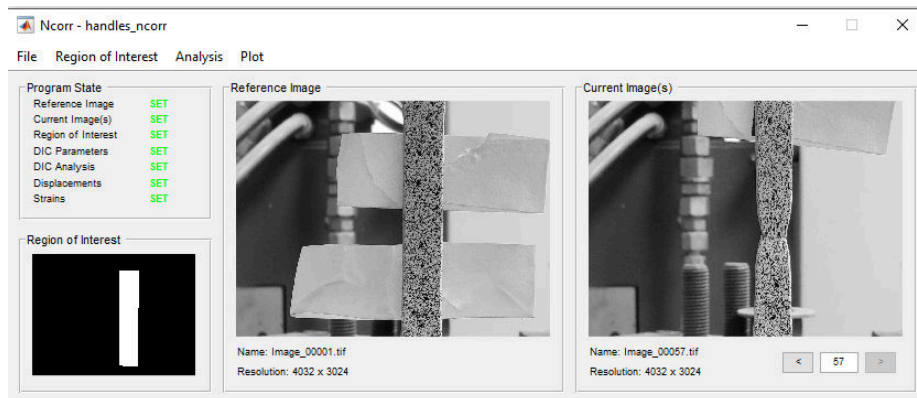


Figura 58 Software Ncorr.

Fuente: Elaboración propia.

Se seleccionan los siguientes parámetros del análisis y se realiza el análisis. Este programa utiliza el algoritmo Newton-Raphson modificado y utiliza las funciones de Correlación cruzada normalizada de costes y mínimos cuadrados normalizados. Todo el procedimiento se realiza de forma sencilla y sin complicaciones y el programa desempeña sus funciones de manera excelente(Blaber, Adair & Antoniou, 2015).



Figura 59 Importación de imágenes en el software Ncorr.

Fuente: Elaboración propia.

Modificación del análisis: En el análisis es posible modificar el radio del bloque (que en este programa presenta forma circular), el paso (que es la distancia en píxeles entre bloques), definir si se trata de un análisis de gran deformación y si se trata de un análisis discontinuo.

Tiempo de procesamiento: El algoritmo procesa aproximadamente 30 imágenes de 5172x1554 píxeles en aproximadamente 1 hora.

Tiempo de Procesamiento - Ncorr			Tiempo de Procesamiento - Ncorr		
Probetas de Acero A36 - ASTM A370			Ladrillos Artesanales / Industriales		
Muestra	N° de Imágenes	Tiempo (s)	Muestra	N° de Imágenes	Tiempo (s)
P-1	62	7200	A-1	23	2761
P-2	57	5102	A-2	18	2163
P-3	58	5760	A-3	35	4202
			I-2	52	6240
			I-3	42	5042
			I-4	21	2525
			I-5	38	4563
			I-6	25	3012
Promedio		6020.7	Promedio		3813.5

Tabla 7 Tiempo de Procesamiento.

3.8.8 Optimización de parámetros en el proceso computacional DIC

En la Figura 60 se muestra cómo influye la densidad del patrón estocástico respecto a pérdida de información, llegando a la conclusión que a mayor densidad del patrón estocástico se obtendrán mejores resultados.

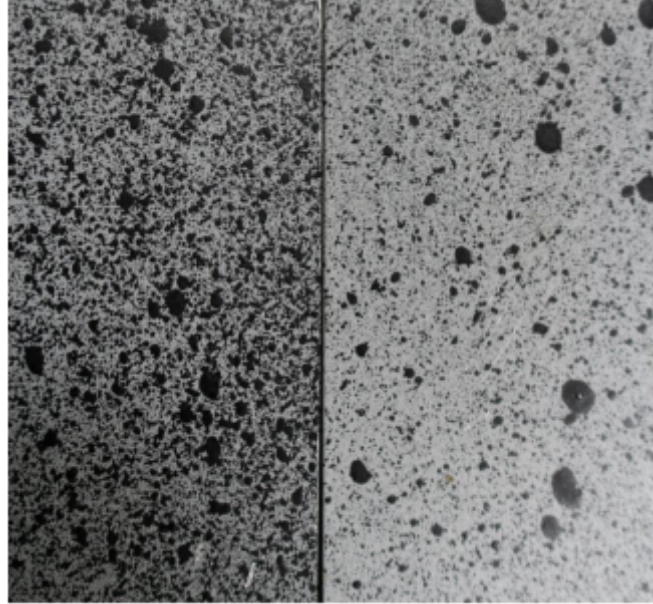


Figura 60 Patrones estocásticos con diferente densidad

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 8 se muestra cómo influye el tamaño del bloque o "subset" respecto al tiempo de procesamiento computacional del algoritmo DIC, mostrándose que para un "tamaño medio" no existirá pérdida de información como muestra la Tabla 9.

Denominacion	Tamaño de bloque o subset (pixeles)	Tiempo de procesamiento (min)
Bajo	10x10	65
Medio	30x30	40
Alto	100x100	17

Tabla 8 Indicador de tamaño de bloque.

En la Tabla 9 se muestra que para un "tamaño grande" del bloque se presenta una cantidad elevada de pérdida de información en los resultados obtenidos, por lo cual el tamaño óptimo del bloque según la relación tiempo-perdida de información es el "tamaño medio".

Denominacion	Tamaño de bloque o subset (pixeles)	Pérdida de información (%)
Bajo	10x10	5
Medio	30x30	0
Alto	100x100	25

Tabla 9 Relación tamaño de bloque - Pérdida de información.

En la Tabla 10 se muestra cómo influye la iluminación respecto a la pérdida de información de los resultados, se muestra que una iluminación "alta" influye negativamente, esto debido a que la pintura acrílica refleja mucho el brillo y esto causa que en las imágenes no se aprecie bien el patrón estocástico.

Iluminación	Pérdida de información (%)
Sin iluminacion	5
Baja	0
Media	0
Alta	30

Tabla 10 Indicador iluminación.

En la Tabla 11 se muestra cómo influye la irregularidad del patrón estocástico respecto a la pérdida de información de los resultados, como se puede apreciar en la Figura 61 existe una desigualdad en el tamaño de los puntos lo cual no es conveniente pues el bloque o "subset" se encontraría dentro del punto estocástico y con una intensidad de color única.

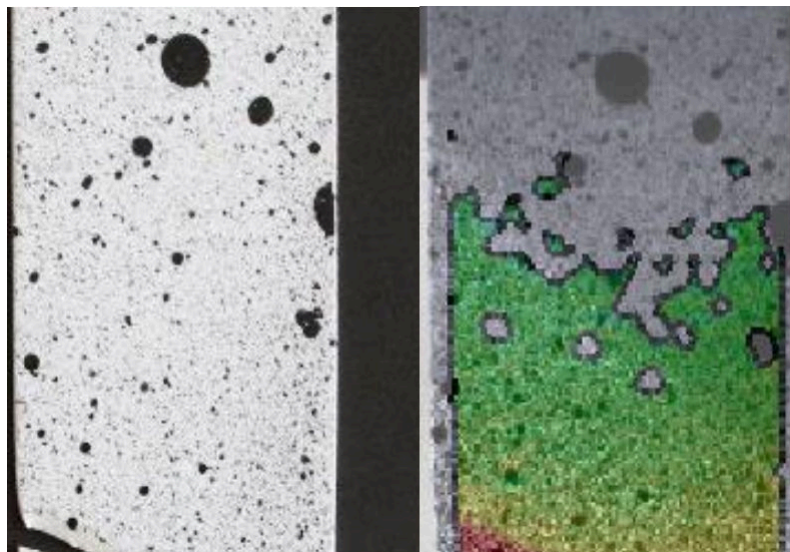


Figura 61 Irregularidad del patrón estocástico.

Fuente: Elaboración propia.

Irregularidad del patron estocastico	Pérdida de información (%)
Baja	0
Media	0
Alta	25

Tabla 11 Irregularidad del patrón estocástico.

En la Tabla 12 se muestra cómo influye la cantidad de núcleos de la computadora en el tiempo de procesamiento, esto debido a que a mayor cantidad de núcleos se reduce considerablemente el número de iteraciones, se puede apreciar en la Figura 61 si se tiene 2 núcleos, se dividiría la cantidad de iteraciones en 2.

Cores (Nucleos)	Tiempo de procesamiento (min)
2	65
4	23
8	13

Tabla 12 Cantidad de núcleos.

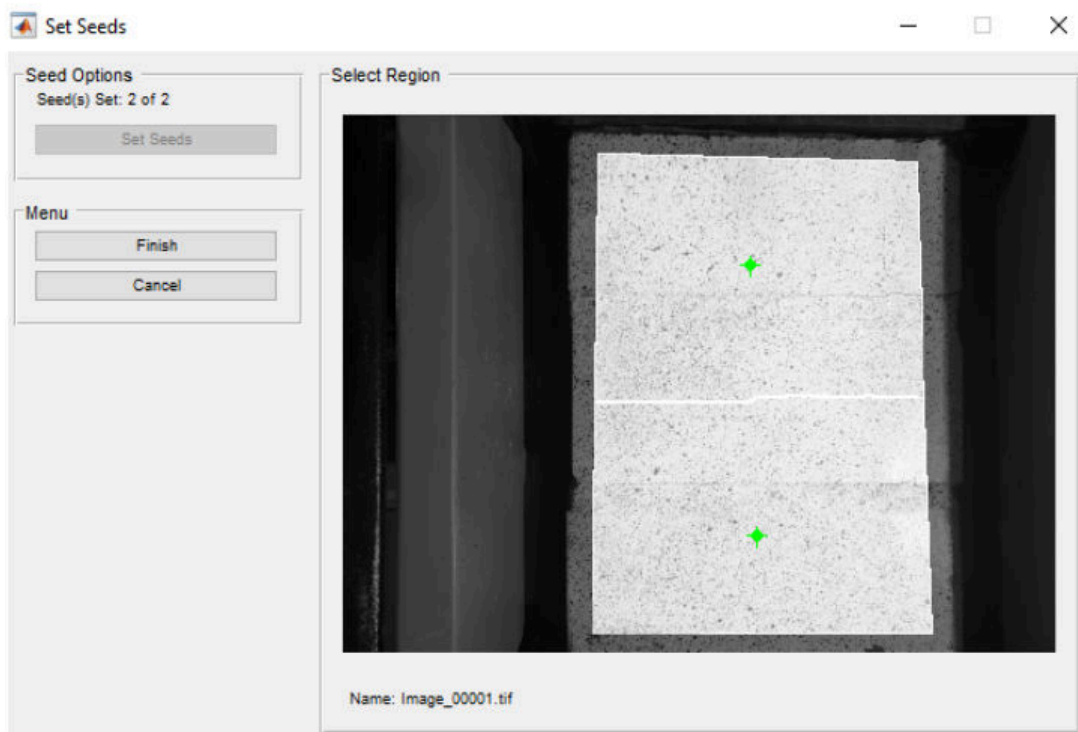


Figura 62 Division en el proceso computacional.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 63 se muestra la diferencia entre el CPU y el GPU, como se mencionó anteriormente si se presentaba una cantidad de 2, 4 ,8 núcleos (CPU) el tiempo de procesamiento se

dividía respectivamente al número de núcleos, para fines de la presente investigación se usó el programa MATLAB, donde el tipo de procesamiento se basa en el uso de los núcleos CPU. Existen otros softwares especializados de correlación digital de imágenes (DIC), donde su procesamiento se basa en el uso del GPU dividiéndose así a la milésima parte del tiempo.

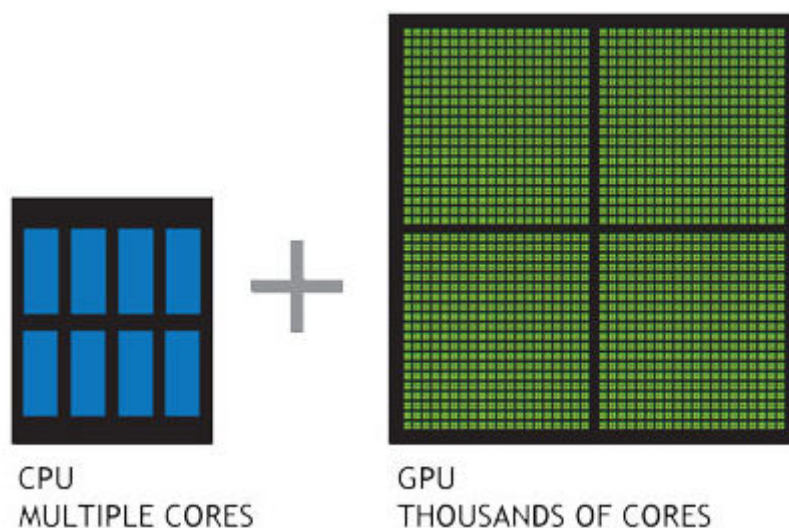


Figura 63 CPU vs GPU.

Fuente: Obtenido de <https://la.nvidia.com/>.

3.8.9 Metodología de validación en ensayos a tracción uniaxial

Para verificar la exactitud de la técnica DIC, se procedió a calcular experimentalmente el coeficiente de Poisson y el módulo de elasticidad de las muestras de acero A36 y compararlas respecto a valores técnicos. Los valores obtenidos con la técnica DIC se muestran en la Tabla 33. En la Tabla 33, se identifica las muestras de acero A36 como material base.

Con ayuda de la máquina de tracción, se obtuvieron valores de carga correspondientes a cada imagen registrada por la cámara digital; lo que permite relacionar las variables de esfuerzo y deformación, para así realizar las gráficas o diagramas del comportamiento mecánico de los materiales empleados en este estudio, considerando los valores de deformación obtenidos a través de la técnica DIC y los valores de carga del registro de la máquina universal de ensayos.

- **Gráficas o diagramas de esfuerzo - deformación ingenieril.**

Se obtuvieron las curvas tensión-deformación del material a partir de los registros de la carga aplicada y del desplazamiento relativo, ofrecidas por la máquina universal Zwick/Roell SP-1000, ver anexo D. A partir de las curvas esfuerzo – deformación de la Figuras 64, 65, 66, se determina las propiedades mecánicas detalladas en las Tablas 13, 14, 15.

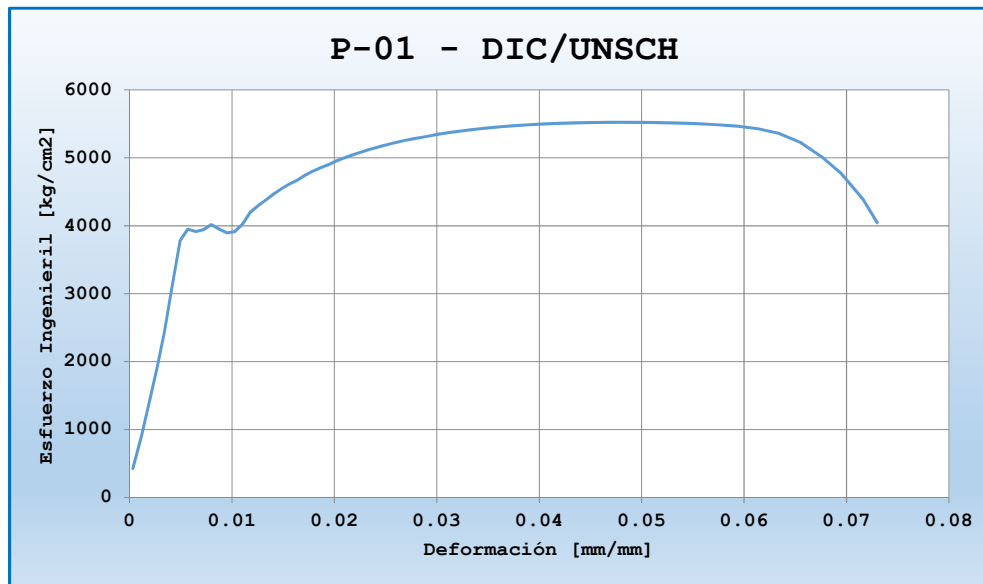


Figura 64 Gráfica Esfuerzo-Deformación Probeta P-01.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13 Propiedades mecánicas P-01.

Propiedades Mecánicas P-01	
Parámetro	
Límite elástico (σ_y)	3950.76 Kg/cm ²
Resistencia a la tracción ($\sigma_{\text{máx}}$)	5524.87 Kg/cm ²
Tensión de tracción a rotura (σ_R)	4044.88 Kg/cm ²
Modulo de elasticidad (Kg/cm ²)	2079868.91 Kg/cm ²
Elongación (Δl) %	36.7%

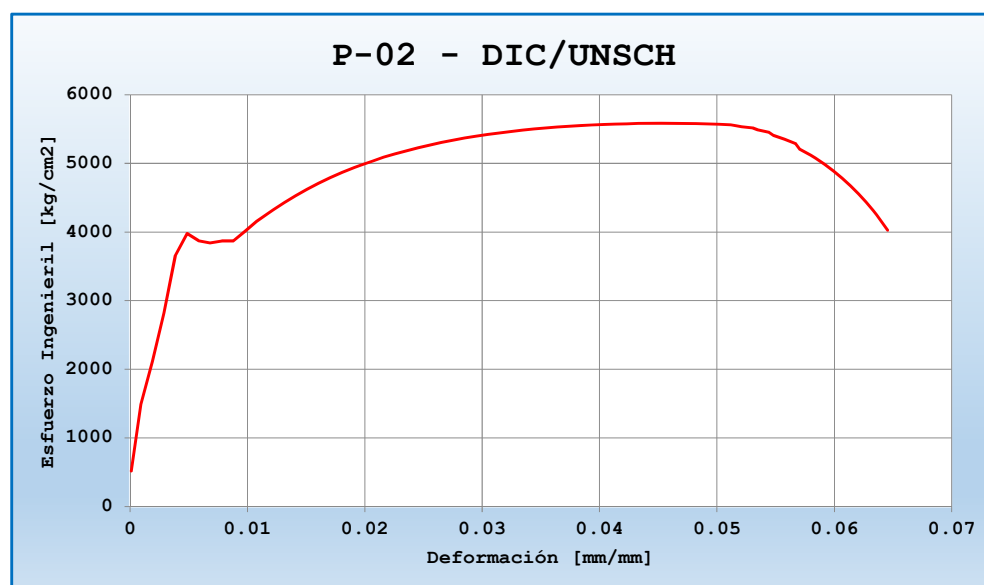
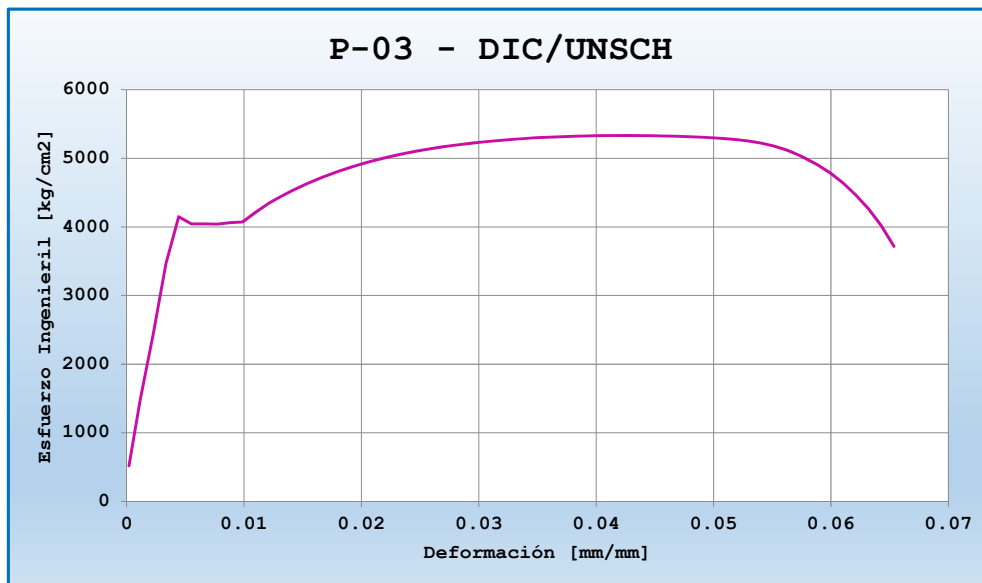


Figura 65 Gráfica Esfuerzo-Deformación Probeta P-02.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14 Propiedades mecánicas P-02.

Propiedades Mecánicas P-02	
Parámetro	
Límite elástico (σ_y)	3976.73 Kg/cm ²
Resistencia a la tracción ($\sigma_{m\acute{a}x}$)	5584.88 Kg/cm ²
Tensión de tracción a rotura (σ_R)	4025.01 Kg/cm ²
Modulo de elasticidad (Kg/cm ²)	2097196.84 Kg/cm ²
Elongación (Δl) %	17.5%

**Figura 66** Gráfica Esfuerzo-Deformación Probeta P-03.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15 Propiedades mecánicas P-03.

Propiedades Mecánicas P-03	
Parámetro	
Límite elástico (σ_y)	4147.52 Kg/cm ²
Resistencia a la tracción ($\sigma_{m\acute{a}x}$)	5332.62 Kg/cm ²
Tensión de tracción a rotura (σ_R)	3714.79 Kg/cm ²
Modulo de elasticidad (Kg/cm ²)	2073764.16 Kg/cm ²
Elongación (Δl) %	33.5%

Los datos completos de carga y desplazamiento para cada probeta ensayada se muestran en el Anexo D.

- Mapas de deformación longitudinales de campo completo ε_{yy} .

Una vez finalizado el post-procesamiento DIC se obtuvieron los mapas de deformación unitaria de las muestras seleccionadas y empleadas en el ensayo experimental de tracción axial.

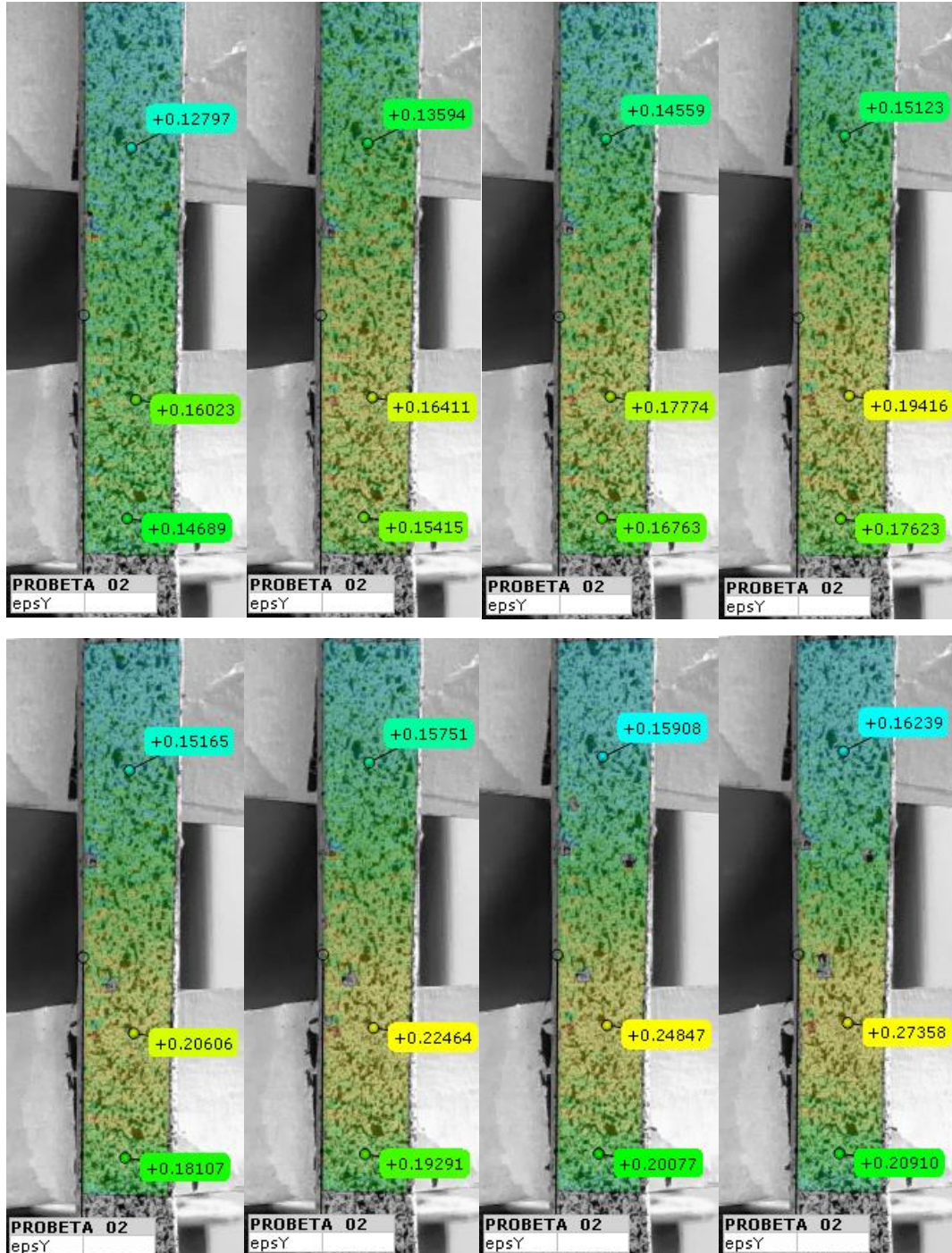


Figura 67 Mapas de deformación longitudinal de la probeta P-02.

Fuente: Elaboración propia.

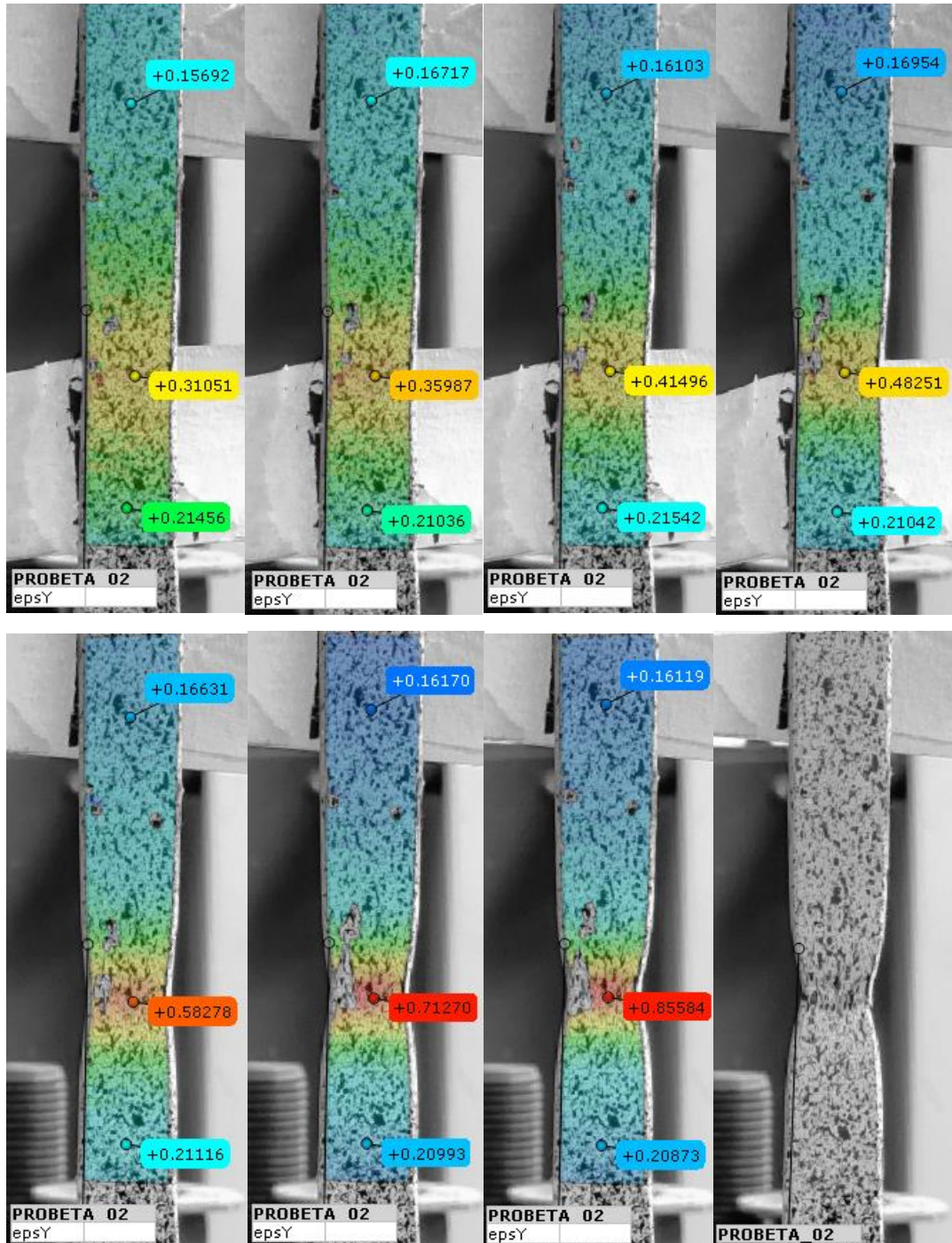


Figura 68 Mapas de deformación longitudinal de la probeta P-02.

Fuente: Elaboración propia.

Para la probeta P-02 se procesaron en total 166 fotografías, obteniéndose los mapas de deformación longitudinal ε_{yy} luego del procesamiento computacional mediante la técnica de correlación digital de imágenes DIC, en las Figuras 67,68 se muestran los 16 últimos mapas de deformación antes de la rotura del material. En cada mapa de deformación, correspondiente a cada fotografía capturada en el ensayo de tracción, se analizaron 3 puntos, uno en la zona de estricción y las otras 2 en los extremos superior e inferior de la probeta, para observar la diferencia de deformación en dichos puntos.

- Mapas de deformación transversales de campo completo ε_{xx} .

Una vez finalizado el post-procesamiento DIC se obtuvieron los mapas de deformación unitaria de las muestras seleccionadas y empleadas en el ensayo experimental de tracción axial.

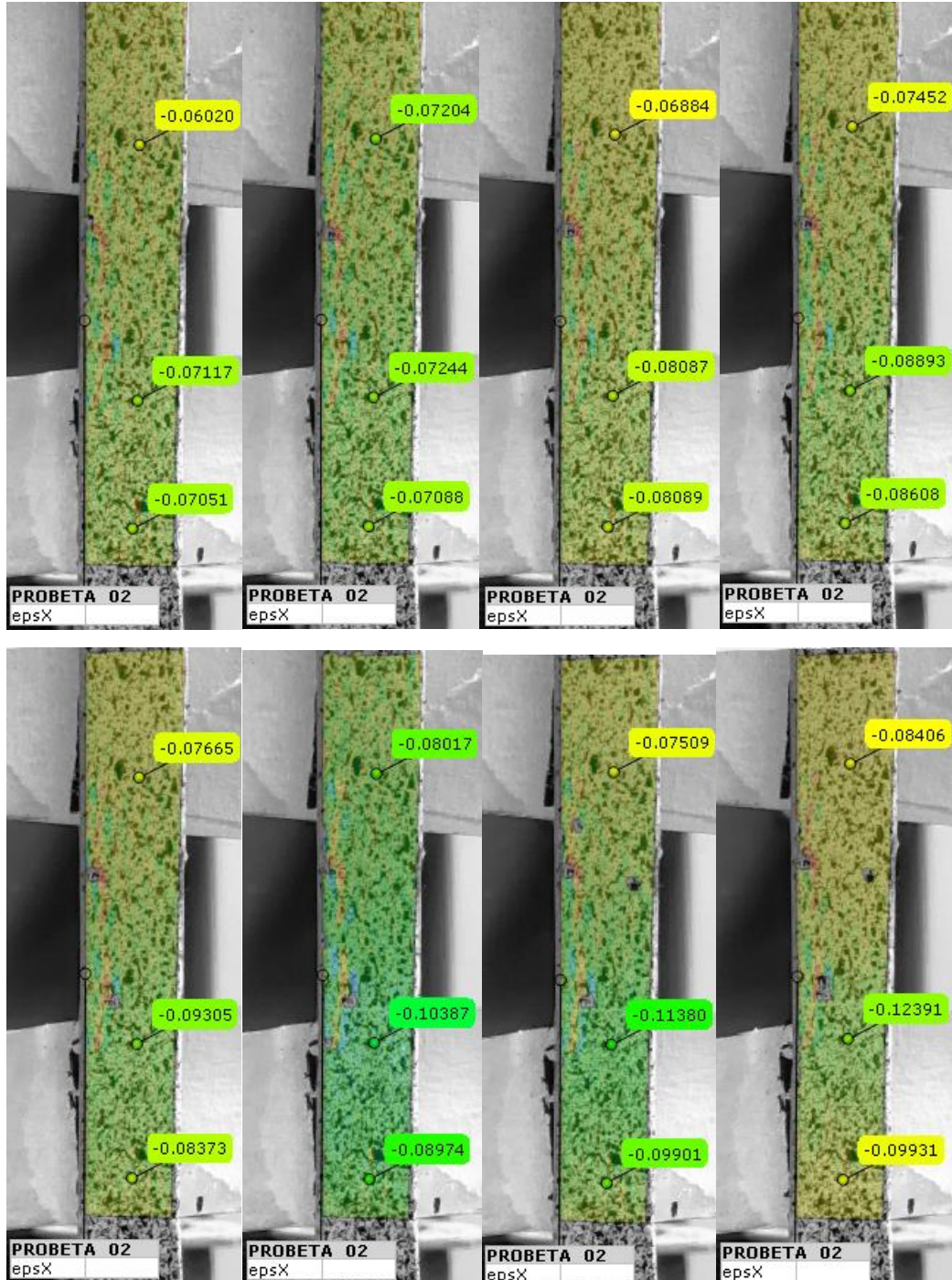


Figura 69 Mapas de deformación transversal de la probeta P-02.

Fuente: Elaboración propia.

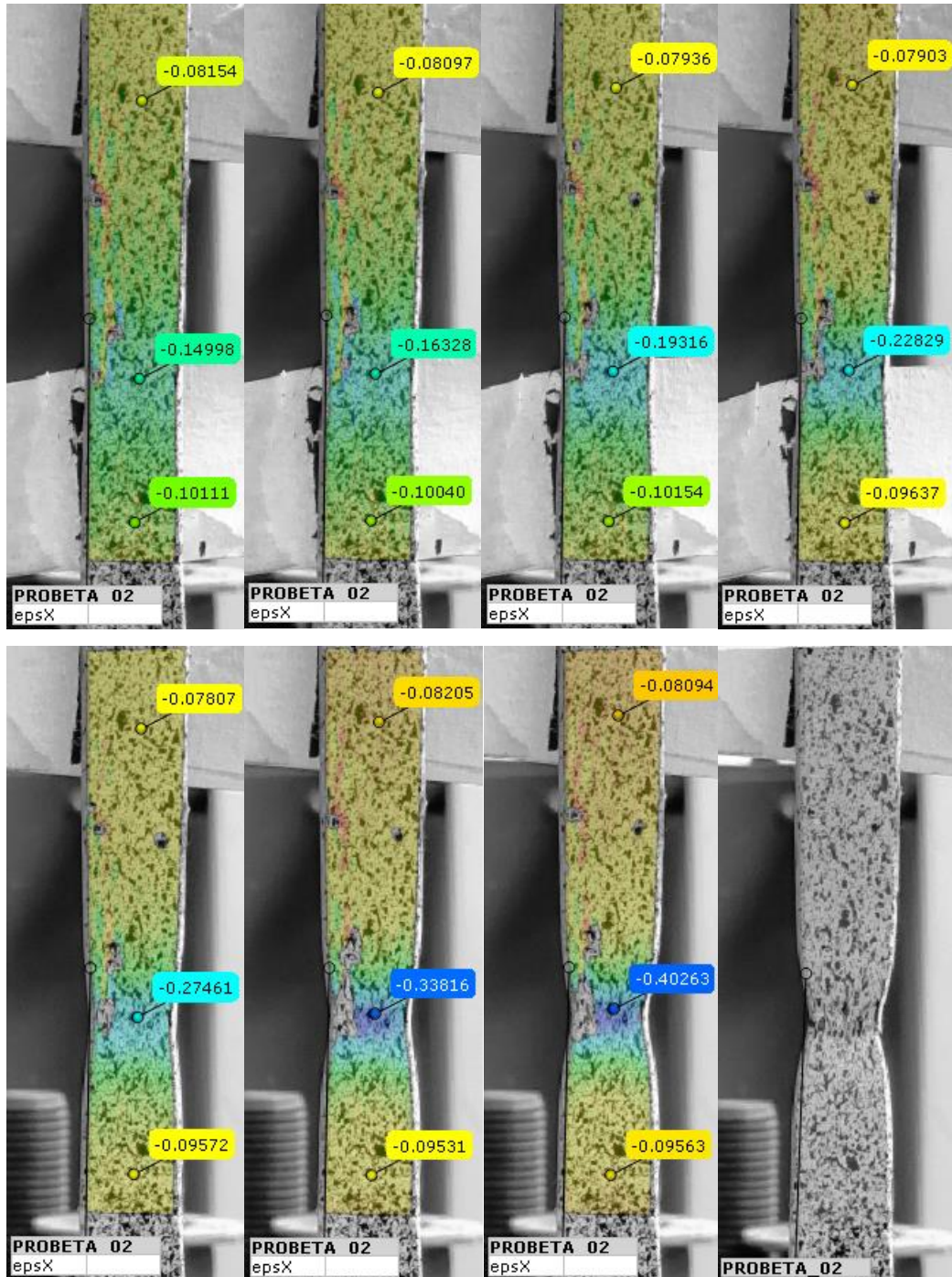


Figura 70 Mapas de deformación transversal de la probeta P-02.

Fuente: Elaboración propia.

Para la probeta P-02 se procesaron en total 166 fotografías, obteniéndose los mapas de deformación transversal ϵ_{xx} luego del procesamiento computacional mediante la técnica de correlación digital de imágenes DIC, en las Figuras 67,68 se muestran los 16 últimos mapas de deformación antes de la rotura del material.

- **Medición de deformaciones ε_{yy} en cada probeta.**

En cada mapa de deformación, correspondiente a cada fotografía capturada en el ensayo de tracción, se analizaron 3 puntos, uno en la zona de estricción y las otras 2 en los extremos superior e inferior de la probeta, para observar la diferencia de deformación en dichos puntos.

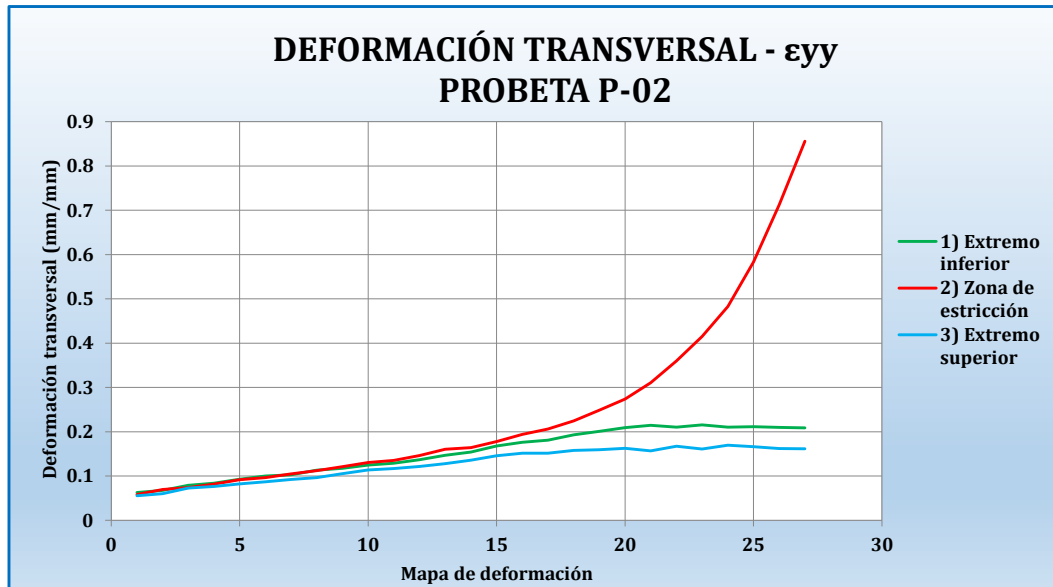


Figura 71 Análisis de deformación en 3 puntos de la probeta P-02.

Fuente: Elaboración propia.

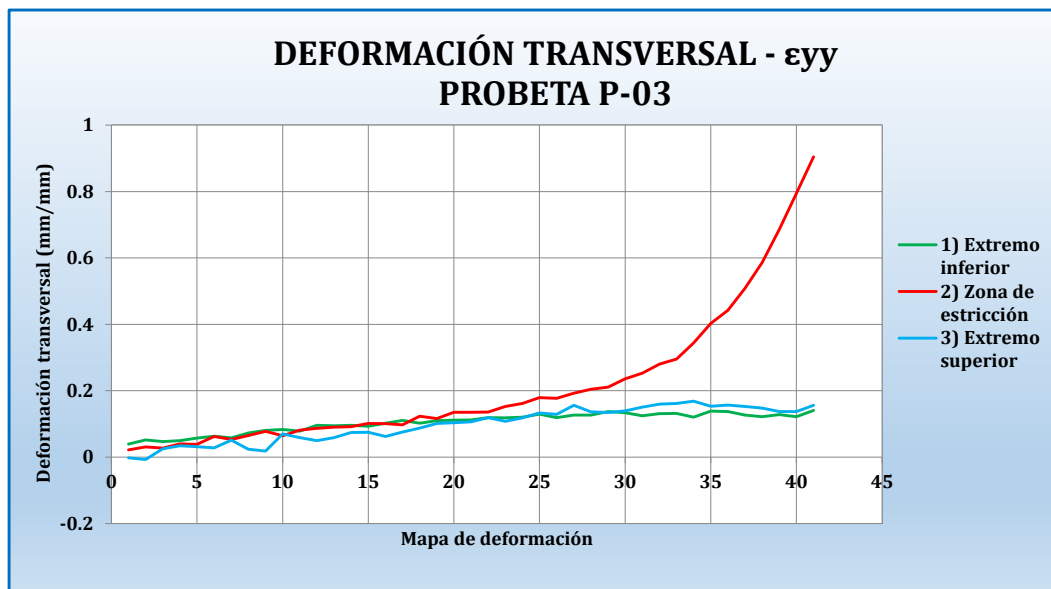


Figura 72 Análisis de deformación en 3 puntos de la probeta P-03.

Fuente: Elaboración propia.

Este gráfico nos muestra la evolución de la deformación en cada uno de los 3 puntos analizados, en el punto correspondiente a la zona de estricción se muestra un elevado incremento de la deformación en la última etapa de la deformación hasta la rotura.

• **Cálculo del módulo de elasticidad - PROBETA 01.**

Tabla 16 Datos para el cálculo del límite elástico - Probeta 01.

Datos para el cálculo del límite elástico P-01			
Según la Tabla 9	Datos probeta P-01		
Carga (kg) Limite Elástico	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Area (cm ²)
3318.639907	1.2	0.7	0.84

Limite Elástico σ_y :

$$\sigma_y = \frac{3318.63}{0.84} = 3950.76 \frac{Kg}{cm^2}$$

Deformación Promedio P-01 (En el límite elástico):

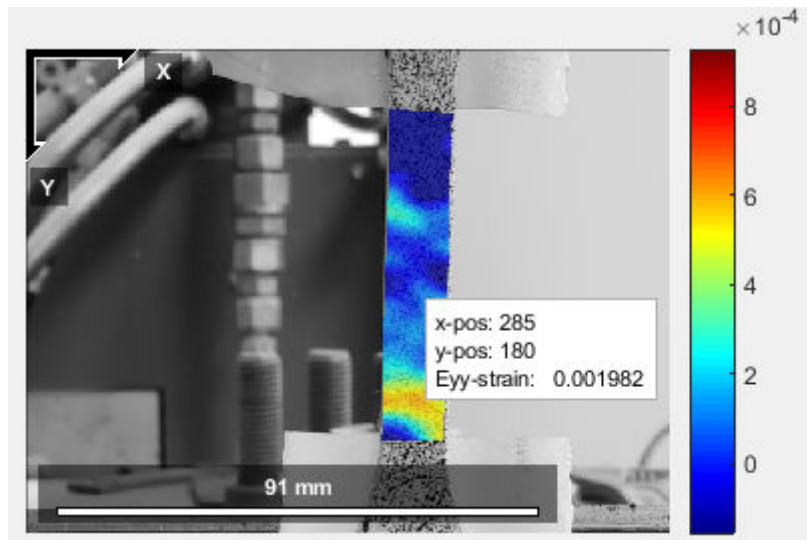


Figura 73 Mapa de deformación en el límite elástico P-01.

Fuente: Elaboración propia.

La matriz completa del mapa de deformación en el Anexo E .

$$\varepsilon_{promedio} = 0.001982$$

Módulo de Elasticidad o Young Experimental - DIC:

$$E = \frac{3950.76}{0.001982} = 1993320.784 \frac{Kg}{cm^2}$$

• **Cálculo del módulo de elasticidad - PROBETA 02**

Tabla 17 Datos para el cálculo del límite elástico - Probeta 02

Datos para el cálculo del límite elástico P-02			
Según la Tabla 10	Datos probeta P-02		
Carga (kg) Limite Elástico	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Area (cm ²)
3340.455613	1.2	0.7	0.84

Límite Elástico σ_y :

$$\sigma_y = \frac{3976.73}{0.84} = 3976.73 \frac{Kg}{cm^2}$$

Deformación Promedio P-02 (En el límite elástico):

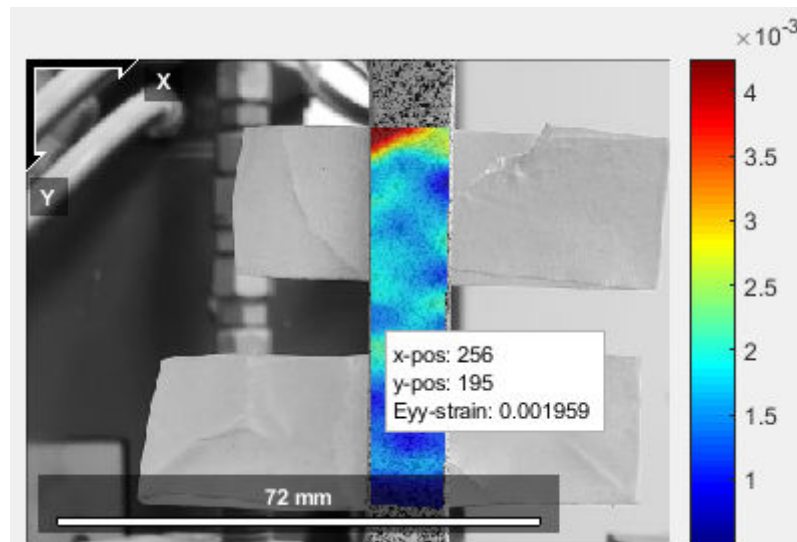


Figura 74 Mapa de deformación en el límite elástico P-02.

Fuente: Elaboración propia.

La matriz completa del mapa de deformación en el Anexo E .

$$\varepsilon_{promedio} = 0.001959$$

Módulo de Elasticidad o Young Experimental - DIC:

$$E = \frac{3976.73}{0.001959} = 2029979.581 \frac{Kg}{cm^2}$$

• **Cálculo del módulo de elasticidad - PROBETA 03**

Tabla 18 Datos para el cálculo del límite elástico - Probeta 02

Datos para el cálculo del límite elástico P-03			
Según la Tabla 11	Datos probeta P-03		
Carga (kg) Limite Elástico	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Area (cm2)
2886.679725	1.2	0.58	0.696

Límite Elástico σ_y :

$$\sigma_y = \frac{2886.67}{0.696} = 4147.52 \frac{Kg}{cm^2}$$

Deformación Promedio P-03 (En el límite elástico):

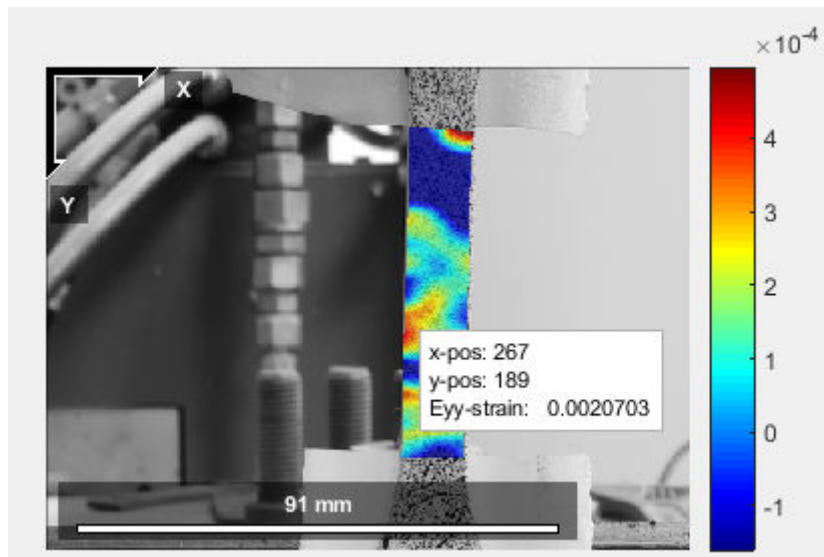


Figura 75 Mapa de deformación en el límite elástico P-03.

Fuente: Propia

La matriz completa del mapa de deformación en el Anexo E .

$$\varepsilon_{promedio} = 0.0020703$$

Módulo de Elasticidad o Young Experimental - DIC:

$$E = \frac{4147.52}{0.0020703} = 2003346.539 \frac{Kg}{cm^2}$$

- **Coefficiente de Poisson experimental - DIC.**

Para verificar la exactitud del método DIC en la determinación de las constantes elásticas, se procedió a calcular experimentalmente el coeficiente de Poisson de las muestras de acero A36 y compararlas respecto a valores técnicos.

El cálculo de la relación de Poisson se realizó trazando las deformaciones laterales frente a las deformaciones axiales, como se muestra en la Figura 76. Luego se trazó una recta lineal de ajuste de mínimos cuadrados en los datos experimentales en la cual la pendiente es la relación de Poisson como en la Figura 76.

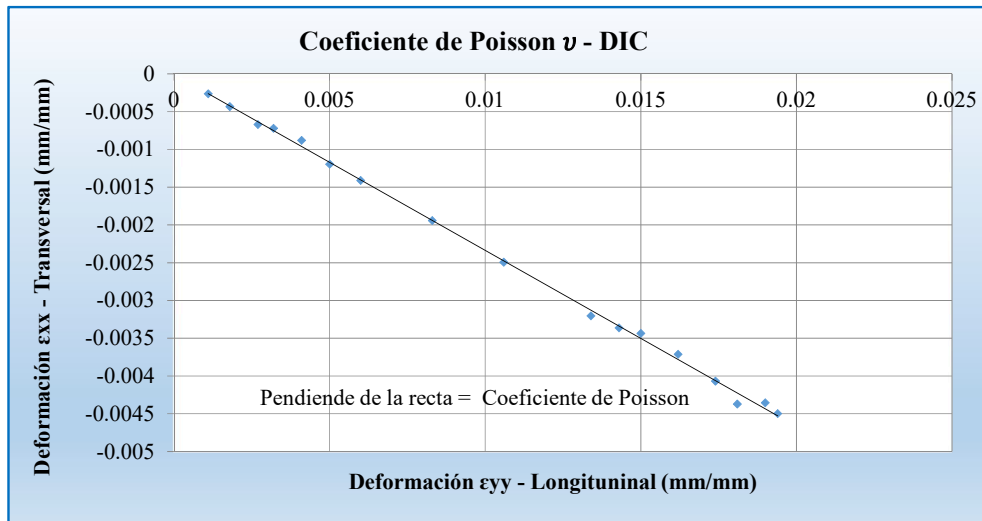


Figura 76 Obtención del módulo de Poisson experimental.

Fuente: Elaboración propia

El método de ensayo consiste en combinar el ensayo de tracción axial con el método de correlación digital de imágenes DIC, para determinar el coeficiente de Poisson ν . La técnica se utilizará en probetas de acero A36, para validar el procedimiento experimental.

Para el cálculo del coeficiente de Poisson, se requiere trazar una recta de ajuste de puntos donde la pendiente de dicha recta viene a ser el coeficiente buscado, estos puntos vienen a ser los valores de deformación promedio de cada mapa de deformación longitudinal y transversal. Este trabajo de investigación va a proporcionar el resultado de cómo la correlación digital de imágenes - DIC puede calcular eficientemente la relación de Poisson que es uno de los parámetros más esenciales del comportamiento elástico de un material.

Cálculo del coeficiente de Poisson PROBETA P-01.

El gráfico de la Figura 77 muestra que la deformación obtenida mediante la técnica DIC es virtualmente idéntica a la del extensómetro mecánico de la máquina de ensayos para valores pequeños de deformación, pero comienza a desviarse más allá del 20% de la deformación.

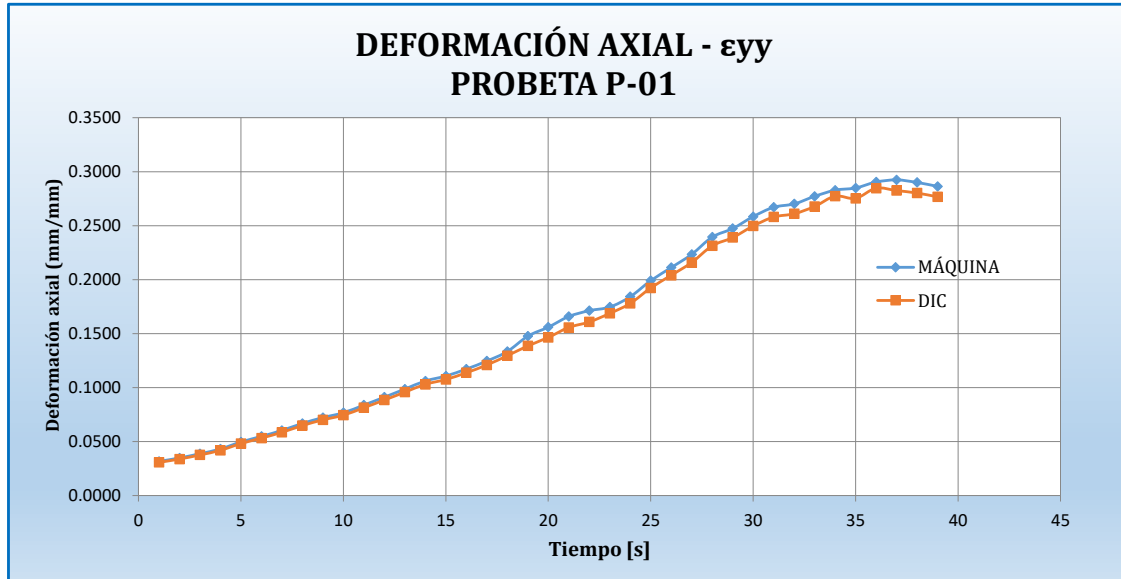


Figura 77 Deformaciones axiales P-01

Fuente: Propia

Cada imagen registrada expresa un mapa de deformación, para la probeta P-01 se registraron 155 registros fotográficos, de los cuales se analizarán los 33 primeros por encontrarse dentro del límite de proporcionalidad donde el promedio de cada mapa de deformación representa un punto en el diagrama para calcular el coeficiente de Poisson.

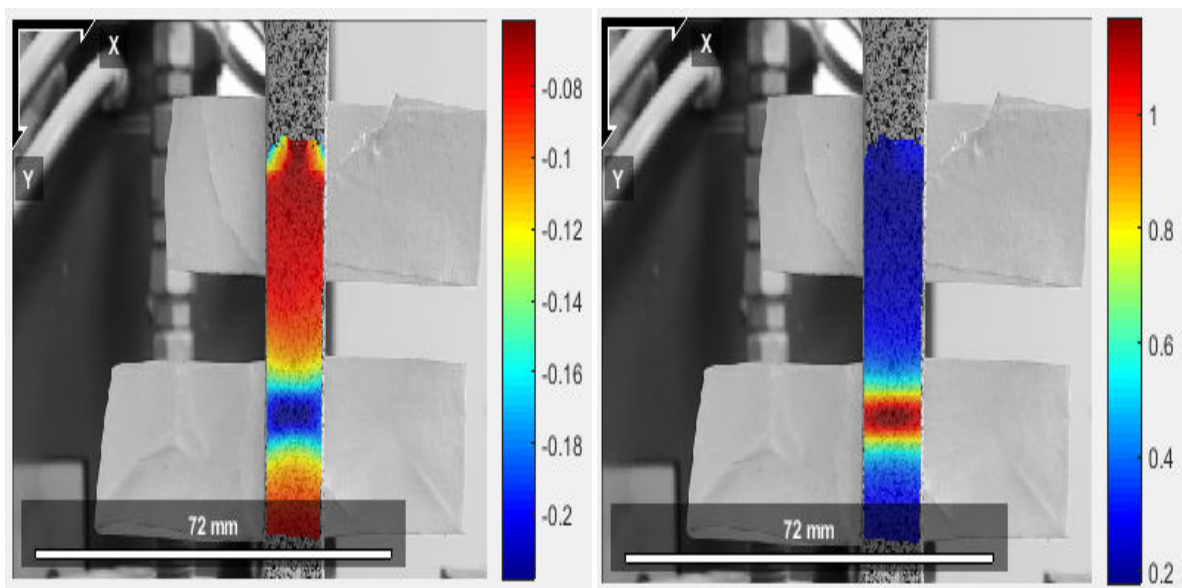
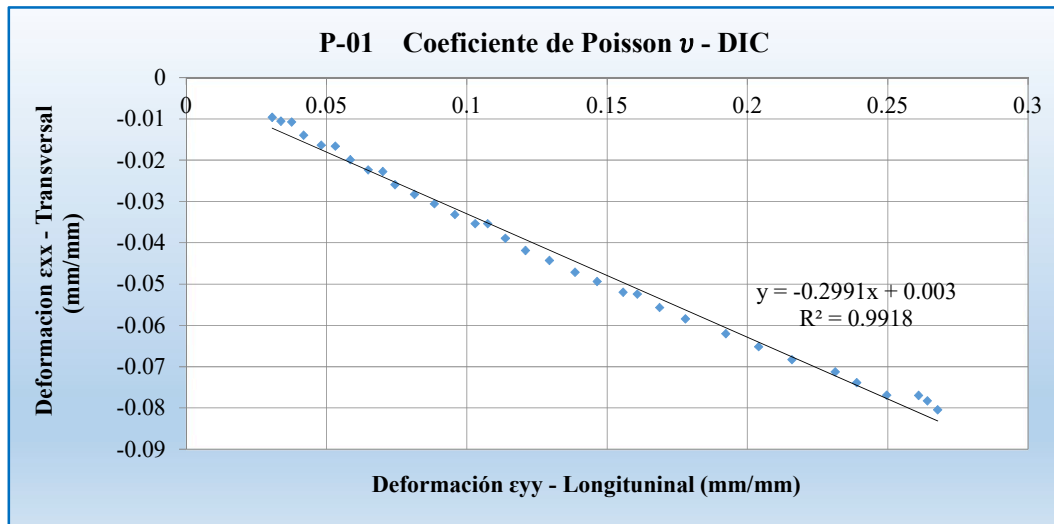


Figura 78 Mapa de deformaciones - Probeta P-01.

Tabla 19 Promedios para cada mapa de deformación longitudinal y transversal.

Cálculo Módulo Poisson DIC - P-01			
Imagen	ε_{xx}	ε_{yy}	$\nu = -\frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{yy}}$
1	-0.0096	0.0307	0.2875
2	-0.0105	0.0338	0.2859
3	-0.0107	0.0376	0.2620
4	-0.0139	0.0419	0.3050
5	-0.0163	0.0482	0.3113
6	-0.0166	0.0532	0.2864
⋮	⋮	⋮	⋮
29	-0.0739	0.2390	0.2836
30	-0.0769	0.2497	0.2826
31	-0.0783	0.2641	0.2719
32	-0.0770	0.2610	0.2706
33	-0.0804	0.2678	0.2756
Promedio			0.2952

**Figura 79** Deformaciones laterales y axiales para la probeta P-01 obtenido por la técnica DIC.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20 Comparación de la relación de Poisson especificada en valores técnicos y las determinadas experimentalmente por la técnica DIC.

COEFICIENTE DE POISSON - PROBETA P-01		
Material	Técnico	DIC
Acero A36	0.28	0.2991

Cálculo del coeficiente de Poisson PROBETA P-02

El gráfico de la Figura 80 muestra que la deformación obtenida mediante la técnica DIC es virtualmente idéntica a la del extensómetro mecánico de la máquina de ensayos para valores pequeños de deformación, pero comienza a desviarse más allá del 20% de la deformación.

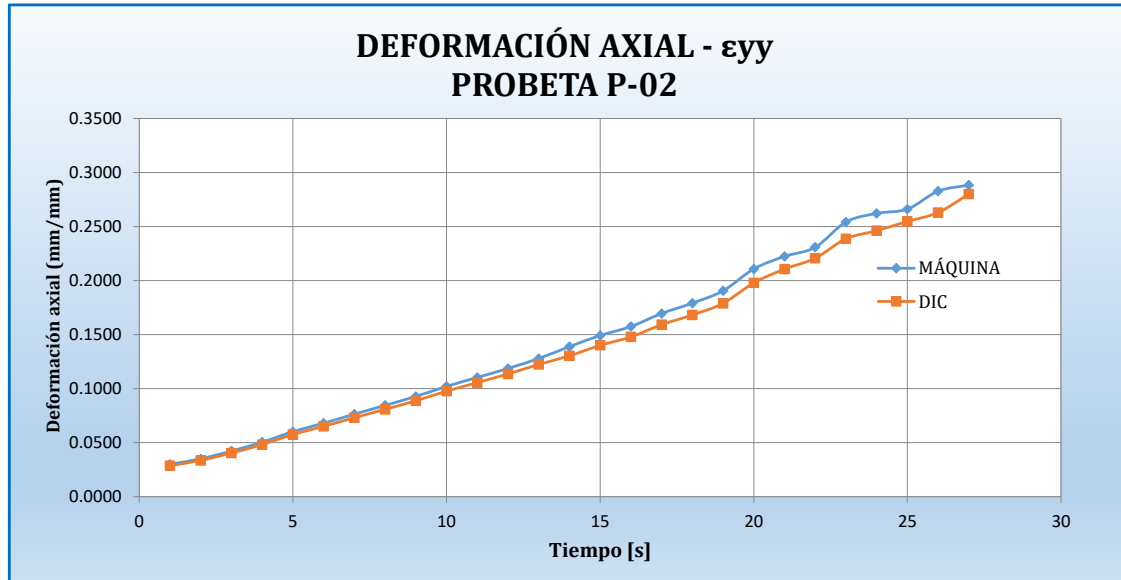
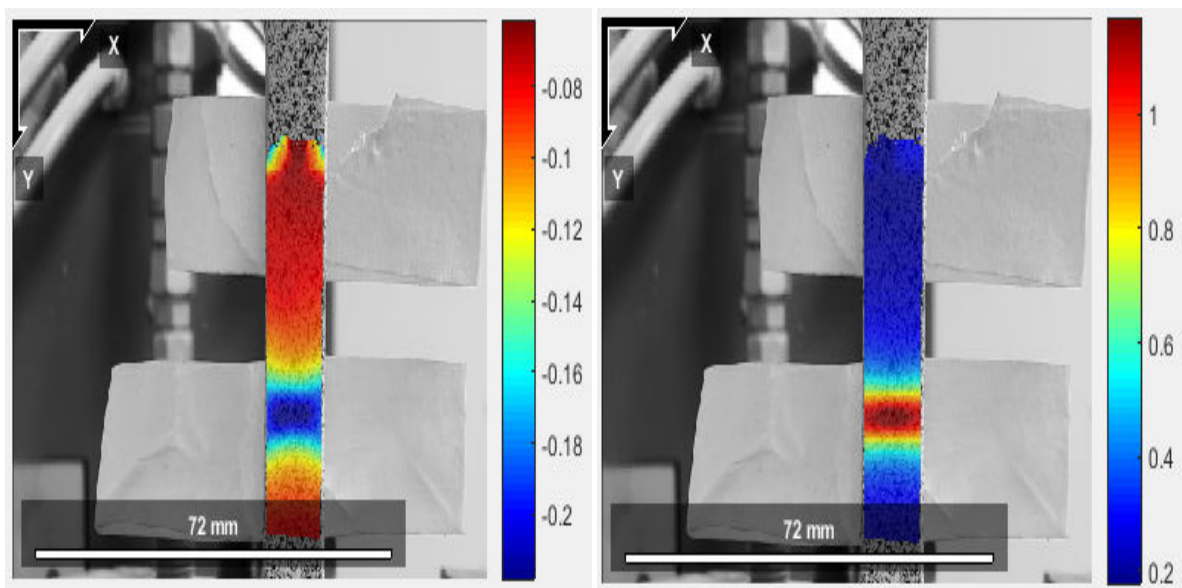


Figura 80 Deformaciones axiales P-02

Fuente: Propia

Cada imagen registrada expresa un mapa de deformación, para la probeta P-02 se registraron 166 registros fotográficos, de los cuales se analizarán los 27 primeros por encontrarse dentro del límite de proporcionalidad donde el promedio de cada mapa de deformación representa un punto en el diagrama para calcular el coeficiente de Poisson.



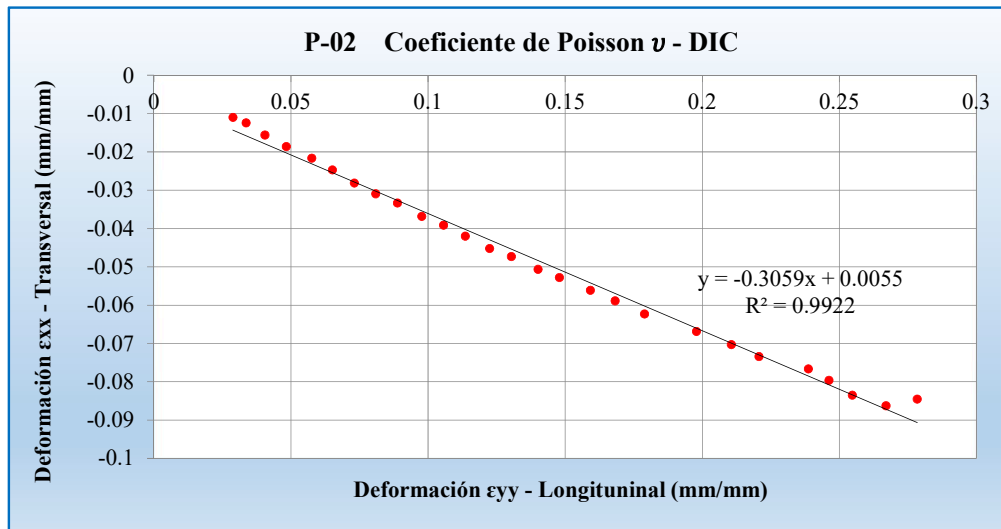
(a) Deformación lateral ϵ_{xx} .

(b) Deformación longitudinal ϵ_{yy} .

Figura 81 Mapa de deformaciones - Probeta P-02.

Tabla 21 Promedios para cada mapa de deformación longitudinal y transversal.

Cálculo Módulo Poisson DIC - P-02			
Imagen	ε_{xx}	ε_{yy}	$\nu = -\frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{yy}}$
1	-0.0110	0.0288	0.3277
2	-0.0124	0.0336	0.3172
3	-0.0156	0.0405	0.3295
4	-0.0186	0.0483	0.3302
5	-0.0217	0.0576	0.3221
6	-0.0247	0.0651	0.3250
⋮	⋮	⋮	⋮
23	-0.0767	0.2387	0.2751
24	-0.0796	0.2462	0.2770
25	-0.0835	0.2547	0.2808
26	-0.0846	0.2784	0.2601
27	-0.0863	0.2670	0.2767
Promedio			0.3120

**Figura 82** Deformaciones laterales y axiales para la probeta P-02 obtenido por la técnica DIC.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22 Comparación de la relación de Poisson especificada en valores técnicos y las determinadas experimentalmente por la técnica DIC.

COEFICIENTE DE POISSON - PROBETA P-02		
Material	Técnico	DIC
Acero A36	0.28	0.3059

Cálculo del coeficiente de Poisson PROBETA P-03

El gráfico de la Figura 83 muestra que la deformación obtenida mediante la técnica DIC es virtualmente idéntica a la del extensómetro mecánico de la máquina de ensayos para valores pequeños de deformación, pero comienza a desviarse más allá del 20% de la deformación.

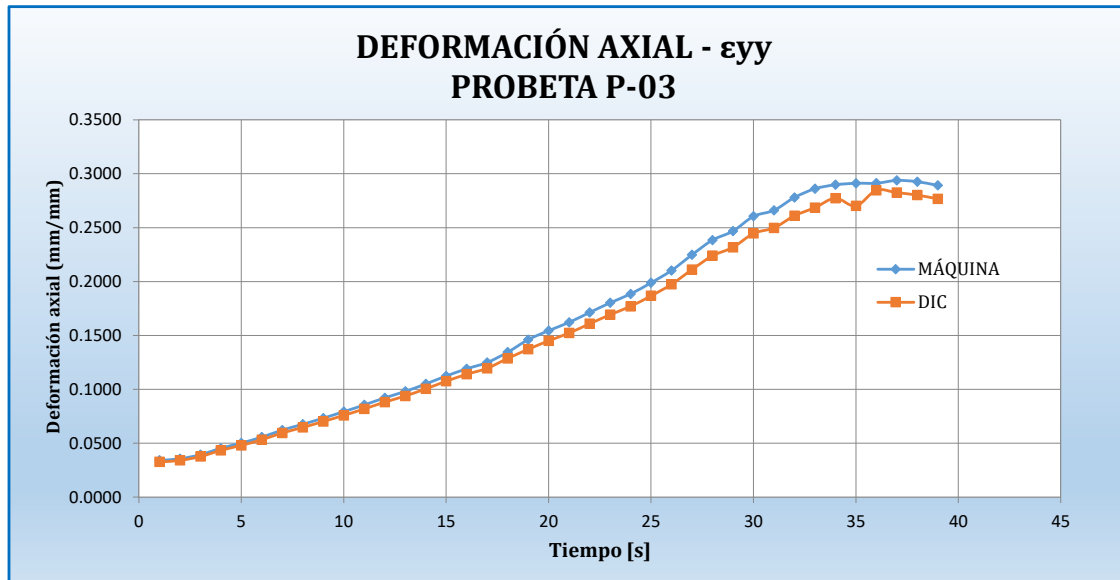
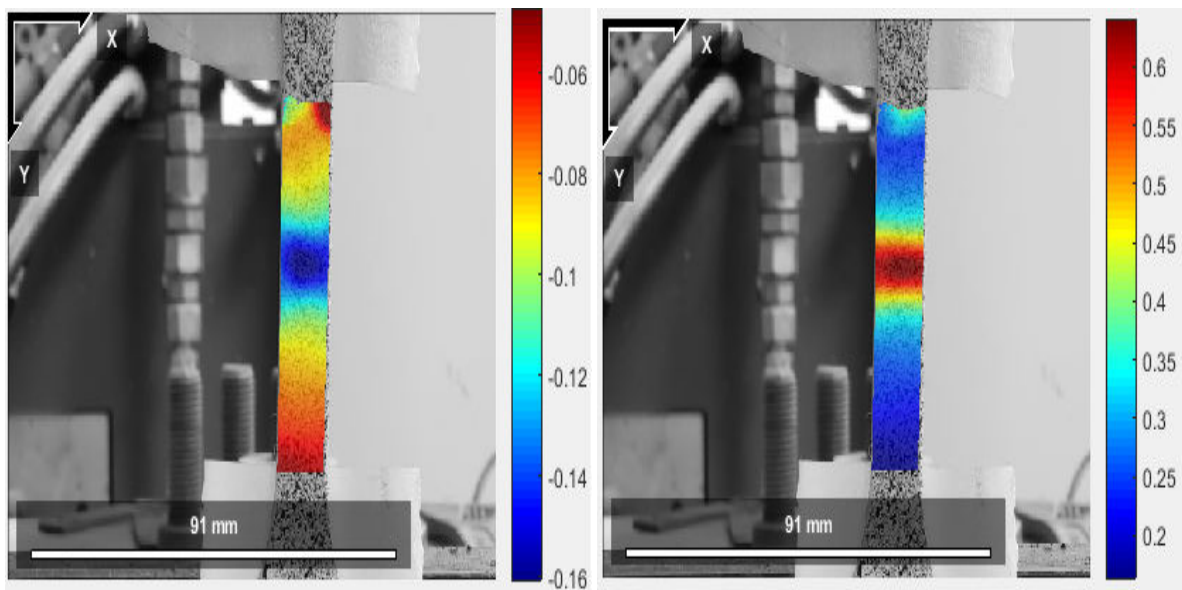


Figura 83 Deformaciones axiales P-03

Fuente: Propia

Cada imagen registrada expresa un mapa de deformación, para la probeta P-03 se registraron 144 registros fotográficos, de los cuales se analizarán los 27 primeros por encontrarse dentro del límite de proporcionalidad donde el promedio de cada mapa de deformación representa un punto en el diagrama para calcular el coeficiente de Poisson.



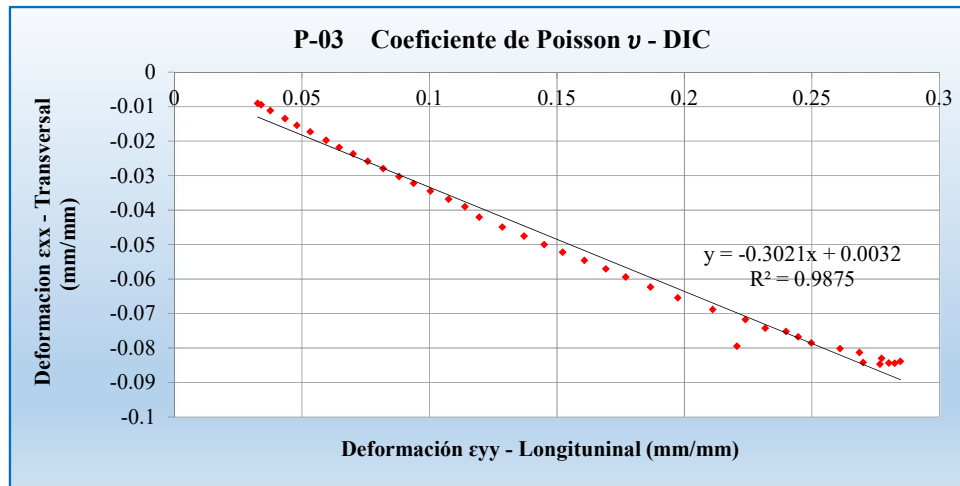
(a) Deformación lateral ε_{xx} .

(b) Deformación longitudinal ε_{yy} .

Figura 84 Mapa de deformaciones - Probeta P-03.

Tabla 23 Promedios para cada mapa de deformación longitudinal y transversal.

Cálculo Módulo Poisson DIC - P-03			
Imagen	ε_{xx}	ε_{yy}	$\nu = -\frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{yy}}$
1	-0.0090	0.0326	0.2574
2	-0.0095	0.0340	0.2597
3	-0.0112	0.0376	0.2767
4	-0.0134	0.0433	0.2887
5	-0.0154	0.0480	0.2987
6	-0.0173	0.0532	0.3024
⋮	⋮	⋮	⋮
37	-0.0844	0.2825	0.2779
38	-0.0843	0.2802	0.2799
39	-0.0847	0.2767	0.2847
40	-0.0794	0.2206	0.3349
41	-0.0752	0.2399	0.2915
Promedio			0.2923

**Figura 85** Deformaciones laterales y axiales para la probeta P-03 obtenido por la técnica DIC.
Fuente: Elaboración propia.**Tabla 24** Comparación de la relación de Poisson especificada en valores técnicos y las determinadas experimentalmente por la técnica DIC.

COEFICIENTE DE POISSON - PROBETA P-03		
Material	Técnico	DIC
Acero A36	0.28	0.3021

Reporte del ensayo de tracción uniaxial

Finalizado los ensayos de tracción uniaxial, se procedió a elaborar un modelo de reporte como la Figura 86, que muestra diferentes mapas de deformación ("strain maps") con sus respectivas cargas y el tiempo respectivo durante el ensayo experimental.

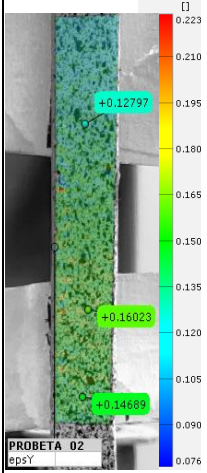
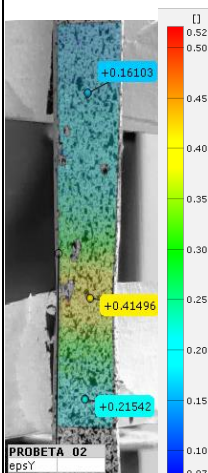
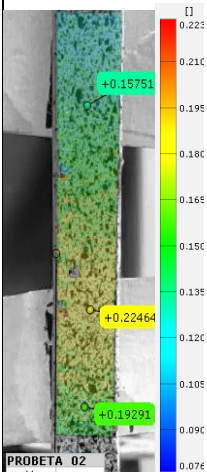
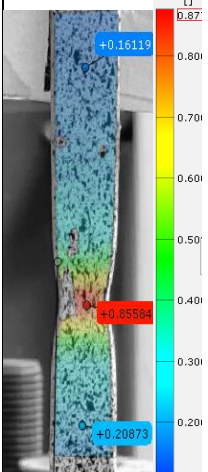
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA					
REPORTE DE ENSAYO DE TRACCION- MÁQUINA DE ENSAYO UNIVERSAL ZWICK ROELL SP-1000					
REALIZADO POR: Yuri Abraham PANIAGUA SEGOVIA					
MUESTRA: P-02		TECNICA DE CORRELACION DIGITAL DE IMÁGENES - DIC			FECHA: 29/12/19
CARGA(Kg.)	MAPA DE DEFORMACIÓN “ε _{yy} ” (STRAIN MAPS)	TIEMPO(s)	CARGA(Kg.)	MAPA DE DEFORMACIÓN “ε _{yy} ” (STRAIN MAPS)	TIEMPO(s)
3130		25	3452		85
3326		50	2434		125

Figura 86 Reporte del ensayo de tracción.

Fuente: Elaboración propia.

3.8.10 Metodología de validación en ensayos a compresión uniaxial

Cálculo del coeficiente de Poisson ν experimental mediante la técnica DIC

Para verificar la exactitud del método DIC en la determinación de las constantes elásticas, se procedió a calcular experimentalmente el coeficiente de Poisson de las muestras de albañilería artesanales y compararlas respecto a sus valores técnicos.

El método de ensayo consiste en combinar el ensayo de compresión axial con la técnica de correlación digital de imágenes DIC, para determinar el coeficiente de Poisson ν . La técnica se utilizará en unidades de albañilería tales como ladrillos artesanales tipo II de la región Ayacucho para validar el procedimiento experimental.

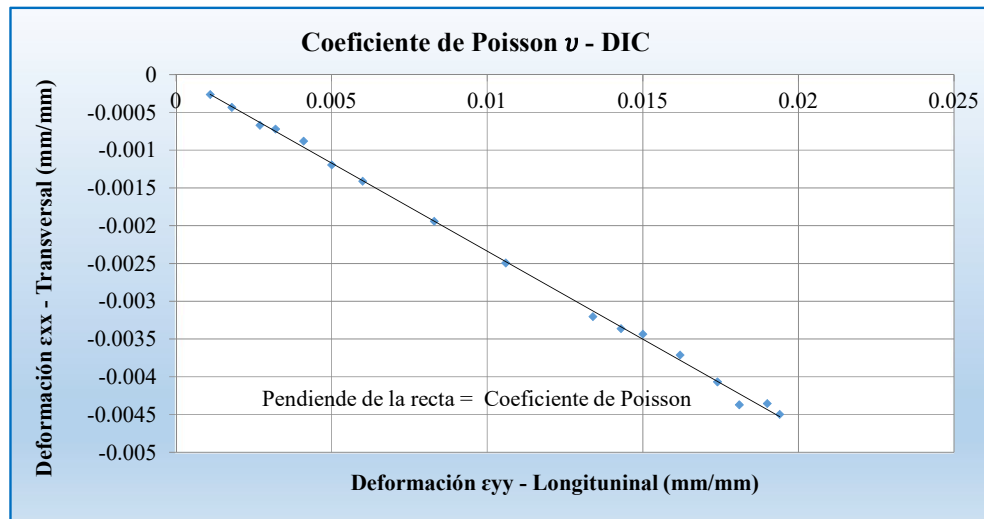


Figura 87 Obtención del módulo de Poisson experimental.

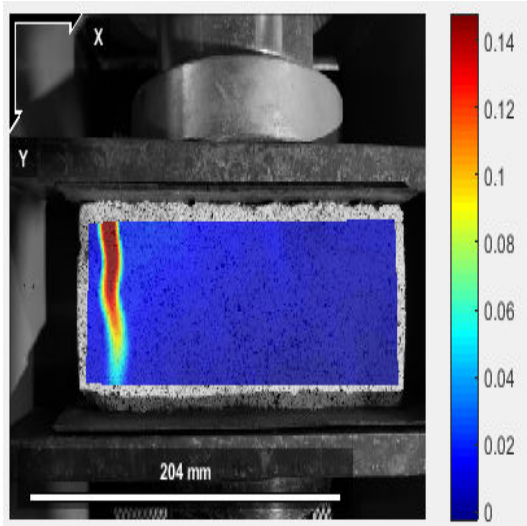
Fuente: Elaboración propia

El cálculo del coeficiente de Poisson se realizó trazando las deformaciones laterales frente a las deformaciones axiales, como se muestra en la figura 87. Luego se trazó una recta lineal de ajuste de mínimos cuadrados en los datos experimentales en la cual la pendiente es la relación de Poisson.

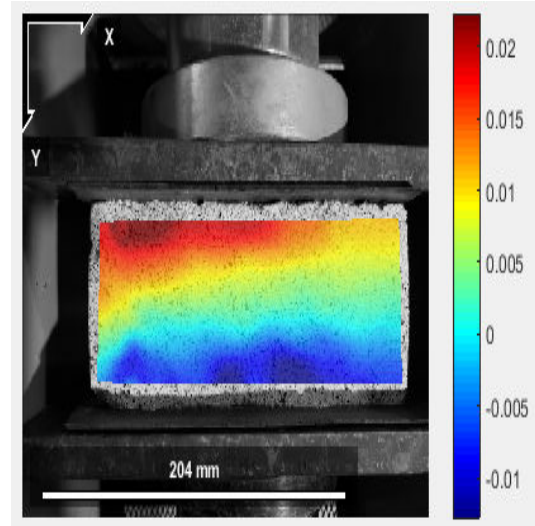
Para el cálculo del coeficiente de Poisson, se requiere trazar una recta de ajuste de puntos donde la pendiente de dicha recta viene a ser el coeficiente buscado, estos puntos vienen a ser los valores de deformación promedio en cada instante de la prueba. Esta investigación va a proporcionar el resultado de como la correlación digital de imágenes - DIC puede calcular eficientemente la relación de Poisson que es uno de los parámetros más esenciales del comportamiento elástico de un material.

Cálculo del coeficiente de Poisson: Ladrillo artesanal A-01

Cada imagen registrada expresa un mapa de deformación "strain map", para el ladrillo A-01 se registraron 18 registros fotográficos por lo tanto habrá 18 mapas de deformación, donde el promedio de cada mapa de deformación representa un punto en el diagrama para calcular el coeficiente de Poisson experimentalmente.

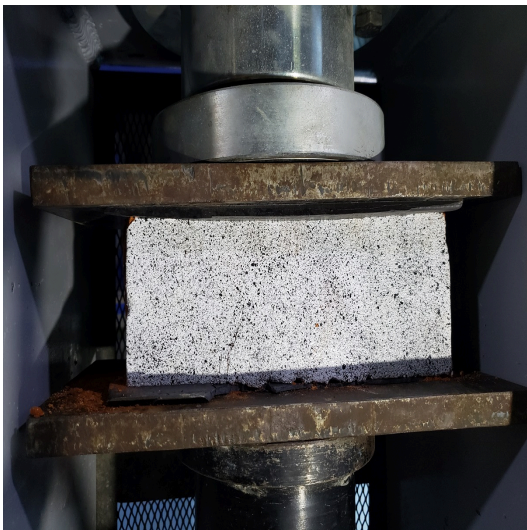


(a) Mapa de deformación lateral ε_{xx} .

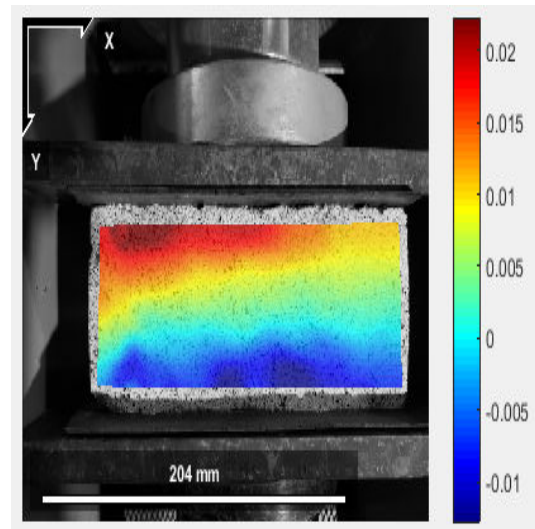


(b) Mapa de deformación longitudinal ε_{yy} .

Figura 88 Mapa de deformación - Ladrillo A-01.



(a) Imagen 18 Ladrillo A-01.



(b) Mapa de deformación longitudinal Ladrillo A-01

Figura 89 Deformación longitudinal final - Ladrillo A-01.

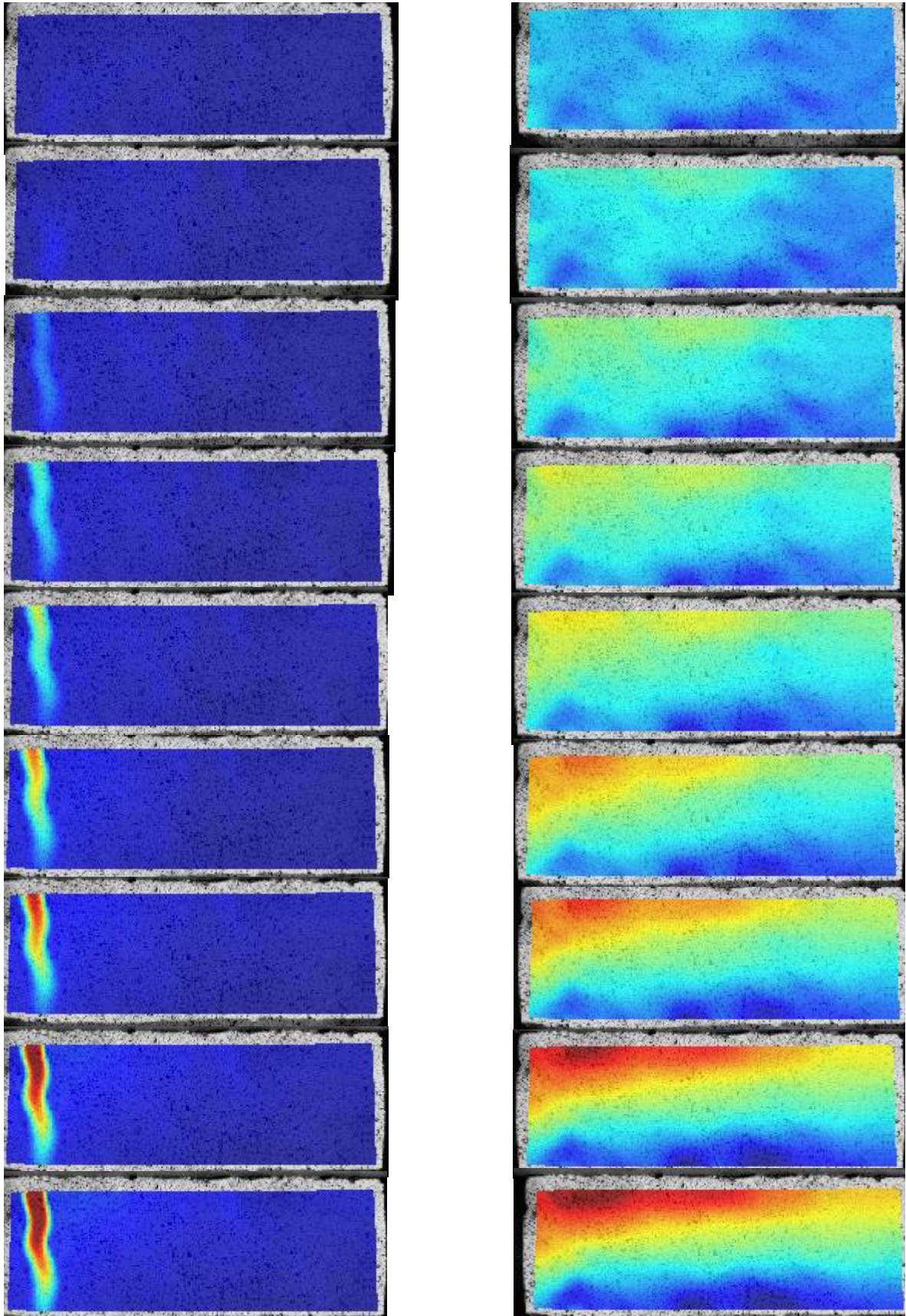
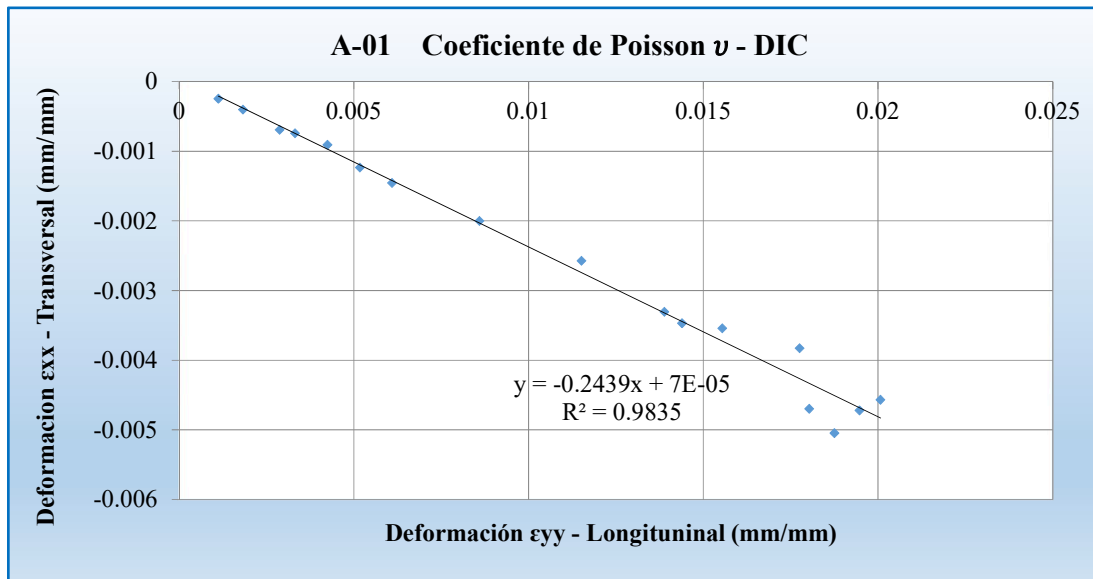
Mapas de deformación transversales ε_{xx} y longitudinales ε_{yy} ladrillo A-01

Figura 90 Deformaciones laterales y axiales para el ladrillo A-01 obtenido por la técnica DIC.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25 Valores de deformaciones transversales y longitudinales calculados por la técnica DIC en el ladrillo A-01.

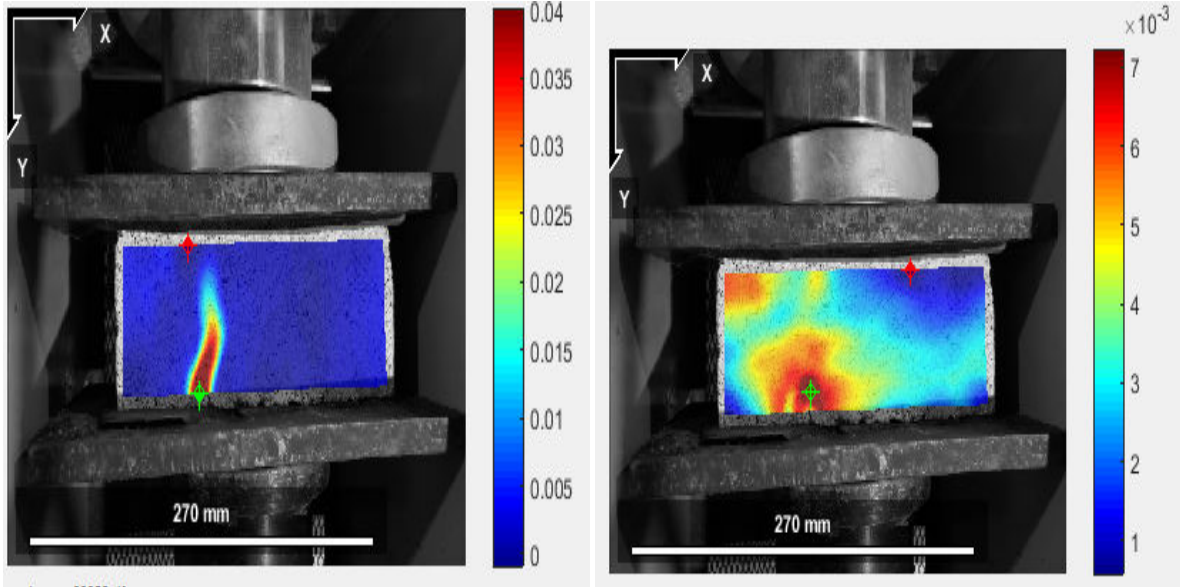
Ladrillo A-01		
Imagen	ε_{xx}	ε_{yy}
1	0	0
2	-0.000246	0.00113
3	-0.000403	0.00183
4	-0.000693	0.00288
5	-0.000744	0.00332
⋮	⋮	⋮
14	-0.003828	0.01776
15	-0.004697	0.01803
16	-0.004722	0.01947
17	-0.005049	0.01876
18	-0.004570	0.02007

**Figura 91** Deformaciones laterales y axiales para el ladrillo A-01 obtenido por la técnica DIC.
Fuente: Elaboración propia.**Tabla 26** Módulo de Poisson - Ladrillo A-01

Ladrillo A-01		
Modulo de Poisson		
Tipo	Método	Valor
Artesanal Tipo II	DIC	0.2439

Cálculo del coeficiente de Poisson: Ladrillo Artesanal A-02

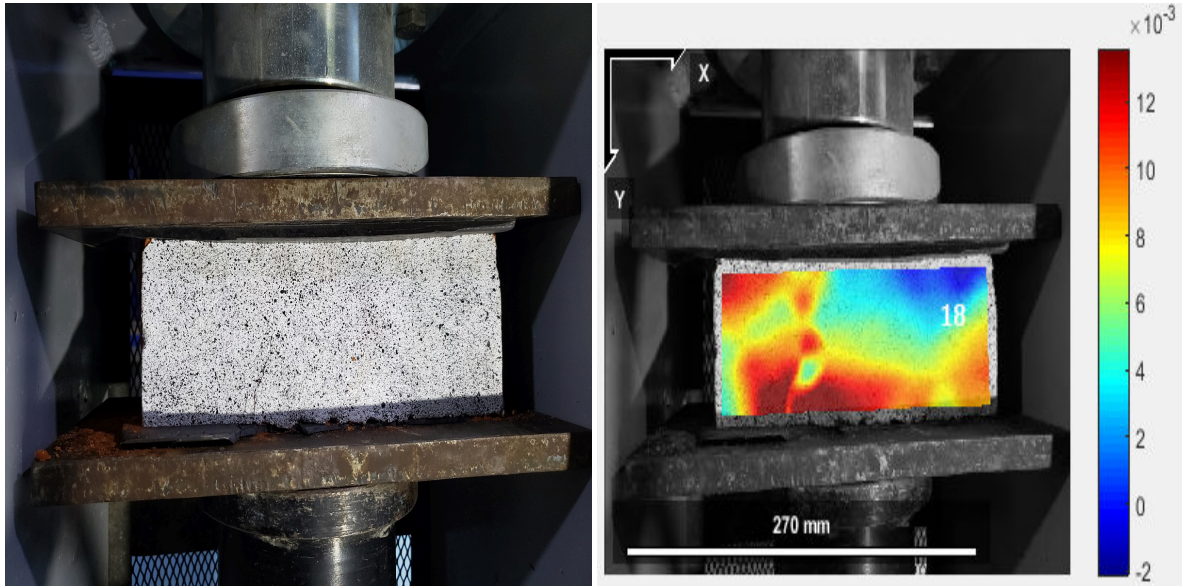
Cada imagen registrada expresa un mapa de deformación, para el ladrillo A-02 se registraron 18 registros fotográficos por lo tanto habrá 18 mapas de deformación, donde el promedio de cada mapa de deformación representa un punto en el diagrama para calcular el coeficiente de Poisson experimentalmente.



(a) Mapa de deformación lateral ϵ_{xx} .

(b) Mapa de deformación longitudinal ϵ_{yy} .

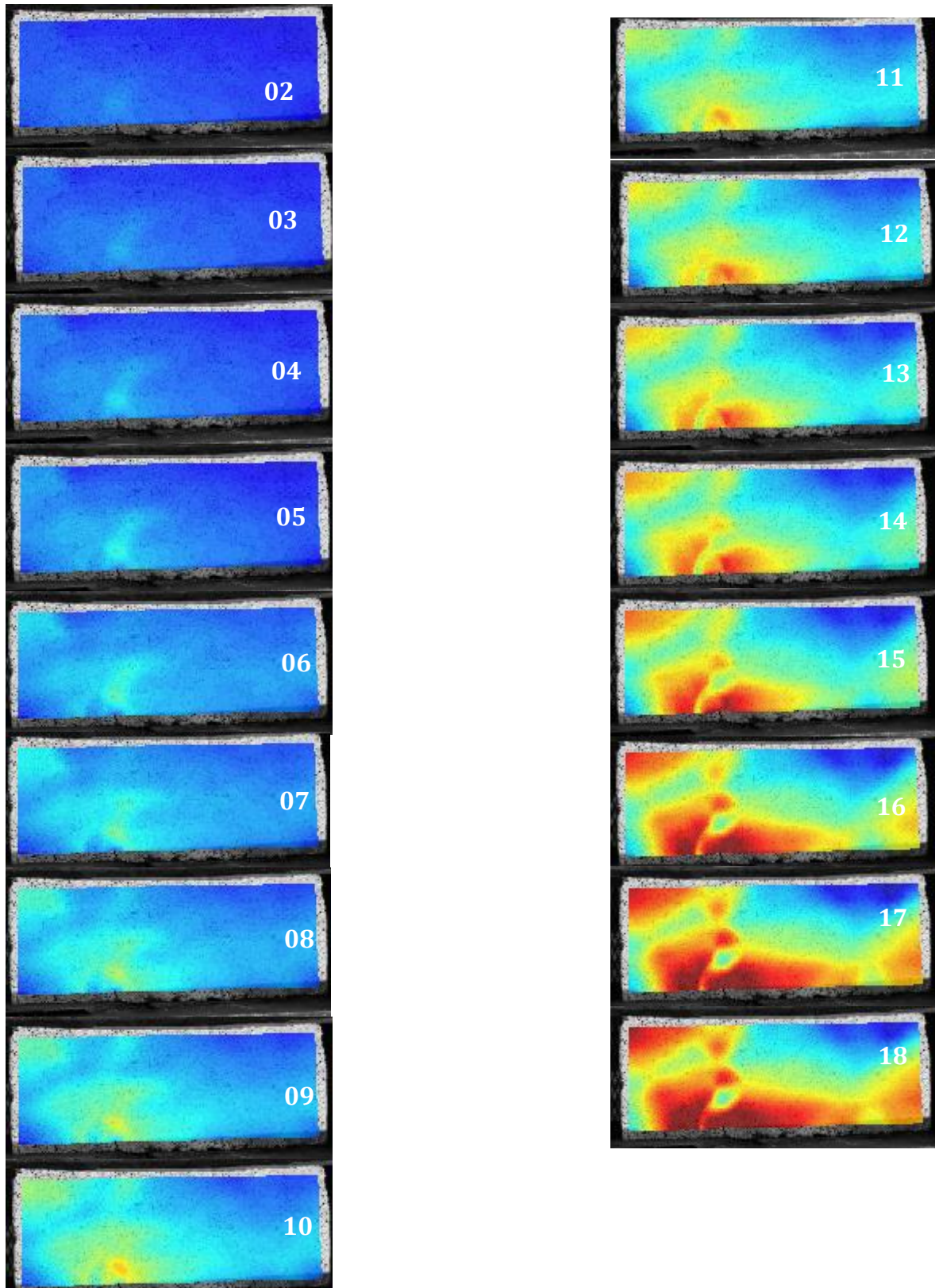
Figura 92 Mapa de deformación - Ladrillo A-02.



(a) Imagen 18 Ladrillo A-02.

(b) Mapa de deformación longitudinal Ladrillo A-02

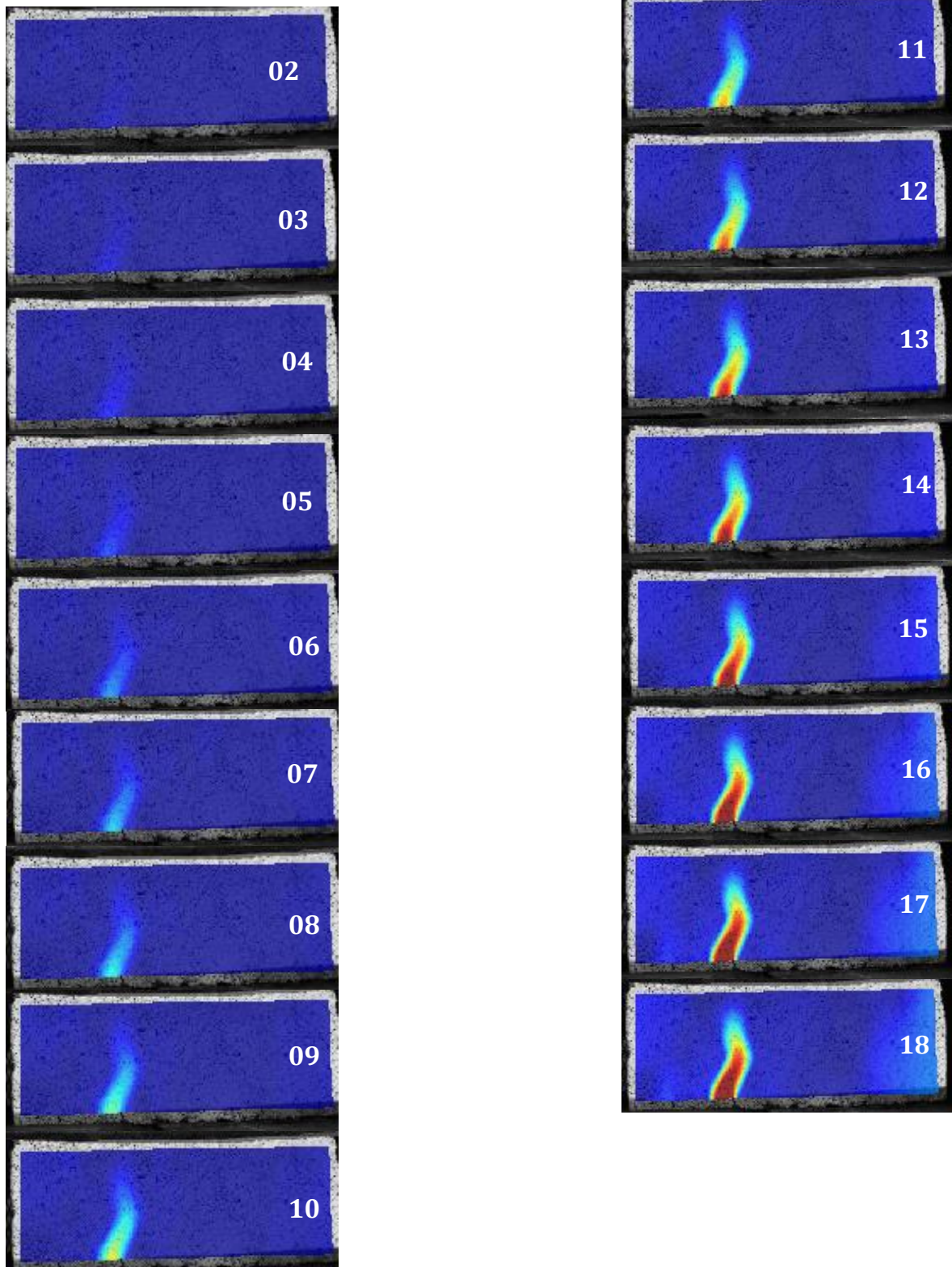
Figura 93 Deformación longitudinal final - Ladrillo A-02.

Mapas de deformaciones longitudinales ε_{xx} ladrillo A-02

(a) Imágenes 2-10.

(b) Imágenes 11-18.

Figura 94 Mapa de deformaciones longitudinales - Ladrillo A-02.

Mapas de deformaciones transversales ε_{yy} ladrillo A-02

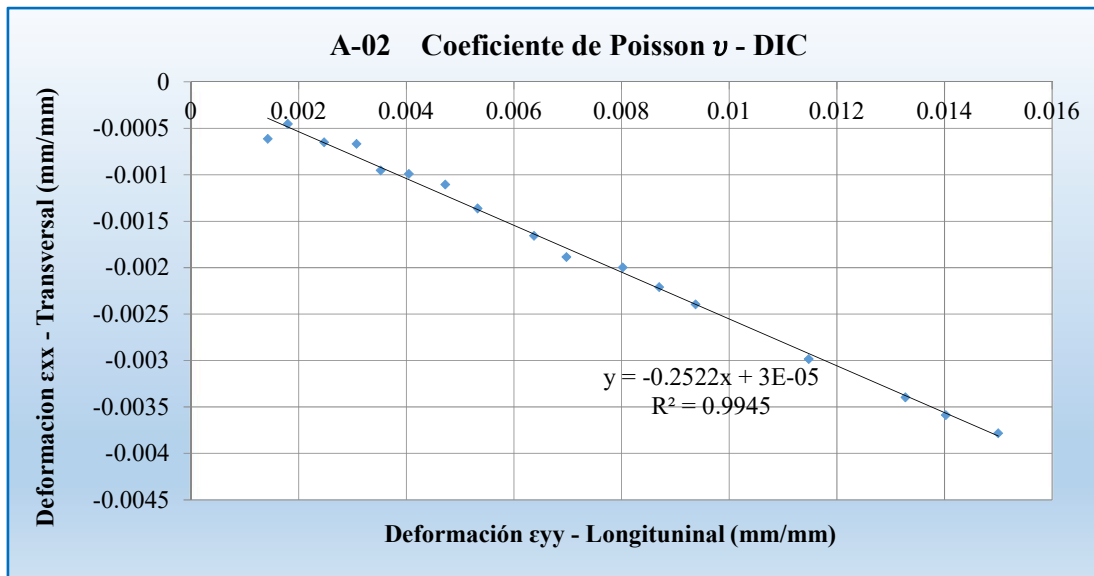
(a) Imágenes 2-10

(b) Imágenes 11-18

Figura 95 Mapa de deformaciones transversales - Ladrillo A-02.

Tabla 27 Valores de deformaciones transversales y longitudinales calculados por la técnica DIC en el ladrillo A-02

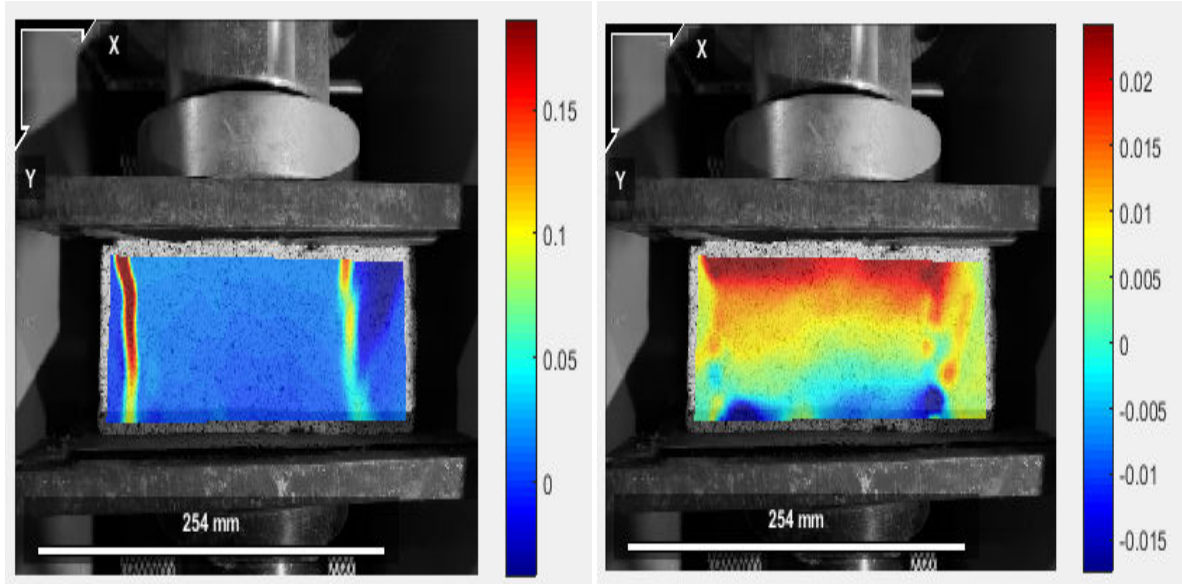
Ladrillo A-02		
Imagen	ε_{xx}	ε_{yy}
1	0	0
2	-0.000613	0.001425
3	-0.0004536	0.001802
4	-0.0006497	0.002475
5	-0.0006676	0.003075
⋮	⋮	⋮
14	-0.0023972	0.009375
15	-0.0029834	0.011475
16	-0.0033949	0.013275
17	-0.0035866	0.014025
18	-0.0037815	0.015025

**Figura 96** Deformaciones laterales y axiales para el ladrillo A-02 obtenido por la técnica DIC.
Fuente: Elaboración propia**Tabla 28** Módulo de Poisson - Ladrillo A-02

Ladrillo A-02		
Modulo de Poisson		
Tipo	Metodo	Valor
Artesanal Tipo II	DIC	0.222

Cálculo del coeficiente de Poisson: Ladrillo Artesanal A-03

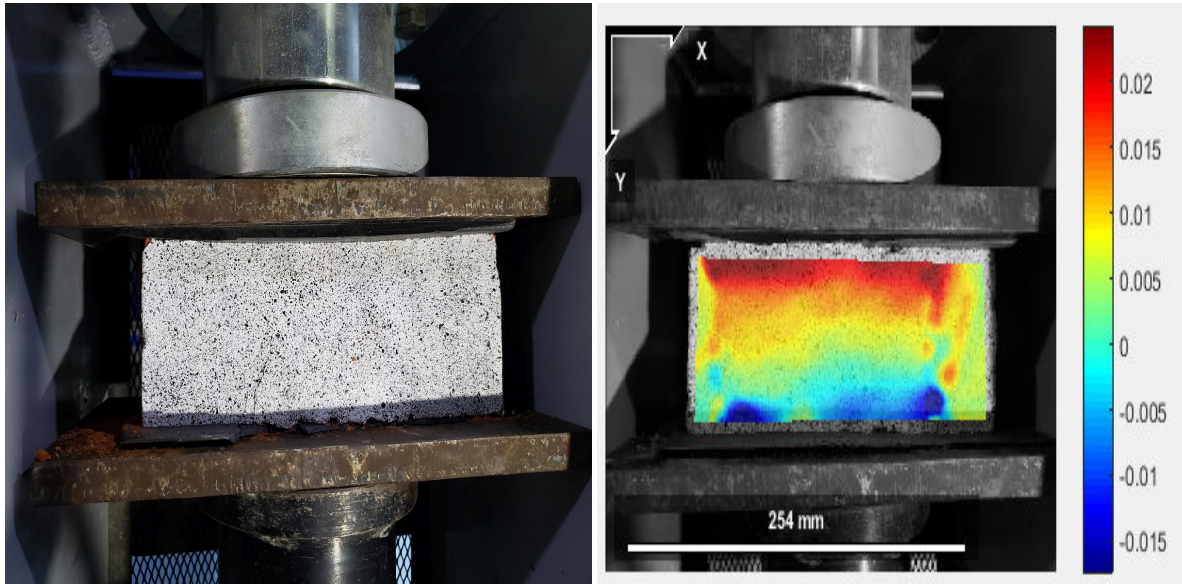
Cada imagen registrada expresa un mapa de deformación, para el ladrillo A-03 se registraron 18 registros fotográficos por lo tanto habrá 18 mapas de deformación, donde el promedio de cada mapa de deformación representa un punto en el diagrama para calcular el coeficiente de Poisson experimentalmente.



(a) Mapa de deformación lateral ε_{xx}

(b) Mapa de deformación longitudinal ε_{yy}

Figura 97 Mapa de deformaciones - Ladrillo A-03.

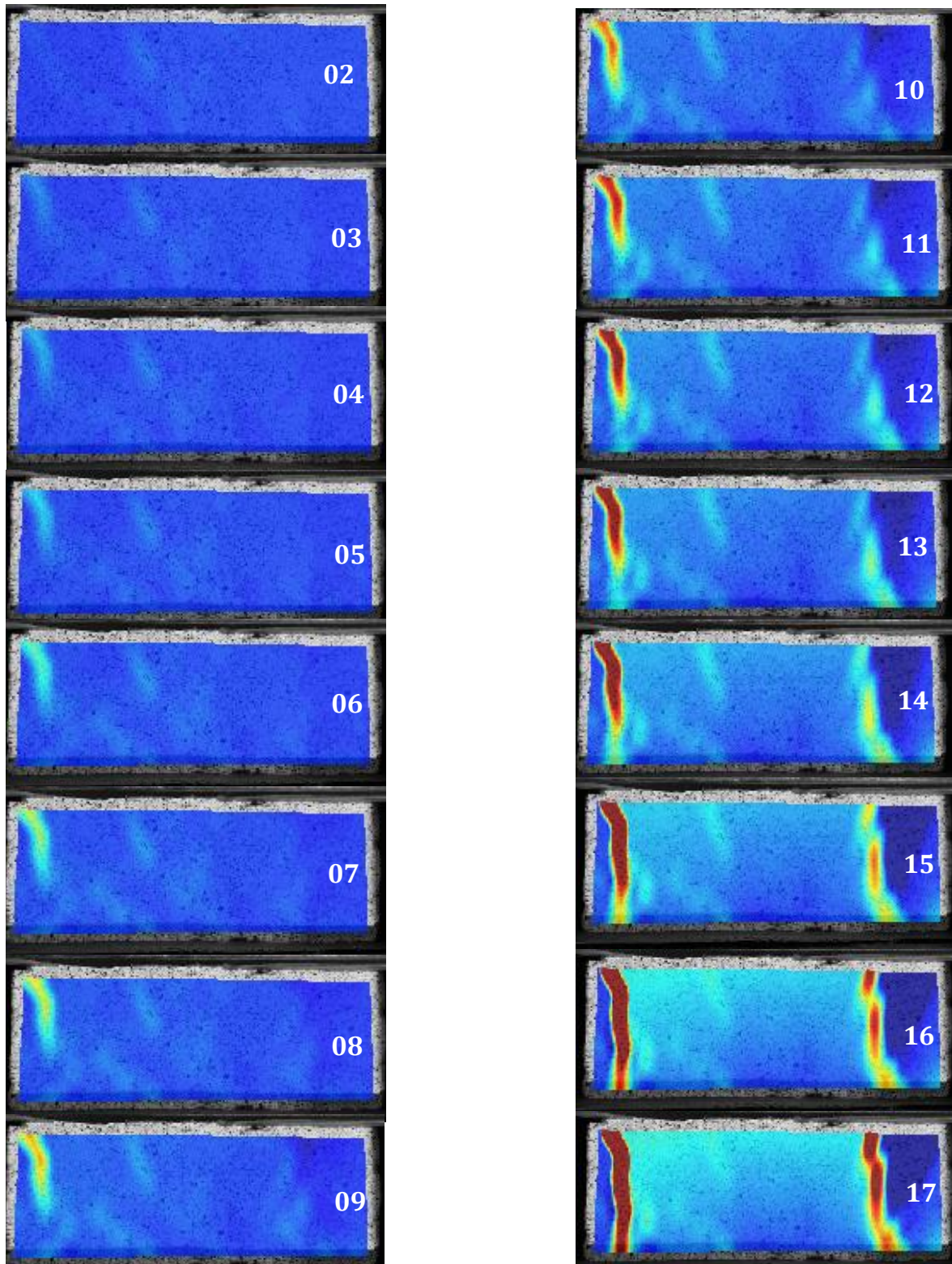


(a) Imagen 18 Ladrillo A-03

(b) Mapa de deformación longitudinal Ladrillo A-03

Figura 98 Deformación longitudinal final - Ladrillo A-03

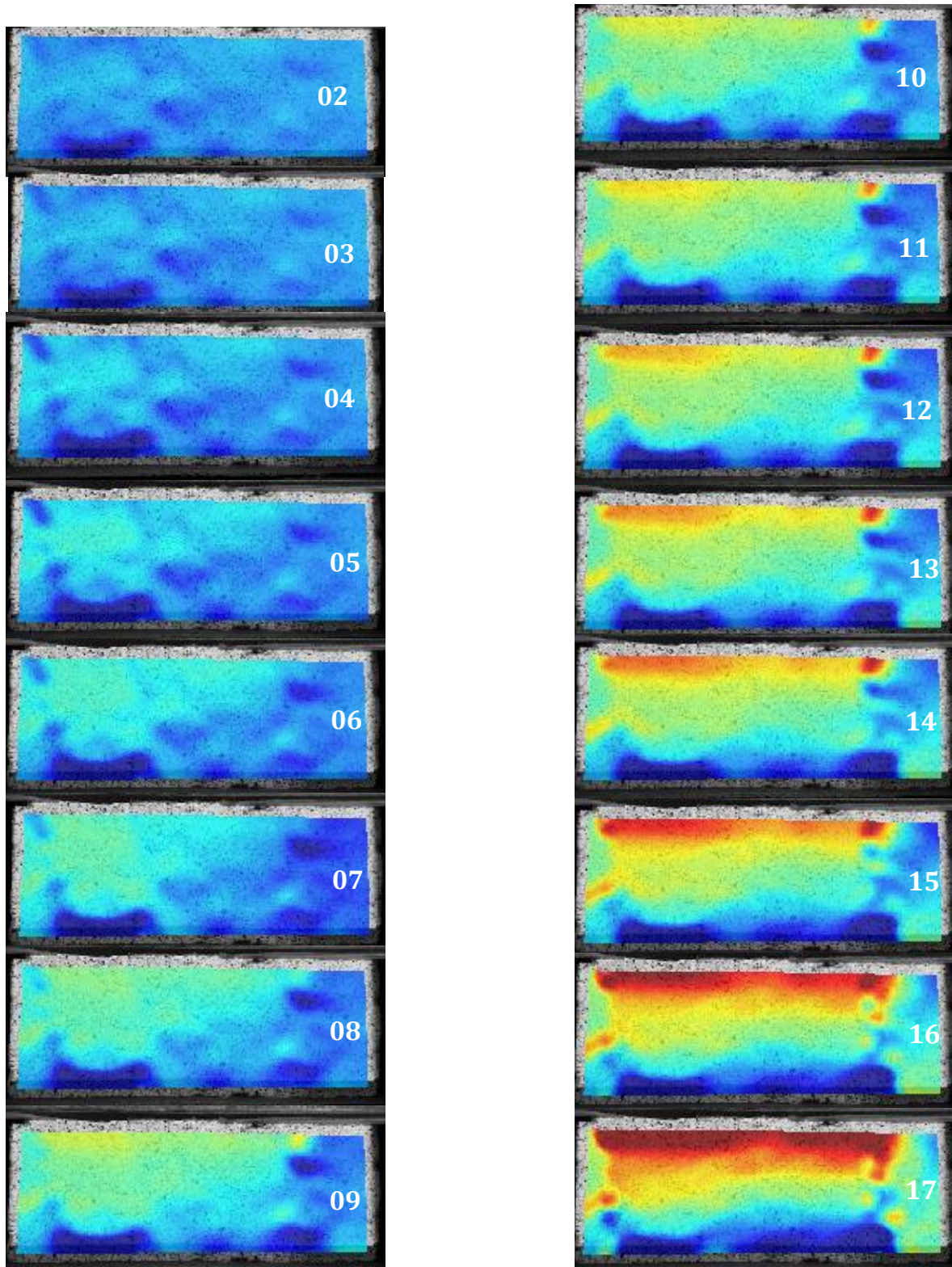
Mapas de deformaciones longitudinales ε_{xx} ladrillo A-03



(a) Imágenes 2-9

(b) Imágenes 10-17

Figura 99 Mapa de deformaciones longitudinales - Ladrillo A-03.

Mapas de deformaciones transversales ε_{yy} ladrillo A-03

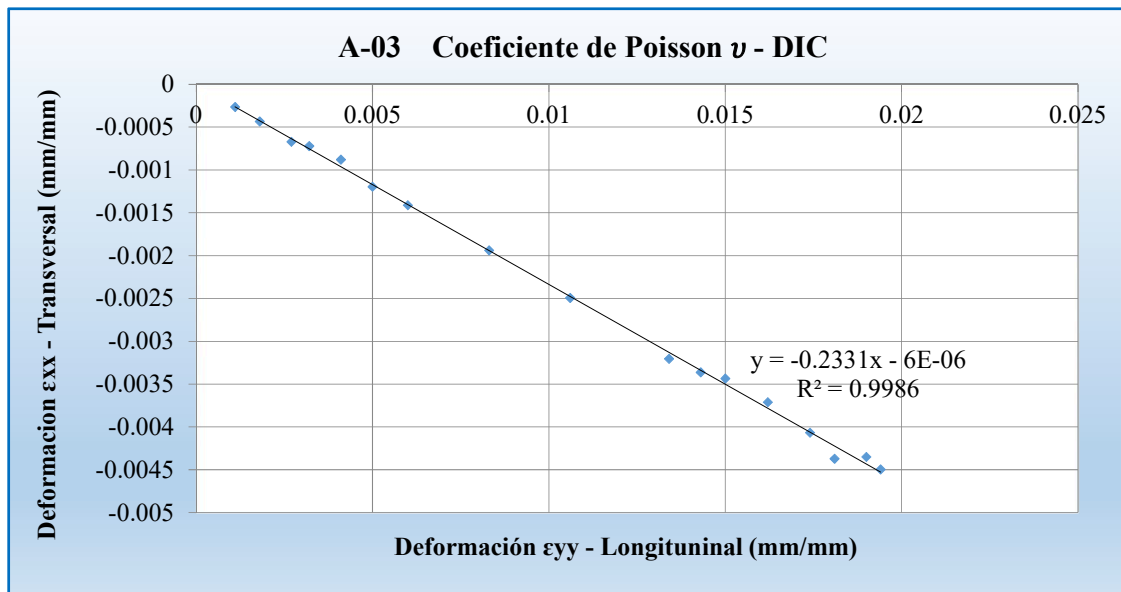
(a) Imágenes 2-9

(b) Imágenes 10-17

Figura 100 Mapa de deformaciones transversales - Ladrillo A-03.

Tabla 29 Valores de deformaciones transversales y longitudinales calculados por la técnica DIC en el ladrillo A-03

Ladrillo A-03		
Imagen	ε_{xx}	ε_{yy}
1	0	0
2	-0.000266	0.0011
3	-0.000435	0.0018
4	-0.000672	0.0027
5	-0.000721	0.0032
⋮	⋮	⋮
14	-0.003711	0.0162
15	-0.004067	0.0174
16	-0.004498	0.0194
17	-0.004371	0.0181
18	-0.004353	0.019

**Figura 101** Deformaciones laterales y axiales para el ladrillo A-03 obtenido por la técnica DIC.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30 Módulo de Poisson - Ladrillo A-03

Ladrillo A-03		
Modulo de Poisson		
Tipo	Método	Valor
Artesanal Tipo II	DIC	0.2331

Reporte del ensayo de compresión uniaxial

Finalizado los ensayos de compresión uniaxial, se procedió a elaborar un modelo de reporte como la Figura 102, que muestra diferentes mapas de deformación ("strain maps") con sus respectivas cargas y el tiempo respectivo durante el ensayo experimental.

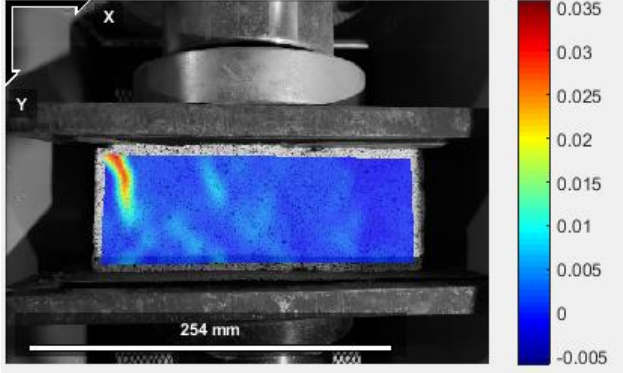
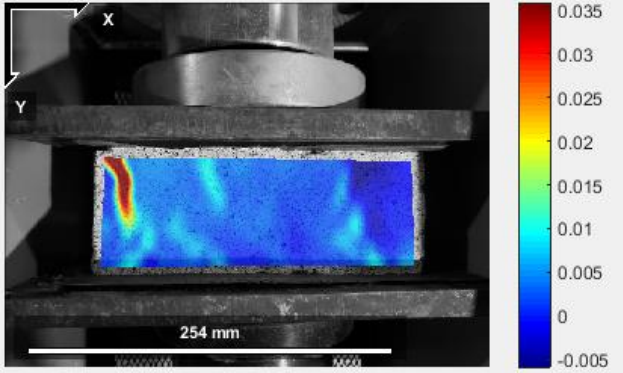
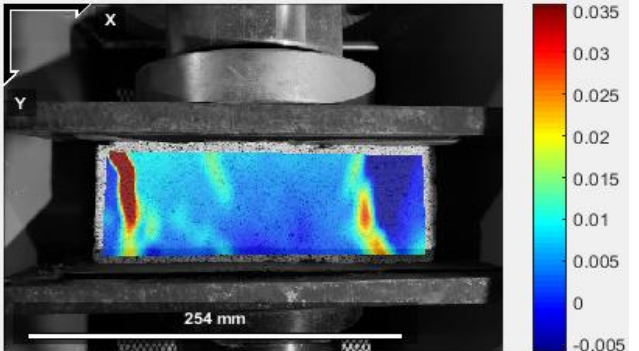
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA		
REPORTE DE ENSAYO DE COMPRESION- MÁQUINA DE ENSAYO PINZUAR PC42D		
REALIZADO POR: Yuri Abraham PANIAGUA SEGOVIA		
MUESTRA: A-03	TECNICA DE CORRELACION DIGITAL DE IMÁGENES - DIC	FECHA: 29/12/19
CARGA(Kg.)	MAPA DE DEFORMACIÓN " ϵ_{xx} " (STRAIN MAPS)	TIEMPO(s)
8300		16
14356		29
18364		45

Figura 102 Reporte del ensayo de compresión - deformaciones horizontales.

Fuente: Elaboración propia.

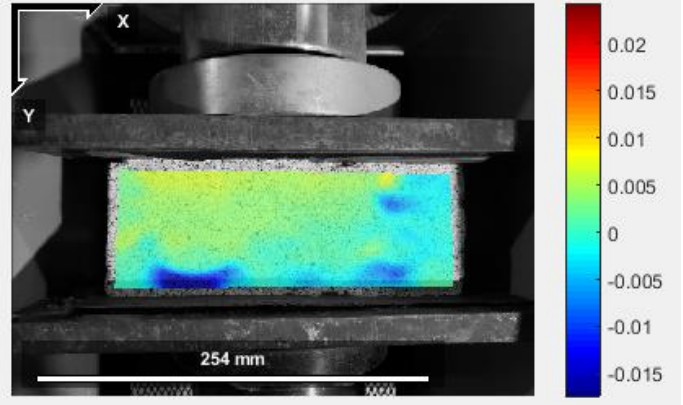
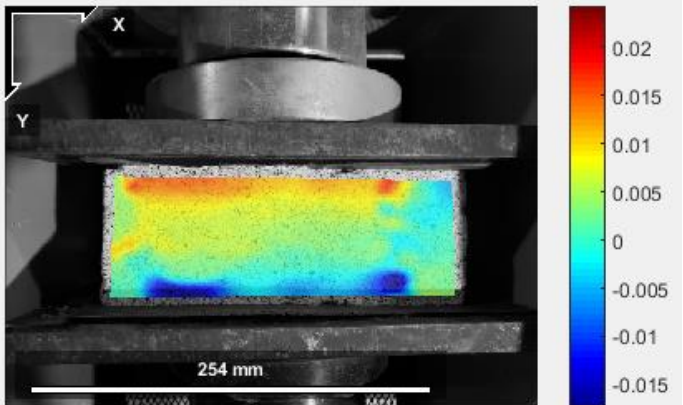
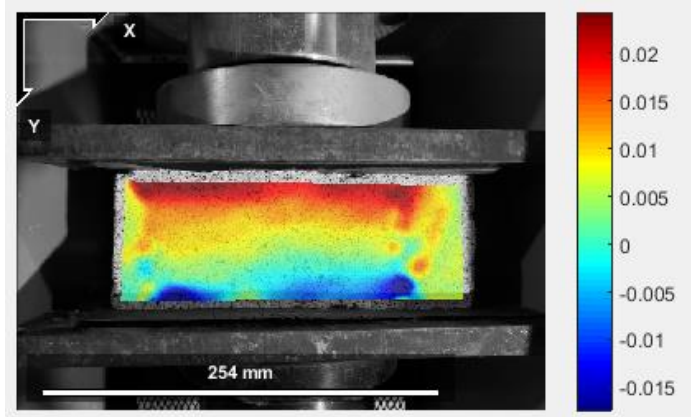
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA		
REPORTE DE ENSAYO DE COMPRESION- MÁQUINA DE ENSAYO PINZUAR PC42D		
REALIZADO POR: Yuri Abraham PANIAGUA SEGOVIA		
MUESTRA: A-03	TECNICA DE CORRELACION DIGITAL DE IMÁGENES - DIC	FECHA: 29/12/19
CARGA(Kg.)	MAPA DE DEFORMACIÓN “ ϵ_{yy} ” (STRAIN MAPS)	TIEMPO(s)
8300		16
14356		29
18364		45

Figura 103 Reporte del ensayo de compresión - deformaciones verticales.

Fuente: Elaboración propia.

3.8.11 Medición de deformaciones y desplazamientos en una pila de albañilería mediante la técnica DIC

Los sistemas de medición de deformaciones convencionales como son los extensómetros, proporcionan resultados solo en un número discreto de puntos. Además, estos dispositivos electrónicos necesitan cableado, su instalación puede llevar mucho tiempo, pueden requerir instrumentación adicional (por ejemplo, amplificadores de potencia, adquisición de datos) y son difíciles de implementar en estructuras de gran tamaño, por lo que se va a realizar un análisis de deformaciones en una pila de ladrillos industriales Tipo IV mediante la técnica de medición de deformaciones llamada correlación digital de imágenes.

Medición de desplazamientos verticales

La eficacia de la técnica de correlación digital de imágenes DIC se ha evaluado además, mediante ensayos experimentales de materiales en pilas de ladrillos industriales Tipo IV.

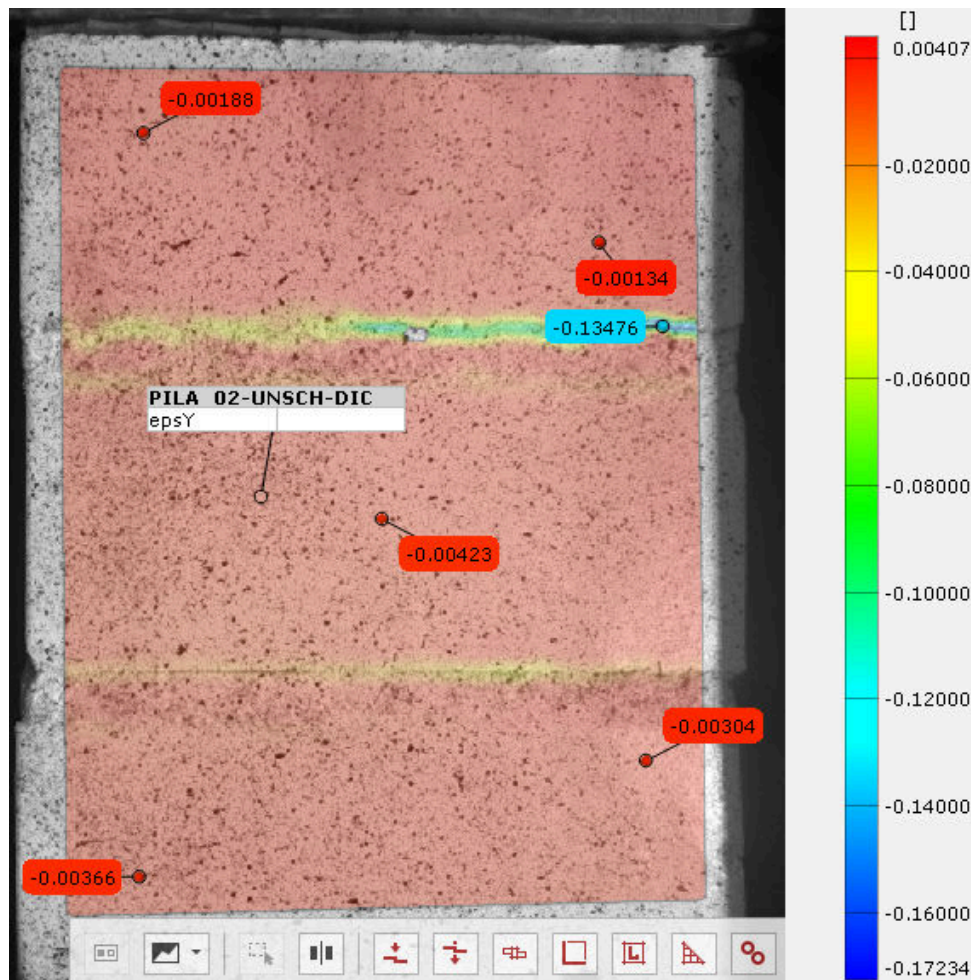


Figura 104 Mapa de deformaciones verticales antes de la falla.

Fuente: Elaboración propia.

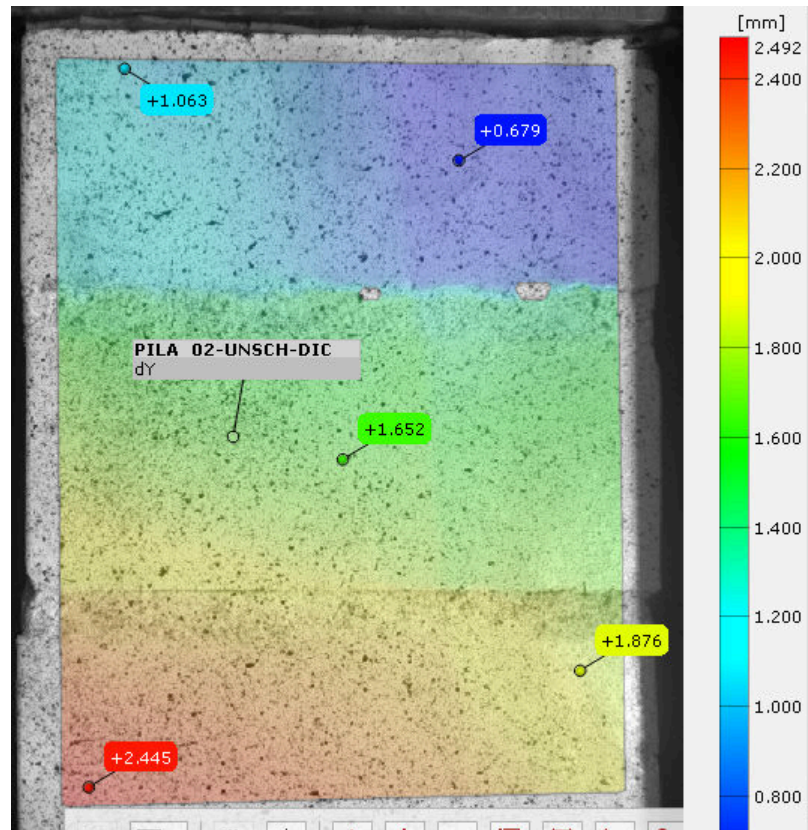


Figura 105 Mapa de desplazamientos verticales instantes antes de la falla.

Fuente: Elaboración propia.

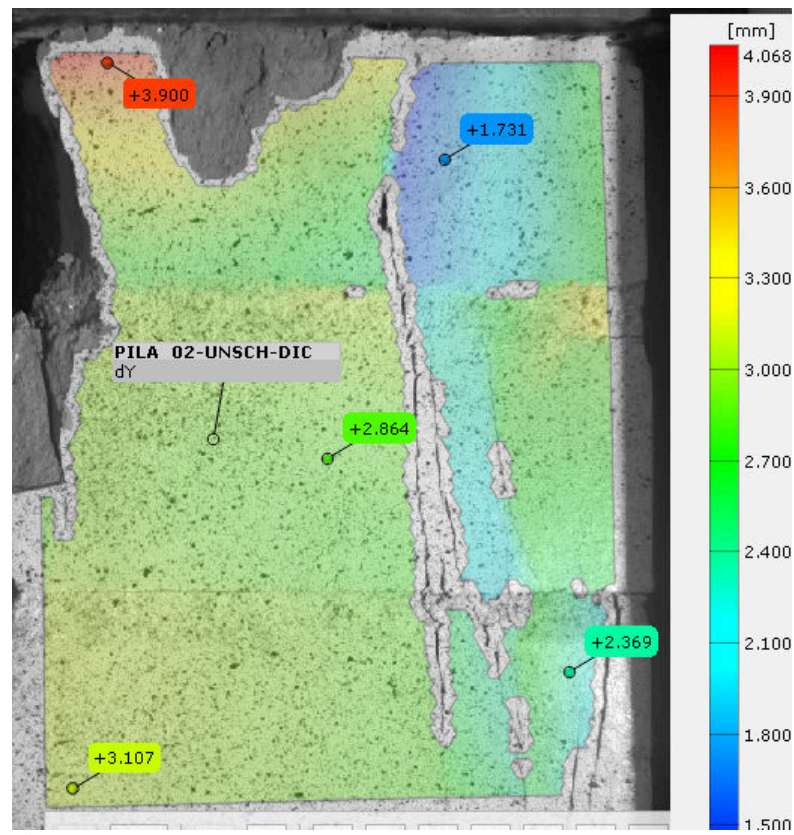


Figura 106 Mapa de desplazamientos verticales posterior a la falla.

Fuente: Elaboración propia.

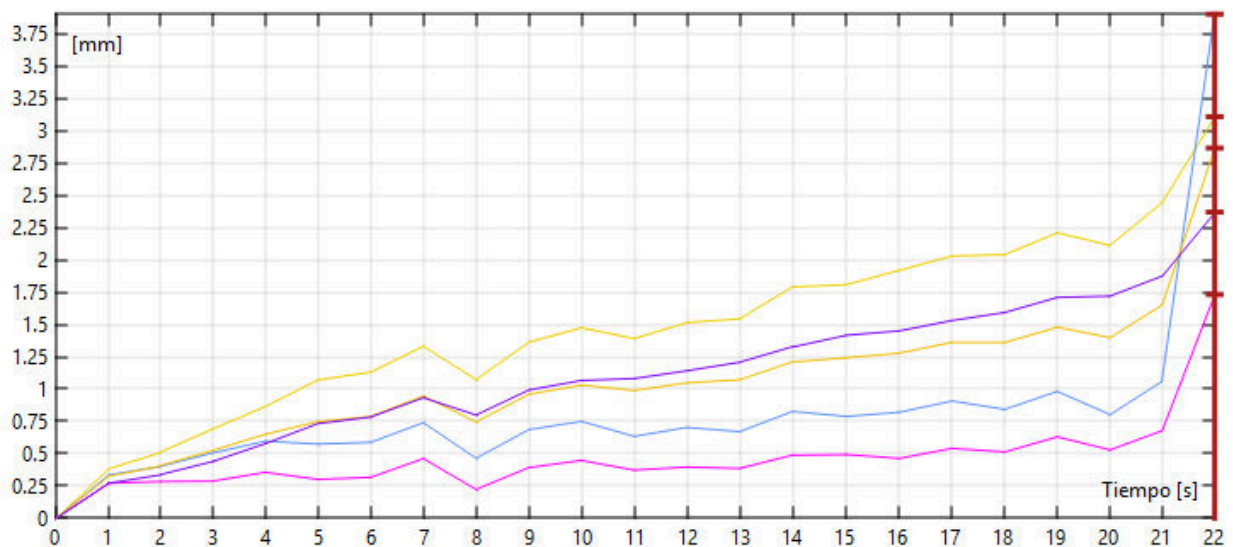


Figura 107 Gráfica de la evolución de los desplazamientos verticales.

Fuente: Elaboración propia.

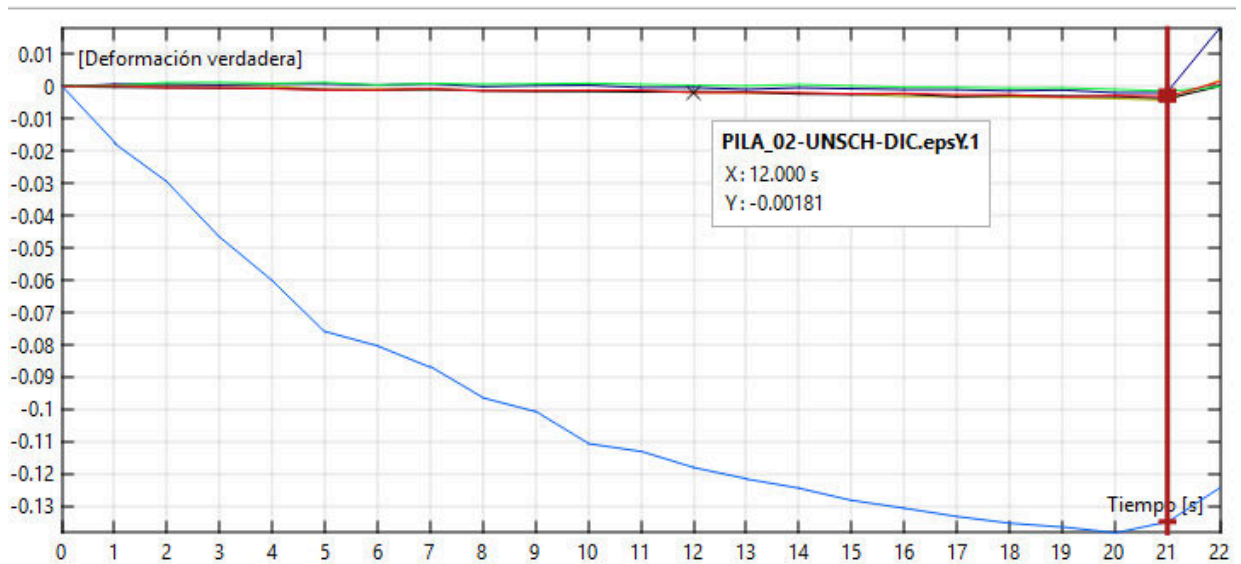


Figura 108 Gráfica de la evolución de las deformaciones verticales.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 108 nos muestra la evolución de la deformación en cada uno de los puntos analizados, en el punto analizado correspondiente a la zona del mortero se muestra un elevado incremento de la deformación respecto a los puntos analizados en las zonas del ladrillo industrial Tipo IV, mostrando así el comportamiento elástico de la pila de albañilería sometido a un esfuerzo de compresión axial, utilizando la técnica de correlación digital de imágenes DIC.

3.8.12 Obtención de los desplazamientos en ensayos de tracción

Luego de concluirse los ensayos de tracción uniaxial, se procedieron a realizarse la toma de medidas a las probetas metálicas de acero A36 (P-01, P-02,P-03) haciendo el uso de un vernier, con la finalidad de obtener la elongación que es el resultado de la diferencia entre la longitud final y la longitud inicial de la probeta.



Figura 109 Medición de la longitud final de la probeta.

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran las elongaciones obtenidas mediante el uso de un vernier, las cuales serán comparadas con las mediciones realizadas por la técnica de correlación digital de imágenes DIC.

MEDICIONES EN LABORATORIO			
MEDICIÓN	PROBETA P-01	PROBETA P-02	PROBETA P-03
LONGITUD INICIAL (L_i) mm	60	60	60
LONGITUD FINAL (L_f) mm	82	80.45	80.11
ALARGAMIENTO ($L_f - L_i$) mm	22	20.48	20.11
ELONGACIÓN FINAL %	36.7	34.1	33.5

Tabla 31 Mediciones de las probetas en laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe señalar que a todas las probetas de acero A36 (P-01, P-02,P-03) antes de realizarse los ensayos de tracción se le hicieron unas marcas distintivas las cuales son las referencias para hacer las mediciones de la longitud inicial y longitud final. Estas marcas distintivas también servirán para tomarse como puntos de análisis en la técnica de correlación digital de imágenes DIC.

En la Figura 110, se muestra el reporte de los ensayos de laboratorio de las probetas P-01,P-02,P-03, indicándose las medidas de elongación y desplazamiento.

4.0. RESULTADOS						Fecha de Ensayo : 28/08/2019		
IDENTIFICACIÓN	SECCIÓN TRANSVERSAL (mm x mm)	ÁREA (mm ²)	CARGA LÍMITE DE FLUENCIA (Kg)	TENSIÓN LÍMITE DE FLUENCIA (Kg/mm ²)	CARGA MÁXIMA (Kg)	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (Kg/mm ²)	DEFORMACIÓN (mm)	ELONGACIÓN FINAL (%)
M1-PLANCHAS	12.71 x 8.07	102.6	3,300	32.2	4,650	45.3	22.00	36.7
M2-PLANCHAS	12.72 x 8	101.8	3,250	32.0	4,690	46.1	20.48	17.5
M3-PLANCHAS	12.61 x 6.07	76.5	2,850	37.0	3,710	48.5	20.11	33.5

5.0. OBSERVACIONES:

1) La información referente al muestreo, procedencia, cantidad, fecha de obtención e identificación han sido proporcionadas por el solicitante.

Hecho por : Lic. J. Basurto P.
Técnico : A.A.G

LJB

NOTAS:

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
LABORATORIO
REPUBLICA DEL PERÚ
ENSAJO DE MATERIALES
JEFATURA
MSc. Ing. Isabel Moromi Nakata
Jefe (e) del laboratorio

Figura 110 Comparación de desplazamientos.

Fuente: Elaboración propia.

En los siguientes mapas de desplazamiento vertical, se va a tomar como punto de análisis la marca superior para obtener su desplazamiento durante el ensayo de tracción uniaxial.

PROBETA P-01

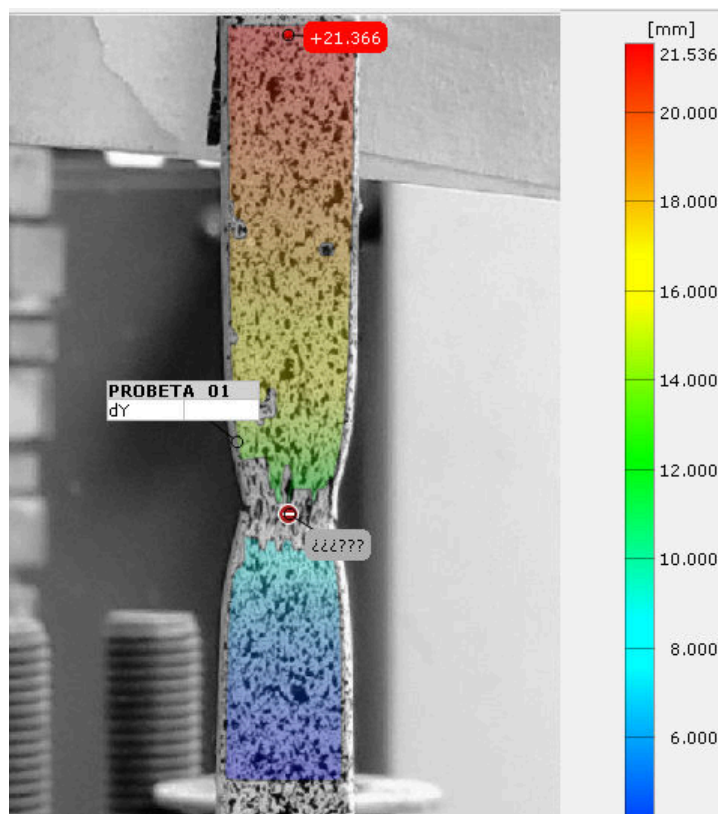
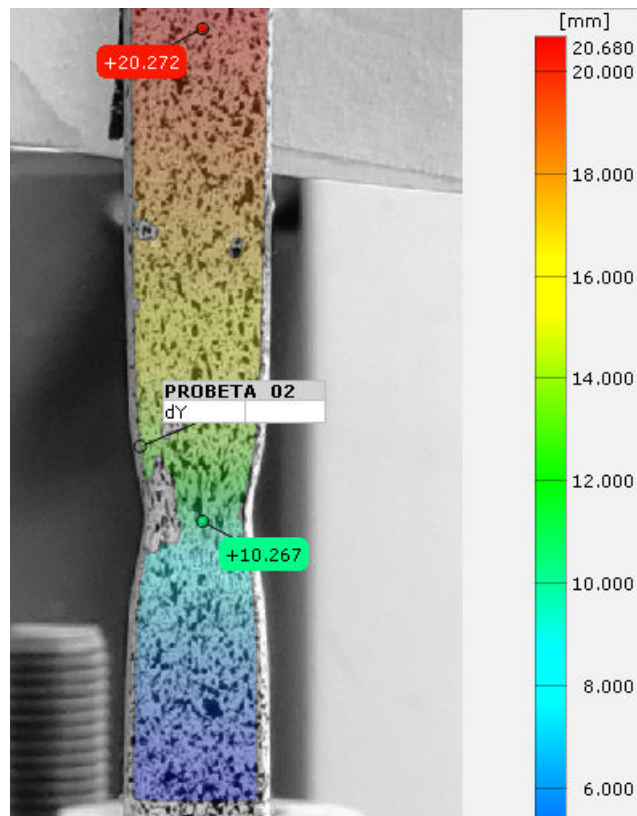
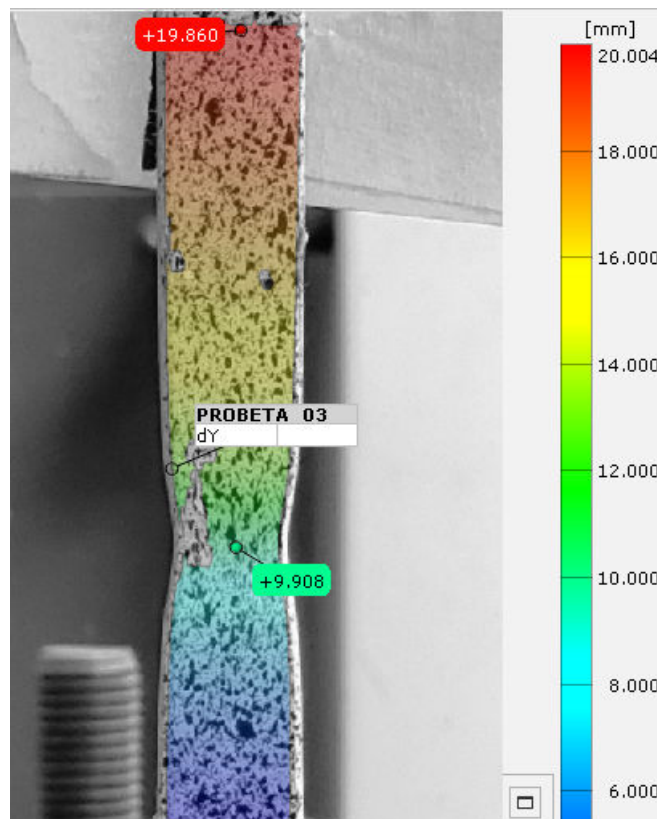


Figura 111 Mapa de desplazamiento global: Probeta P-01.

Fuente: Elaboración propia.

PROBETA P-02**Figura 112** Mapa de desplazamiento global: Probeta P-02.

Fuente: Elaboración propia.

PROBETA P-03**Figura 113** Mapa de desplazamiento global: Probeta P-03.

Fuente: Elaboración propia.

COMPARACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS			
MEDICIÓN	PROBETA P-01	PROBETA P-02	PROBETA P-03
ALARGAMIENTO DIC (mm)	21.366	20.272	19.86
ALARGAMIENTO EN LABORATORIO (mm)	22	20.48	20.11
DIFERENCIA (mm)	0.634	0.178	0.25
% ERROR	2.9	0.9	1.2

Tabla 32 Comparación de desplazamientos.

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo IV

Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de tracción y compresión axial utilizándose la técnica de correlación digital de imágenes - DIC para la obtención de las constantes elásticas de los materiales ensayados y su respectiva validación.

4.1 Contrastación de la hipótesis

4.1.1 Hipótesis estadísticas

Hipótesis específica 1

1. Para el planteamiento de la prueba de hipótesis, el coeficiente de Poisson teórico del ladrillo es $\mu = 0.25$, se plantea la siguiente hipótesis $\alpha = 0.05$:

Hipótesis nula $H_0 : \mu = 0.25$ Para el coeficiente de Poisson de las unidades de albañilería calculado experimentalmente, es significativo el uso de la técnica DIC.

Hipótesis alterna $H_1 : \mu \neq 0.25$ Para el coeficiente de Poisson de las unidades de albañilería calculado experimentalmente, no es significativo el uso de la técnica DIC.

Hipótesis específica 2

1. Para el planteamiento de la prueba de hipótesis, el coeficiente de Poisson teórico del acero es $\mu = 0.28$, se plantea la siguiente hipótesis $\alpha = 0.05$:

Hipótesis nula $H_0 : \mu = 0.28$ Para el coeficiente de Poisson de las muestras de Acero A36 calculado experimentalmente, es significativo el uso de la técnica DIC.

Hipótesis alterna $H_1 : \mu \neq 0.28$ Para el coeficiente de Poisson de las muestras de Acero A36 calculado experimentalmente, no es significativo el uso de la técnica DIC.

2. Para el planteamiento de la prueba de hipótesis, el Modulo de Young teórico del acero es $\mu = 200GPa$, se plantea la siguiente hipótesis $\alpha = 0.05$:

Hipótesis nula $H_0 : \mu = 200$ Para el Modulo de Young de las muestras de Acero A36 calculado experimentalmente, es significativo el uso de la técnica DIC.

Hipótesis alterna $H_1 : \mu \neq 200$ Para el Modulo de Young de las muestras de Acero A36 calculado experimentalmente, no es significativo el uso de la técnica DIC.

Hipótesis específica 3

1. Para el planteamiento de la prueba de hipotesis, la medición del desplazamiento determinado en laboratorio es $d = K$, se plantea la siguiente hipótesis $\alpha = 0.05$:

Hipótesis nula $H_0 : d = K$ Para el desplazamiento medido experimentalmente, es significativo el uso de la técnica DIC.

Hipótesis alterna $H_1 : d \neq K$ Para el desplazamiento medido experimentalmente, no es significativo el uso de la técnica DIC.

4.1.2 Ensayos de tracción

4.1.2.1 Coeficiente de Poisson

Probeta P-01:

Para el planteamiento de la prueba de hipótesis, el coeficiente de Poisson técnico del acero A36 es $\mu = 0.28$, se plantea la siguiente hipótesis $\alpha = 0.05$:

Hipótesis nula $H_0 : \mu = 0.28$

Hipótesis alterna $H_1 : \mu \neq 0.28$

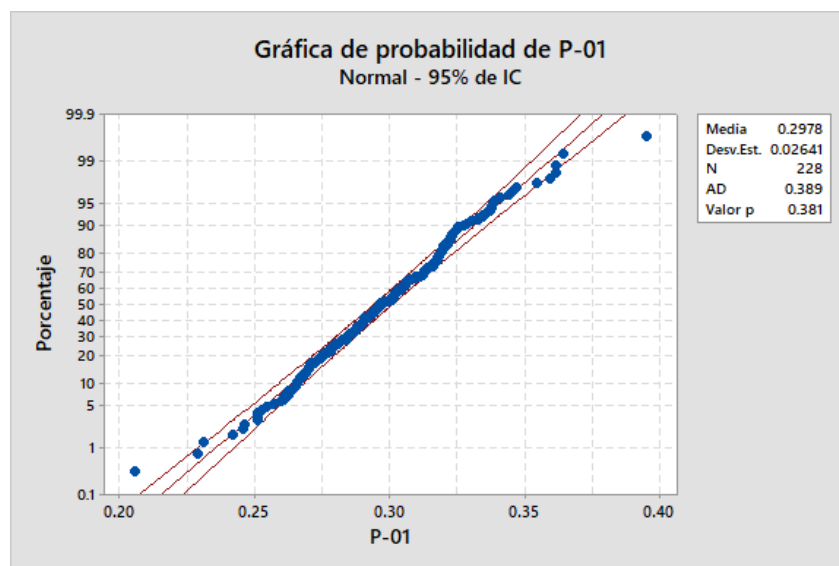


Figura 114 Gráfica de probabilidad P-01.

Fuente: Elaboración propia

Z de una muestra: P-01

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
228	0.29778	0.02641	0.00175	(0.29436; 0.30121)

μ : media de P-01

Desviación estándar conocida = 0.02641

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu = 0.28$

Hipótesis alterna $H_1: \mu \neq 0.28$

Valor Z	Valor p
-1.27	0.205

Figura 115 Prueba de hipótesis P-01.

Fuente: Elaboración propia

A un 95% de confianza se acepta H_0 , con una media de 0.2978 para el coeficiente de Poisson de la probeta P-01 calculado experimentalmente, es significativo el uso de la técnica DIC.

Probeta P-02:

Para el planteamiento de la prueba de hipótesis, el coeficiente de Poisson técnico del acero es $\mu = 0.28$, se plantea la siguiente hipótesis $\alpha = 0.05$:

Hipótesis nula $H_0: \mu = 0.28$

Hipótesis alterna $H_1: \mu \neq 0.28$

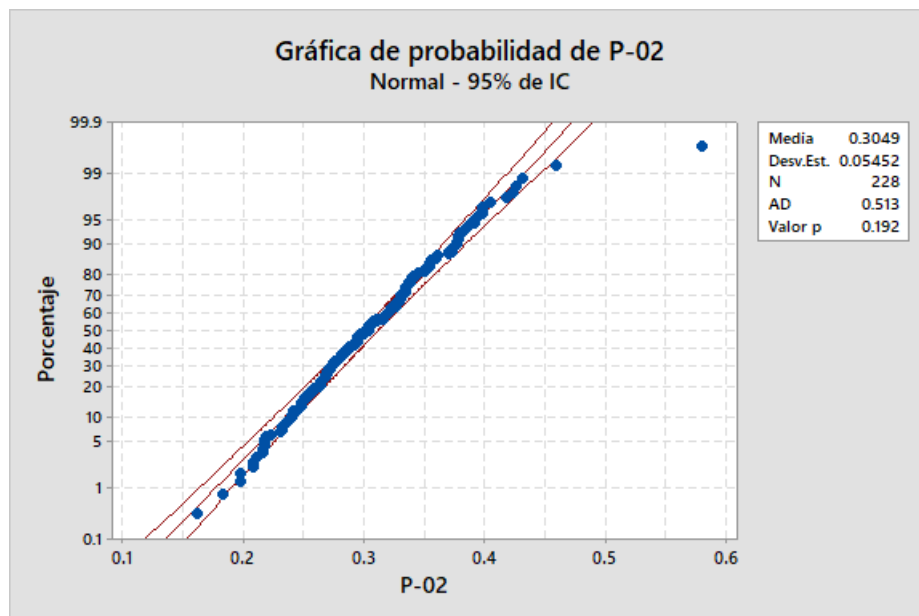


Figura 116 Gráfica de probabilidad P-02.

Fuente: Elaboración propia

Z de una muestra: P-02

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
228	0.30495	0.05452	0.00361	(0.29787; 0.31202)

μ : media de P-02

Desviación estándar conocida = 0.05452

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu = 0.28$

Hipótesis alterna $H_1: \mu \neq 0.28$

Valor Z	Valor p
1.37	0.171

Figura 117 Prueba de hipótesis P-02.

Fuente: Elaboración propia

A un 95% de confianza se acepta H_0 , con una media de 0.30495 para el coeficiente de Poisson de la probeta P-02 calculado experimentalmente, es significativo el uso de la técnica DIC.

Probeta P-03:

Para el planteamiento de la prueba de hipótesis, el coeficiente de Poisson técnico del acero es $\mu = 0.28$, se plantea la siguiente hipótesis $\alpha = 0.05$:

Hipótesis nula $H_0: \mu = 0.28$

Hipótesis alterna $H_1: \mu \neq 0.28$

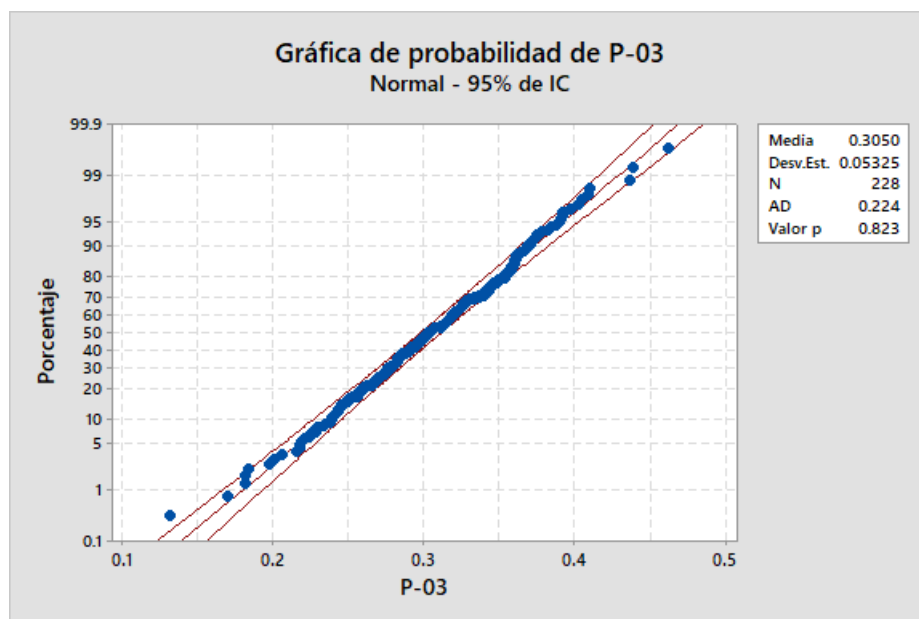


Figura 118 Gráfica de probabilidad P-03.

Fuente: Elaboración propia

Z de una muestra: P-03

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
228	0.30499	0.05325	0.00353	(0.29808; 0.31190)

μ : media de P-03

Desviación estándar conocida = 0.05325

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu = 0.28$

Hipótesis alterna $H_1: \mu \neq 0.28$

Valor Z	Valor p
1.41	0.157

Figura 119 Prueba de hipótesis P-03.

Fuente: Elaboración propia

A un 95% de confianza se acepta H_0 , con una media de 0.30499 para el coeficiente de Poisson de la probeta P-03 calculado experimentalmente, es significativo el uso de la técnica DIC.

4.1.3 Ensayos de compresión

4.1.3.1 Coeficiente de Poisson

Ladrillo A-01:

Para el planteamiento de la prueba de hipótesis, el coeficiente de Poisson técnico del ladrillo artesanal Tipo II es $\mu = 0.25$, se plantea la siguiente hipótesis $\alpha = 0.05$:

Hipótesis nula $H_0: \mu = 0.25$

Hipótesis alterna $H_1: \mu \neq 0.25$

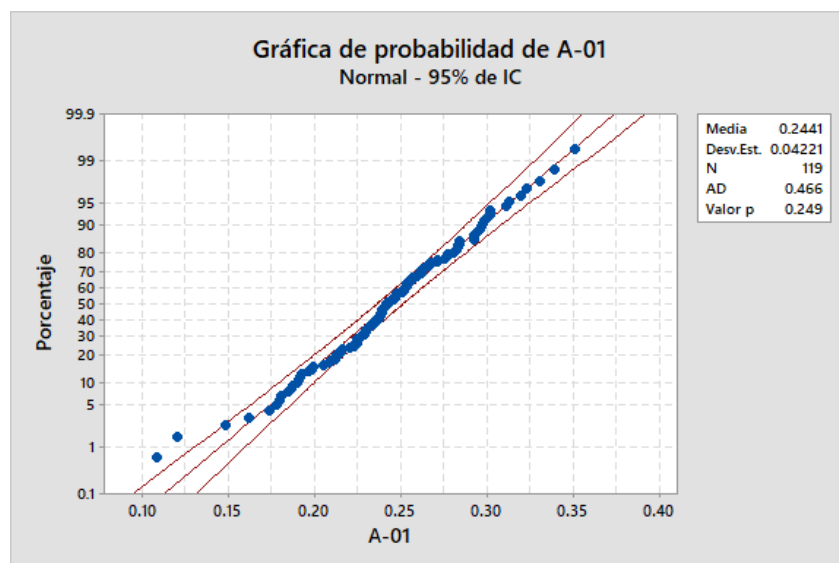


Figura 120 Gráfica de probabilidad A-01.

Fuente: Elaboración propia

Z de una muestra: A-01

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
119	0.24411	0.04221	0.00387	(0.23653; 0.25169)

μ : media de A-01
Desviación estándar conocida = 0.04221

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu = 0.25$
Hipótesis alterna $H_1: \mu \neq 0.25$

Valor Z	Valor p
-1.52	0.128

Figura 121 Prueba de hipótesis A-01.

Fuente: Elaboración propia

A un 95% de confianza se acepta H_0 , con una media de 0.2441 para el coeficiente de Poisson del ladrillo A-01 calculado experimentalmente, es significativo el uso de la técnica DIC.

Ladrillo A-02:

Para el planteamiento de la prueba de hipótesis, el coeficiente de Poisson técnico del ladrillo artesanal Tipo II es $\mu = 0.25$, se plantea la siguiente hipótesis $\alpha = 0.05$:

Hipótesis nula $H_0: \mu = 0.25$

Hipótesis alterna $H_1: \mu \neq 0.25$

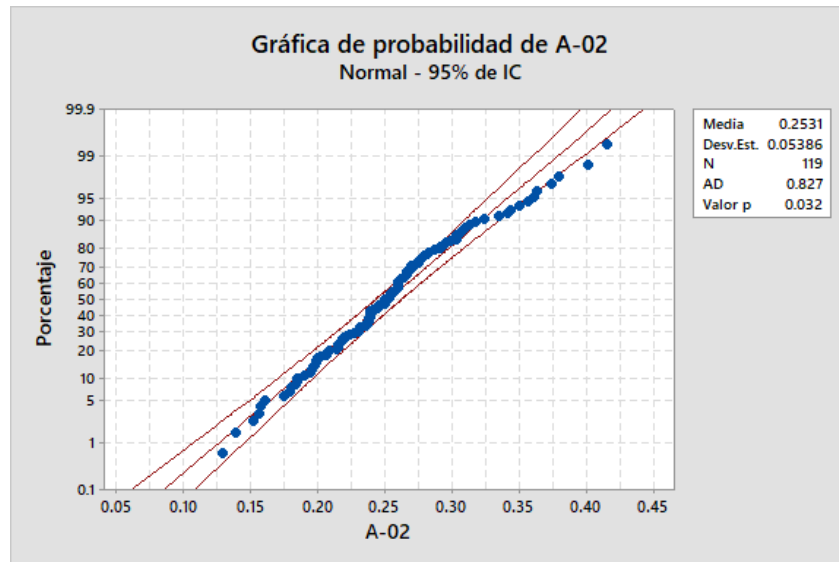


Figura 122 Gráfica de probabilidad A-02.

Fuente: Elaboración propia

Z de una muestra: A-02

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
119	0.25309	0.05386	0.00494	(0.24341; 0.26277)

μ : media de A-02
Desviación estándar conocida = 0.05386

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu = 0.25$
Hipótesis alterna $H_1: \mu \neq 0.25$

Valor Z	Valor p
0.63	0.531

Figura 123 Histograma A-02.

Fuente: Elaboración propia

A un 95% de confianza se acepta H_0 , con una media de 0.222 para el coeficiente de Poisson del ladrillo A-02 calculado experimentalmente, es significativo el uso de la técnica DIC.

Ladrillo A-03:

Para el planteamiento de la prueba de hipótesis, el coeficiente de Poisson técnico del ladrillo artesanal Tipo II es $\mu = 0.25$, se plantea la siguiente hipótesis $\alpha = 0.05$:

Hipótesis nula $H_0: \mu = 0.25$

Hipótesis alterna $H_1: \mu \neq 0.25$

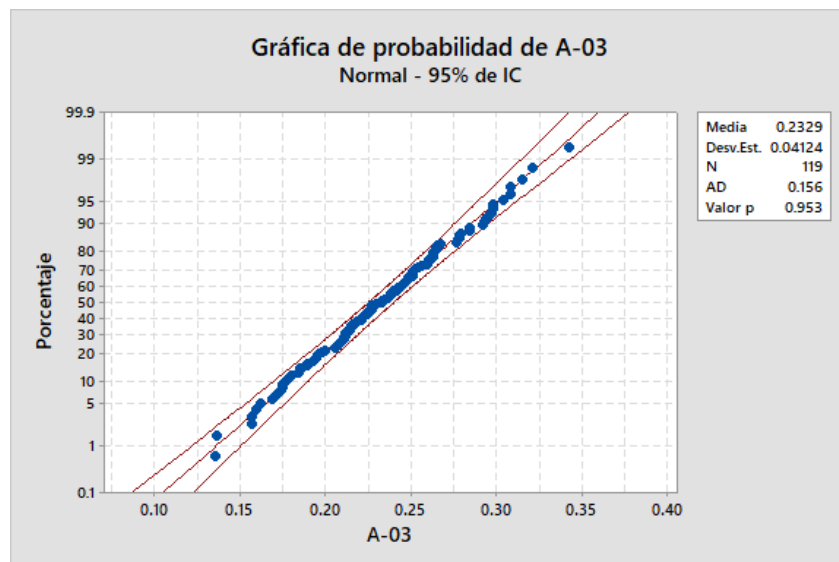


Figura 124 Gráfica de probabilidad A-03.

Fuente: Elaboración propia

Z de una muestra: A-03

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
119	0.23288	0.04124	0.00378	(0.22547; 0.24029)

μ : media de A-03

Desviación estándar conocida = 0.04124

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu = 0.25$

Hipótesis alterna $H_1: \mu \neq 0.25$

Valor Z	Valor p
-4.53	0.000

Figura 125 Histograma A-03.

Fuente: Elaboración propia

A un 95% de confianza se acepta H_0 , con una media de 0.2329 para el coeficiente de Poisson del ladrillo A-03 calculado experimentalmente, es significativo el uso de la técnica DIC.

4.2 Análisis e interpretación

4.2.1 Validación de la precisión de la técnica DIC

Finalmente, para realizar una validación de la técnica de correlación digital de imágenes, se compararon valores del coeficiente de Poisson calculados mediante la técnica de correlación digital de imágenes DIC con valores técnicos del coeficiente de Poisson para muestras de acero A36 y ladrillos artesanales Tipo II.

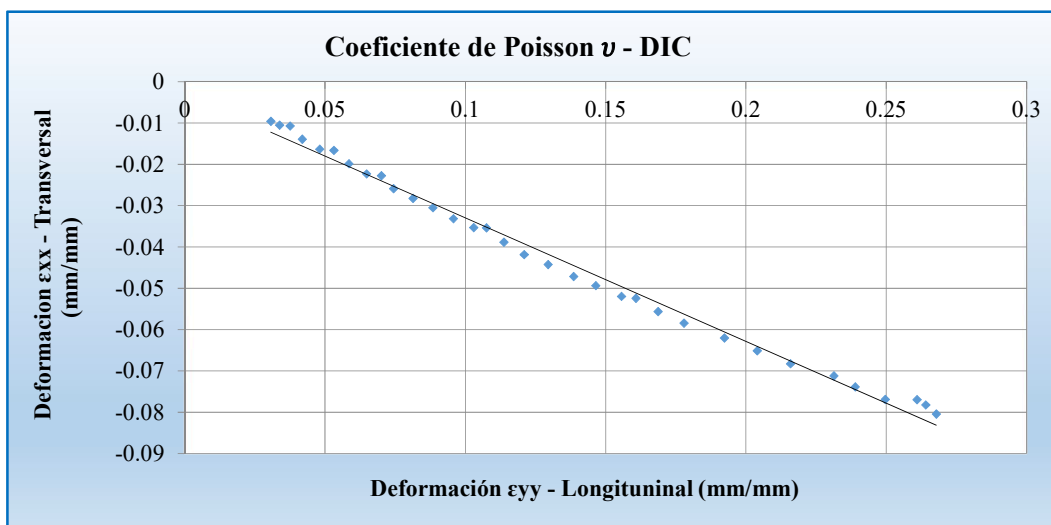


Figura 126 Coeficiente de Poisson -DIC.

Fuente: Elaboración propia

ACERO A36	LADRILLO ARTESANAL TIPO II
	
VALOR TÉCNICO COEFICIENTE DE POISSON:	VALOR TECNICO COEFICIENTE DE POISSON:
0.28	0.25
FUENTE	FUENTE
American Metals CO Database https://american-metals.com/	SAN BARTOLOMÉ, Ángel. <i>Construcciones de Albaileria</i> . Univ Catolica Peru, 1994.

Figura 127 Coeficiente de Poisson - TÉCNICOS.

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Precisión en ensayos de tracción axial

- Módulos de elasticidad E experimentales -DIC.

A partir de los datos de la Tabla 33, se calcula la media y la desviación estándar. Se obtiene una media de 197.00 [GPa] con una desviación estándar de 1.856 para la técnica DIC. Demostrando así que la técnica DIC tiene un bajo nivel de dispersión. Asimismo, el porcentaje de error con respecto al valor teórico del acero A36 de 200 [GPa] fue de 1.5% con un coeficiente de correlación de las imágenes de 0.998.

Tabla 33 Módulos de elasticidad o Young obtenidos experimentalmente.

Material	Probeta	Módulo de Young obtenido con DIC [GPa]	E (Técnico) Gpa
ACERO A36	P-01	195.48	200
ACERO A36	P-02	199.07	200
ACERO A36	P-03	196.46	200

- **Coefficientes de Poisson ν experimentales - DIC.**

A partir de los datos de la tabla 34 , se calcula la media y la desviación estándar. Se obtiene una media de 0.3024 con una desviación estándar de 0.003438 para la técnica DIC. Demostrando así que la técnica DIC tiene un bajo nivel de dispersión. Asimismo, el porcentaje de error con respecto al valor teórico del acero A36 de 0.28 fue de 7.4% con un coeficiente de correlación de las imágenes de 0.998.

Tabla 34 Coeficientes de Poisson obtenidos experimentalmente.

Material	Probeta	Coefficiente de Poisson obtenido con DIC	ν (Técnico)
ACERO A36	P-01	0.2991	0.28
ACERO A36	P-02	0.3059	0.28
ACERO A36	P-03	0.3021	0.28

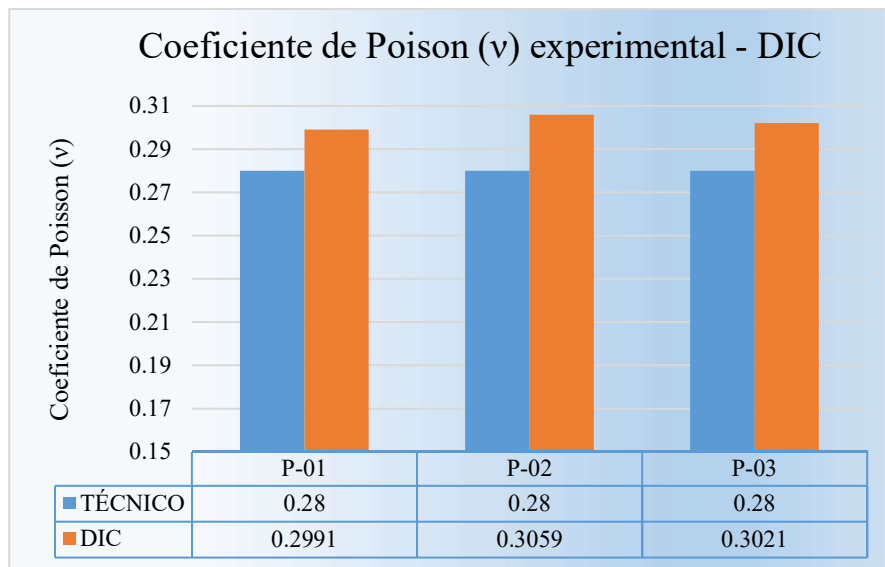


Figura 129 Resultados del coeficiente de Poisson experimental.

Fuente: Elaboración propia.

De esta forma, se comprueba que la técnica DIC es válida, con altos valores de precisión y por lo tanto, puede ser implementado para obtener el valor del coeficiente de Poisson (ν) del acero A36 . Sobre la base de este análisis, es posible predecir que su uso genere también buenos resultados con otros materiales.

4.2.3 Precisión en ensayos de compresión axial

- **Coefficientes de Poisson ν experimentales - DIC**

A partir de los datos de la tabla 35, se calcula la media y la desviación estándar. Se obtiene una media de 0.2330 con una desviación estándar de 0.0095 para la técnica DIC. Demostrando así que la técnica DIC tiene un bajo nivel de dispersión. Asimismo, el porcentaje de error con respecto al valor teórico del ladrillo de 0.25 fue de 6.80% con un coeficiente de correlación de las imágenes de 0.998.

Tabla 35 Coeficientes de Poisson obtenidos experimentalmente.

Material	MUESTRA	Coefficiente de Poisson obtenido con DIC	ν (Técnico)
LADRILLO ARTESANAL TIPO II	A-01	0.2439	0.25
LADRILLO ARTESANAL TIPO II	A-02	0.2220	0.25
LADRILLO ARTESANAL TIPO II	A-03	0.2331	0.25

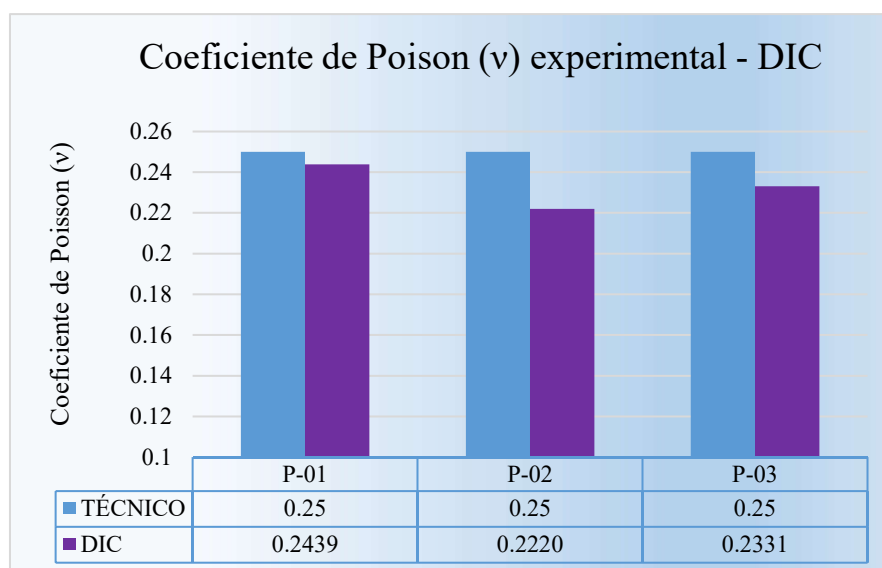


Figura 130 Resultados del coeficiente de Poisson experimental.

Fuente: Elaboración propia.

De esta forma, se comprueba que la técnica DIC es válida, con altos valores de precisión y por lo tanto, puede ser implementado para obtener el valor del coeficiente de Poisson (ν) del ladrillo artesanal Tipo II. Sobre la base de este análisis, es posible predecir que su uso genere también buenos resultados con otros materiales.

Conclusiones

1. En las pruebas de compresión usando unidades de albañilería, se limitó a la obtención de una de las constantes elásticas como es el coeficiente de Poisson, donde se obtuvo experimentalmente un valor promedio de 0.2431 con un porcentaje de error de 6.80% utilizando la técnica de correlación digital de imágenes DIC. Verificándose así la validez y precisión de esta nueva técnica alternativa de medición óptica sin contacto sobre elementos sometidos a esfuerzos de compresión axial.
2. En las pruebas de tracción se pudo obtener experimentalmente otra de las constantes elásticas del acero A36 como el coeficiente de Poisson, donde se ha obtenido experimentalmente un valor promedio de 0.3024 con un porcentaje de error de 7.4% por la técnica de correlación digital de imágenes DIC. Por lo tanto, la técnica DIC proporciona resultados precisos y confiables en el estudio del comportamiento uniaxial del acero bajo esfuerzos de tracción.
3. El objetivo principal de esta investigación fue evaluar la precisión de los resultados obtenidos con la técnica de correlación digital de imágenes DIC comparando valores técnicos y experimentales de las constantes elásticas de los materiales para validar así la técnica alternativa de medición, obteniendo finalmente un porcentaje de error de un 7.2% como promedio en los ensayos de compresión y tracción.

Recomendaciones

1. Para obtener resultados precisos y validos mediante la técnica DIC, es sumamente importante que la plataforma de obtención de fotografías permanezca inmóvil, puesto que el más mínimo movimiento se representara como un desplazamiento relativo entre la imagen de referencia y la imagen deformada.
2. Para la obtención del coeficiente de Poisson experimental mediante la técnica DIC, no se recomienda analizar los mapas de deformación "strain maps" posteriores al límite de proporcionalidad del material debido a la gran dispersión de los valores de deformación.
3. En los ensayos de tracción y compresión mediante máquinas de ensayos, es recomendable e indispensable realizar los ensayos bajo alguna normativa como la ASTM, debido a que estas máquinas tienen un límite operativo para así evitar daños.

Trabajos futuros

La presente investigación sobre la técnica de correlación digital de imágenes DIC ha demostrado su capacidad para ser mejorada y además la técnica DIC tiene un gran potencial para aplicarse en estructuras de mampostería, vigas, columnas, etc., las siguientes sugerencias pueden llevarse a cabo para profundizar el tema de investigación:

1. Evaluación del efecto del tamaño del patrón de moteado en las pruebas experimentales utilizando una técnica DIC de medición de campo completo.
2. Aplicación de la técnica DIC a muestras de mayor dimensión como muros de albañilería, vigas, columnas.
3. Obtención de las constantes elásticas para materiales compuestos mediante la técnica DIC.
4. Identificación de daños en muestras de mampostería a escala real utilizando la técnica DIC.

Referencias bibliográficas

Correlación Digital de Imágenes

- Blaber, J., Adair, B. & Antoniou, A. (2015). Ncorr: open-source 2D digital image correlation matlab software. *Experimental Mechanics*, 55(6), 1105–1122.
- Cerbu, C., Xu, D., Wang, H. & Roşca, I. (2018). The use of Digital Image Correlation in determining the mechanical properties of materials. En *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 399, 1, p. 012007). IOP Publishing.
- Hossain, M. A., Totoev, Y. & Masia, M. (2018). Using digital image correlation (DIC) technique to investigate deformation of semi-interlocking masonry (sim). *International Masonry Society*, 10(34), 41–58.
- Jones, I. & Iadicola, M. (2018). A good practices guide for digital image correlation. *International Digital Image Correlation Society*.
- LI, L.-l., Wang, Z.-y., Bai, Z.-c., Yong, M., Bo, G., Xin, H.-t., ... Bing, L. (2006). Three-dimensional finite element analysis of weakened roots restored with different cements in combination with titanium alloy posts. *Chinese medical journal*, 119(4), 305–311.
- Nazar, F. (2016). *Evaluación analítico-experimental del uso de fibras de polipropileno y acero como refuerzo en sostenimientos de hormigón proyectado para túneles interestación del Metro de Santiago*. (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Pan, B., Li, K. & Tong, W. (2013). Fast, robust and accurate digital image correlation calculation without redundant computations. *Experimental Mechanics*, 53(7), 1277–1289.
- Pan, B. [Bing], Qian, K., Xie, H. & Asundi, A. (2009). Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement science and technology*, 20(6), 062001.
- Peters, W., Ranson, W., Sutton, M., Chu, T. & Anderson, J. (1983). Application of digital correlation methods to rigid body mechanics. *Optical Engineering*, 22(6), 22.

- Poissant, J. (2007). *A New Digital Image Correlation Technique for Discontinuous Displacement Fields*. (Tesis de pregrado). Department of Mechanical Engineering McGill University, Montreal.
- Saldaña, H., Márquez Aguilar, P. & Molina, O. (2015). Concrete Stress-Strain Characterization by Digital Image Correlation. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 4, 18.
- Sutton, M. A., Ortu, J. J. & Schreier, H. (2009). *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*. Springer Science & Business Media.
- Wang, D. (2015). *Kriging Regression in Digital Image Correlation for Error Reduction and Uncertainty Quantification* (Doctoral dissertation). University of Liverpool Liverpool, UK.
- Zhang, K. (2014). Digital image correlation analysis of alkali silica reaction in concrete with recycled glass aggregate.

Anexo A

Certificados de calibración



INACAL
Instituto Nacional
de Calidad
Metrología

Laboratorio de Fuerza y Presión

Certificado de Calibración

LFP - 399 - 2018

Página 1 de 4

Expediente	99772	Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI). La Dirección de Metrología custodia, conserva y mantiene los patrones nacionales de las unidades de medida, calibra patrones secundarios, realiza mediciones y certificaciones metrologías a solicitud de los interesados, promueve el desarrollo de la metrología en el país y contribuye a la difusión del Sistema Legal de Unidades de Medida del Perú. (SLUMP). La Dirección de Metrología es miembro del Sistema Interamericano de Metrología (SIM) y participa activamente en las Intercomparaciones que éste realiza en la región. Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones el usuario está obligado a recalibrar sus instrumentos a intervalos apropiados.
Solicitante	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA	
Dirección	Av. Tupac Amaru 210 - Rimac	
Instrumento de Medición	MAQUINA DE ENSAYO UNIAXIAL	
Intervalo de Indicaciones	0 kgf a 101 972 kgf (0 kN a 1 000 kN) (*)	
Resolución	1 kgf	
Marca	ZWICK ROELL	
Modelo	SP 1000	
Número de Serie	57940	
Procedencia	ALEMANIA	
Clase de Exactitud	NO INDICA	
Fecha de Calibración	2018-09-14	

Este certificado de calibración sólo puede ser difundido completamente y sin modificaciones. Los extractos o modificaciones requieren la autorización de la Dirección de Metrología del INACAL. Certificados sin firma y sello carecen de validez.

Fecha	Area de Mecánica	Laboratorio de Fuerza y Presión
 2018-09-19	 ALDO QUIROGA ROJAS Dirección de Metrología	 LEONARDO DE LA CRUZ GARCIA Dirección de Metrología

Instituto Nacional de Calidad - INACAL
Dirección de Metrología
Calle Las Camelias N° 817, San Isidro, Lima - Perú
Tel: (01) 640-8820 Anexo 1501
Email: metrologia@inacal.gob.pe
Web: www.inacal.gob.pe

Puede verificar el número de certificado en la página:
<https://aplicaciones.inacal.gob.pe/dm/verificar/>



INACAL
Instituto Nacional
de Calidad
Metrología

Certificado de Calibración

LFP - 399 - 2018

Laboratorio de Fuerza y Presión

Página 1 de 4

Expediente	99772	Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI)
Solicitante	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA	
Dirección	Av. Tupac Amaru 210 - Rímac	La Dirección de Metrología custodia, conserva y mantiene los patrones nacionales de las unidades de medida, calibra patrones secundarios, realiza mediciones y certificaciones metrológicas a solicitud de los interesados, promueve el desarrollo de la metrología en el país y contribuye a la difusión del Sistema Legal de Unidades de Medida del Perú. (SLUMP).
Instrumento de Medición	MAQUINA DE ENSAYO UNIAXIAL	
Intervalo de Indicaciones	0 kgf a 101 972 kgf (0 kN a 1 000 kN) (*)	La Dirección de Metrología es miembro del Sistema Interamericano de Metrología (SIM) y participa activamente en las Intercomparaciones que éste realiza en la región.
Resolución	1 kgf	
Marca	ZWICK ROELL	Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones el usuario está obligado a recalibrar sus instrumentos a intervalos apropiados.
Modelo	SP 1000	
Número de Serie	57940	
Procedencia	ALEMANIA	
Clase de Exactitud	NO INDICA	
Fecha de Calibración	2018-09-14	

Este certificado de calibración sólo puede ser difundido completamente y sin modificaciones. Los extractos o modificaciones requieren la autorización de la Dirección de Metrología del INACAL.
Certificados sin firma y sello carecen de validez.

Fecha	Area de Mecánica	Laboratorio de Fuerza y Presión
 2018-09-19	 ALDO QUIROGA ROJAS Dirección de Metrología	 LEONARDO DE LA CRUZ GARCIA Dirección de Metrología

Instituto Nacional de Calidad - INACAL
Dirección de Metrología
Calle Las Camelias N° 817, San Isidro, Lima – Perú
Telf.: (01) 640-8820 Anexo 1501
Email: metrologia@inacal.gob.pe
Web: www.inacal.gob.pe

Puede verificar el número de certificado en la página:
<https://aplicaciones.inacal.gob.pe/dm/verificar/>



INACAL
Instituto Nacional
de Calidad
Metrología

Certificado de Calibración

LFP - 399 - 2018

Laboratorio de Fuerza y Presión

Página 1 de 4

Expediente	99772	Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI)
Solicitante	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA	
Dirección	Av. Tupac Amaru 210 - Rímac	La Dirección de Metrología custodia, conserva y mantiene los patrones nacionales de las unidades de medida, calibra patrones secundarios, realiza mediciones y certificaciones metrológicas a solicitud de los interesados, promueve el desarrollo de la metrología en el país y contribuye a la difusión del Sistema Legal de Unidades de Medida del Perú. (SLUMP).
Instrumento de Medición	MAQUINA DE ENSAYO UNIAXIAL	
Intervalo de Indicaciones	0 kgf a 101 972 kgf (0 kN a 1 000 kN) (*)	La Dirección de Metrología es miembro del Sistema Interamericano de Metrología (SIM) y participa activamente en las Intercomparaciones que éste realiza en la región.
Resolución	1 kgf	
Marca	ZWICK ROELL	Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones el usuario está obligado a recalibrar sus instrumentos a intervalos apropiados.
Modelo	SP 1000	
Número de Serie	57940	
Procedencia	ALEMANIA	
Clase de Exactitud	NO INDICA	
Fecha de Calibración	2018-09-14	

Este certificado de calibración sólo puede ser difundido completamente y sin modificaciones. Los extractos o modificaciones requieren la autorización de la Dirección de Metrología del INACAL.
Certificados sin firma y sello carecen de validez.

Fecha	Area de Mecánica	Laboratorio de Fuerza y Presión
 2018-09-19	 ALDO QUIROGA ROJAS Dirección de Metrología	 LEONARDO DE LA CRUZ GARCIA Dirección de Metrología

Instituto Nacional de Calidad - INACAL
Dirección de Metrología
Calle Las Camelias N° 817, San Isidro, Lima – Perú
Telf.: (01) 640-8820 Anexo 1501
Email: metrologia@inacal.gob.pe
Web: www.inacal.gob.pe

Puede verificar el número de certificado en la página:
<https://aplicaciones.inacal.gob.pe/dm/verificar/>



Certificado de Calibración

LFP - 399 - 2018

Laboratorio de Fuerza y Presión

Página 1 de 4

Expediente	99772	Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI)
Solicitante	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA	
Dirección	Av. Tupac Amaru 210 - Rímac	La Dirección de Metrología custodia, conserva y mantiene los patrones nacionales de las unidades de medida, calibra patrones secundarios, realiza mediciones y certificaciones metrológicas a solicitud de los interesados, promueve el desarrollo de la metrología en el país y contribuye a la difusión del Sistema Legal de Unidades de Medida del Perú. (SLUMP).
Instrumento de Medición	MAQUINA DE ENSAYO UNIAXIAL	
Intervalo de Indicaciones	0 kgf a 101 972 kgf (0 kN a 1 000 kN) (*)	La Dirección de Metrología es miembro del Sistema Interamericano de Metrología (SIM) y participa activamente en las Intercomparaciones que éste realiza en la región.
Resolución	1 kgf	
Marca	ZWICK ROELL	Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones el usuario está obligado a recalibrar sus instrumentos a intervalos apropiados.
Modelo	SP 1000	
Número de Serie	57940	
Procedencia	ALEMANIA	
Clase de Exactitud	NO INDICA	
Fecha de Calibración	2018-09-14	

Este certificado de calibración sólo puede ser difundido completamente y sin modificaciones. Los extractos o modificaciones requieren la autorización de la Dirección de Metrología del INACAL.
Certificados sin firma y sello carecen de validez.

Fecha	Area de Mecánica	Laboratorio de Fuerza y Presión
 2018-09-19	 ALDO QUIROGA ROJAS Dirección de Metrología	 LEONARDO DE LA CRUZ GARCIA Dirección de Metrología

Instituto Nacional de Calidad - INACAL
Dirección de Metrología
Calle Las Camelias N° 817, San Isidro, Lima – Perú
Telf.: (01) 640-8820 Anexo 1501
Email: metrologia@inacal.gob.pe
Web: www.inacal.gob.pe

Puede verificar el número de certificado en la página:
<https://aplicaciones.inacal.gob.pe/dm/verificar/>

Anexo B

Informes de laboratorio

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Facultad de Ingeniería Civil
LABORATORIO N° 1 DE ENSAYO DE MATERIALES "ING. MANUEL GONZÁLES DE LA COTERA"

Carrera de Ingeniería Civil Acreditada por

ABET

INFORME

Del : Laboratorio N°1 Ensayo de Materiales
A : INVESTIGACION: ANALISIS PARA ENSAYOS EXPERIMENTALES MEDIANTE CORRELACION DIGITAL DE IMÁGENES

Obra : ENSAYOS DE TRACCION PARA INVESTIGACION
Ubicación : UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA
Asunto : Ensayo de Tracción en Aceros
Expediente N° : 19-3446
Recibo N° : 67380
Fecha de emisión : 28/08/2019

1.0. DE LA MUESTRA : Consistente en 03 probetas planas de acero.

2.0. DEL EQUIPO : Máquina de ensayo uniaxial, ZWICK/ROELL
Certificado de calibración: LFP-399-2018

3.0. MÉTODO DEL ENSAYO : Norma de referencia NTP 350.405:2015
Procedimiento interno AT-PR-10.

4.0. RESULTADOS : Fecha de Ensayo : 28/08/2019

IDENTIFICACIÓN	SECCIÓN TRANSVERSAL (mm x mm)	ÁREA (mm²)	CARGA LÍMITE DE FLUENCIA (Kg)	TENSIÓN LÍMITE DE FLUENCIA (Kg/mm²)	CARGA MÁXIMA (Kg)	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (Kg/mm²)	DEFORMACIÓN (mm)	ELONGACIÓN FINAL (%)
M1-PLANCH	12.71 x 8.07	102.6	3,300	32.2	4,650	45.3	22.00	36.7
M2-PLANCH	12.72 x 8	101.8	3,250	32.0	4,690	46.1	20.48	17.5
M3-PLANCH	12.61 x 6.07	76.5	2,850	37.0	3,710	48.5	20.11	33.5

5.0. OBSERVACIONES: 1) La información referente al muestreo, procedencia, cantidad, fecha de obtención e identificación han sido proporcionadas por el solicitante.

Hecho por : Lic. J. Basurto P.
Técnico : A.A.G

L.J.B.

NOTAS:
1) Se prohíbe la reproducción o modificación de este informe sin previa autorización del laboratorio.
2) Este informe solo brinda resultados sobre las muestras que han sido ensayadas.

MSc. Ing. Isabel Moromi Nakata
Jefe (e) del laboratorio

UNI-LEM
La Calidad es nuestro compromiso
Laboratorio Certificado ISO 9001

Av. Tupac Amaru N° 210, Lima 25
apartado 1301 - Perú

(511) 381-3343

(511) 481-1070 Anexo: 4058 / 4046

www.lem.uni.edu.pe

lem@uni.edu.pe

Laboratorio de Ensayo de Materiales - UNI

Anexo C

Instrucciones para el empleo del software “Ncorr”

El programa alternativo que se puede utilizar para realizar la correlación digital de imágenes es el módulo 2D-DIC Matlab software Ncorr v1.2 (open source). El programa se puede descargar del siguiente link:

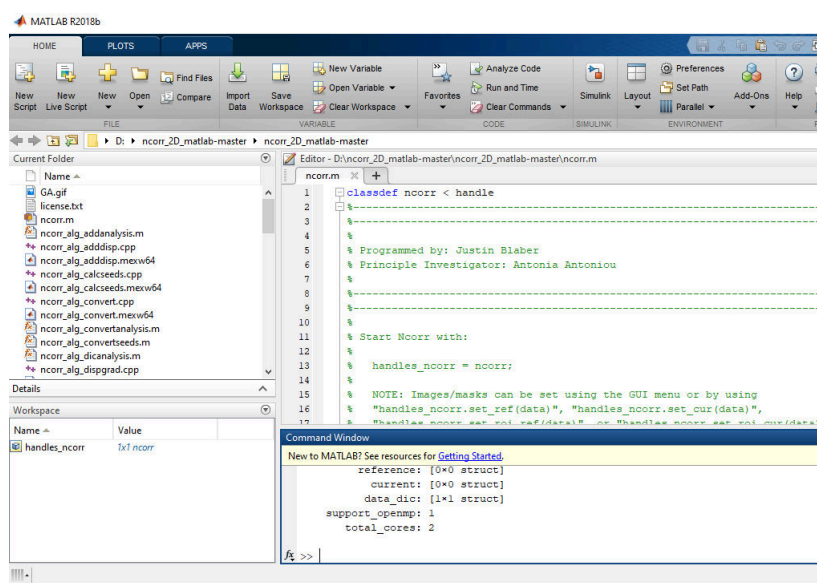
<http://www.ncorr.com/index.php/downloads>

Requerimientos de instalación:

1. Requerimientos de la versión: Matlab R2009a+ o Matlab R2015a+.
2. Requerimientos de la caja de herramientas: Image Processing Toolbox y Statistics Toolbox.
3. Requerimientos del Sistema operativo: Window o Linux.
4. Requerimientos del compilador.: Visual Studio 2008+ o GCC 4.2+

Instalación Automática:

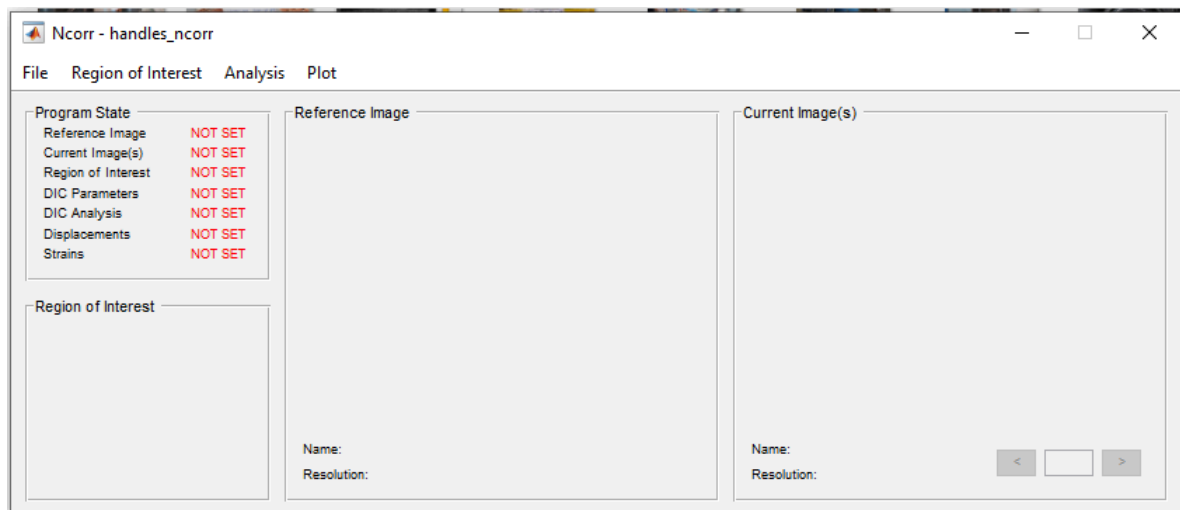
1. Abrir Matlab.
2. Abrir la carpeta donde se guardo la carpeta Ncorr.



3. Escriba `handles_ncorr = ncorr` en la ventana de comandos de MATLAB.



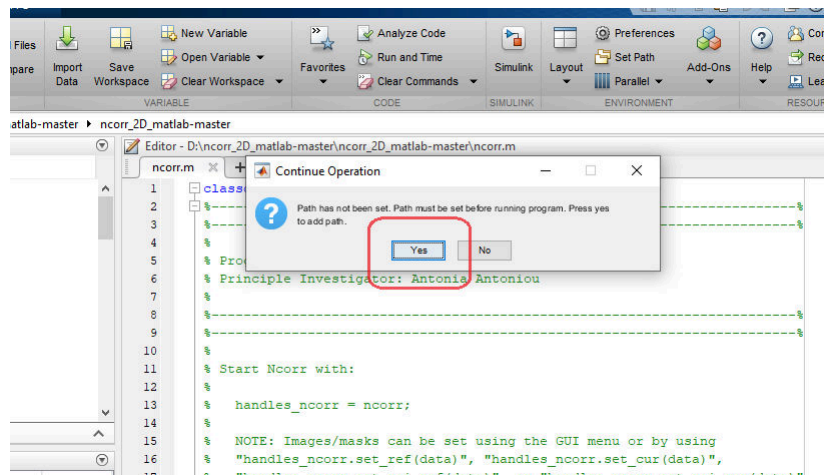
4. Una ventana de dialogo aparecerá. Presionar OK.
5. Un cuadro de dialogo de apoyo aparecerá. Hacer click en la opción de “OpenMP” si es que se dispone de un procesador de varios núcleos. Especificar el número de núcleos que posee el procesador de su computador en la opción de número de núcleos. Finalmente, si los archivos compilan apropiadamente, la ventana principal de el programa Ncorr aparecerá.



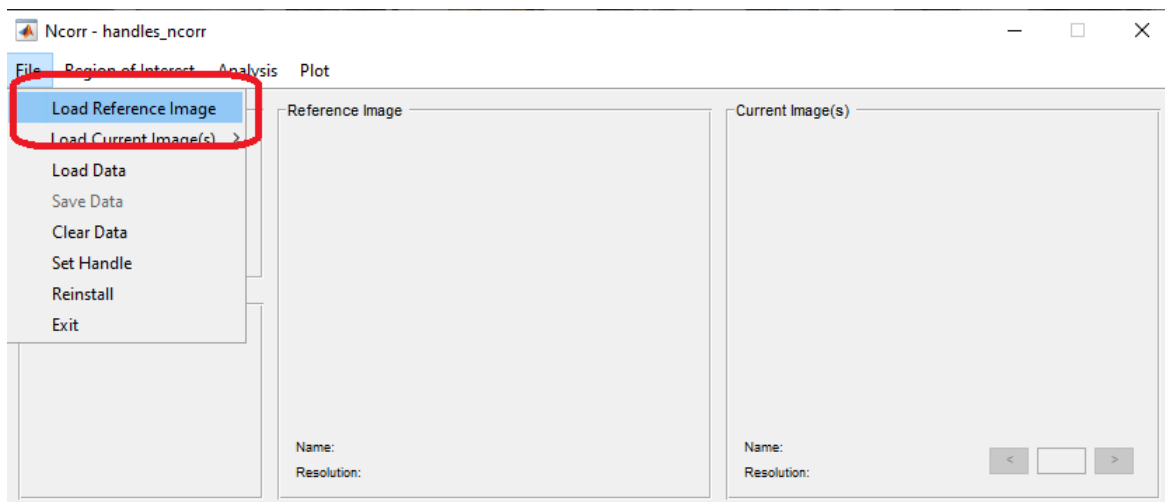
6. Mas detalles de la instalación del programa pueden ser encontrados en el siguiente link.<http://www.ncorr.com/index.php/downloads>.

Guía de usuario del Software Ncorr

1. Antes de utilizar el programa, las imágenes que serán analizadas deben tener la siguiente extensión: name_#.ext
2. Escribir “handles_ncorr = ncorr” en la ventana de comando de MATLAB.
3. Presionar la opción ”yes”



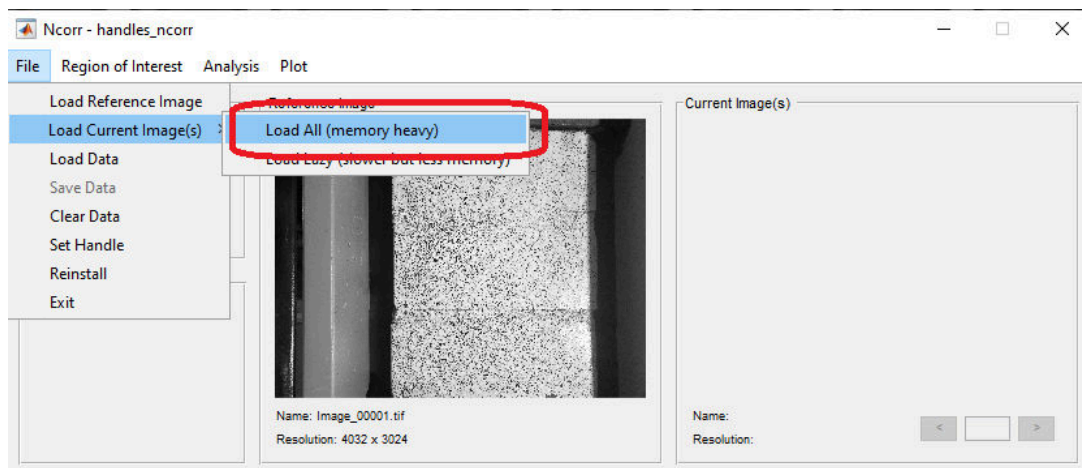
4. Ir a: File > Load Reference Image.



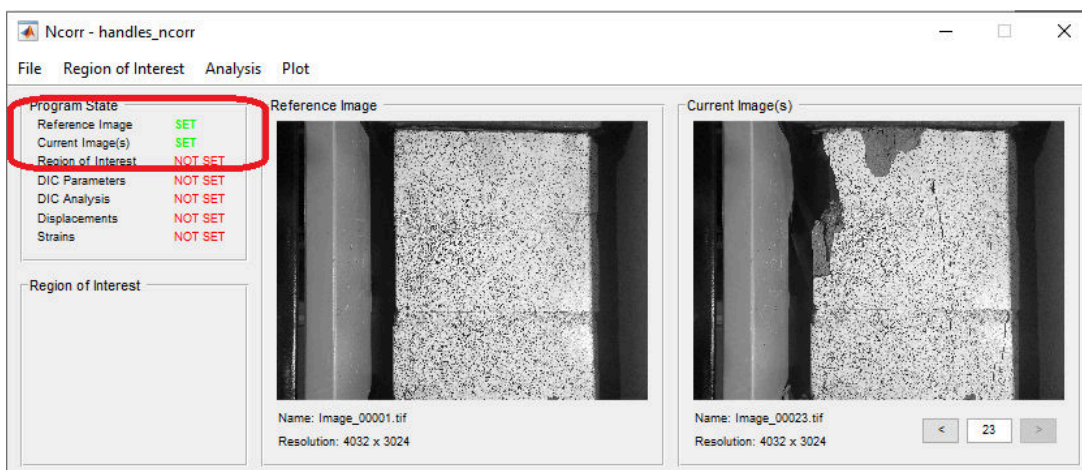
5. Seleccionar la imagen de referencia para el análisis. Cuando la imagen de referencia este cargada, la opción de “Reference Image” aparecerá la palabra SET de color verde.



6. Ir a: File > Load current image(s). Seleccione las imágenes que serán analizadas.



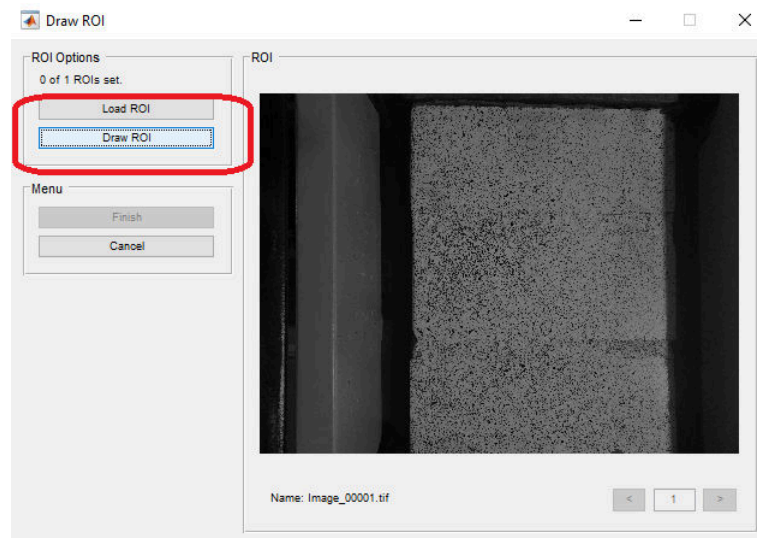
7. Aparecerá la ventana de selección de imágenes. Seleccione las imágenes que serán analizadas. Cuando las imágenes estén cargadas, la ventana deberá aparecer de la siguiente forma:



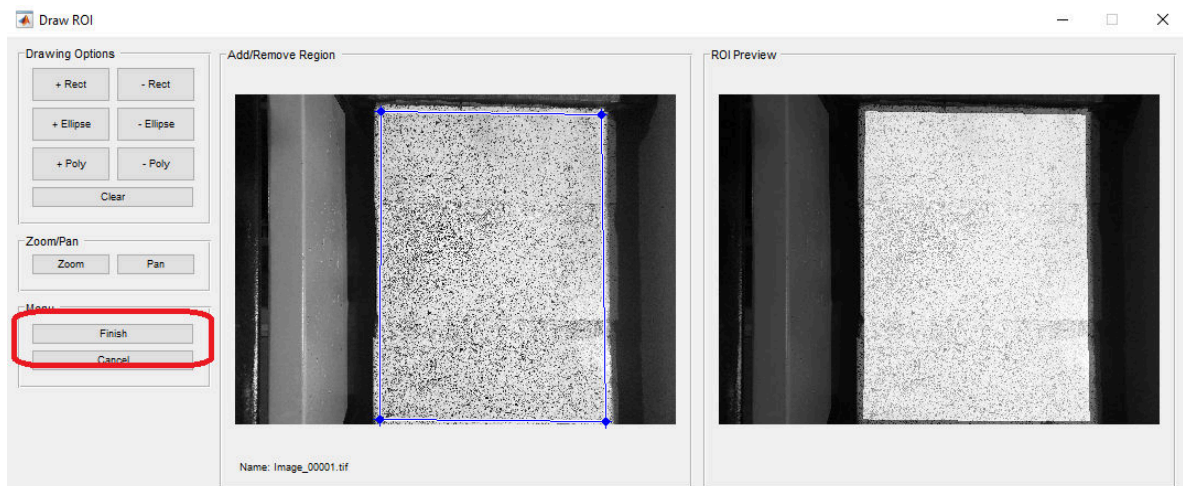
8. Ir a: Region of Interest > Set Reference ROI.



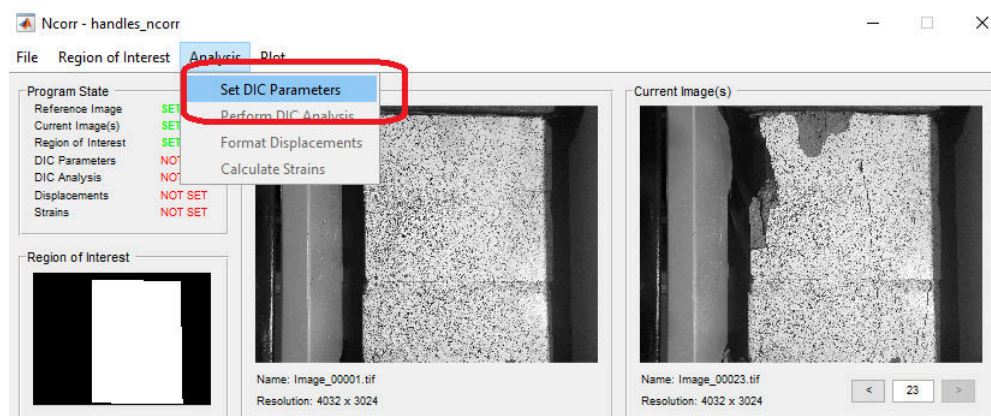
9. Aparecerá la ventana de “Draw ROI”. Seleccionar la opción: “Draw ROI button”.



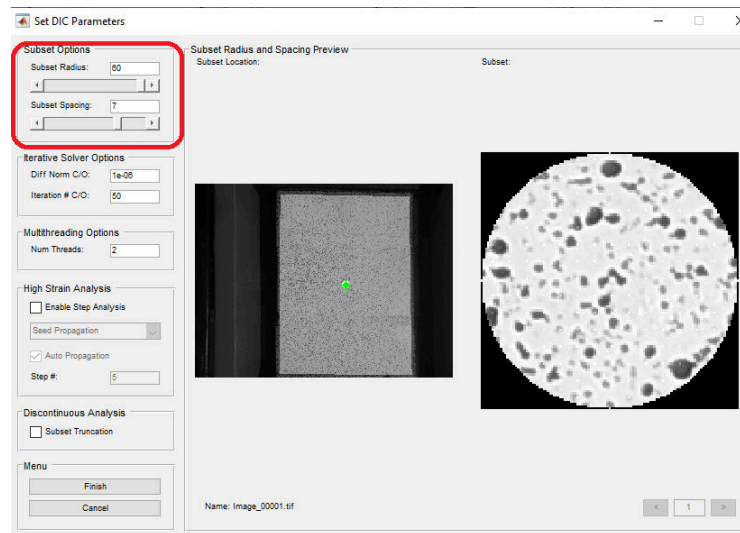
10. Trazar la región de interés en la imagen. Luego, seleccionar la opción “Finish” en la ventana de DRAW ROI.



11. Ir a: Analysis > Set DIC Parameters.



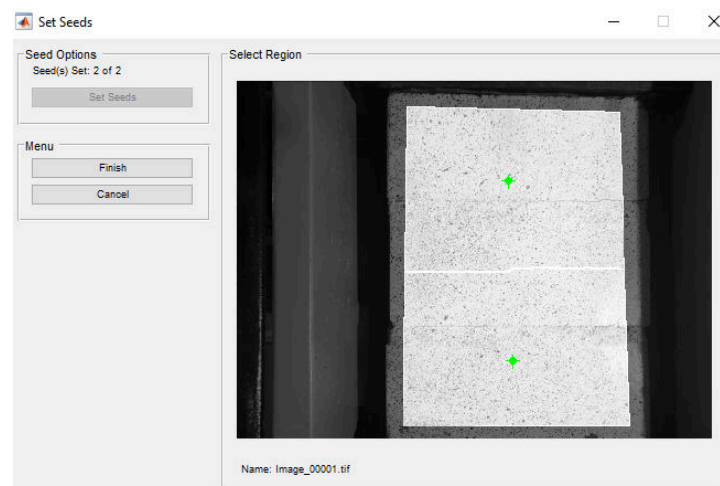
12. La ventana de “Set DIC Parameters” aparecerá. Seleccionar un radio de “subset” de 60 y un “subset” de espaciado de 7. Presionar la opción “finish”.



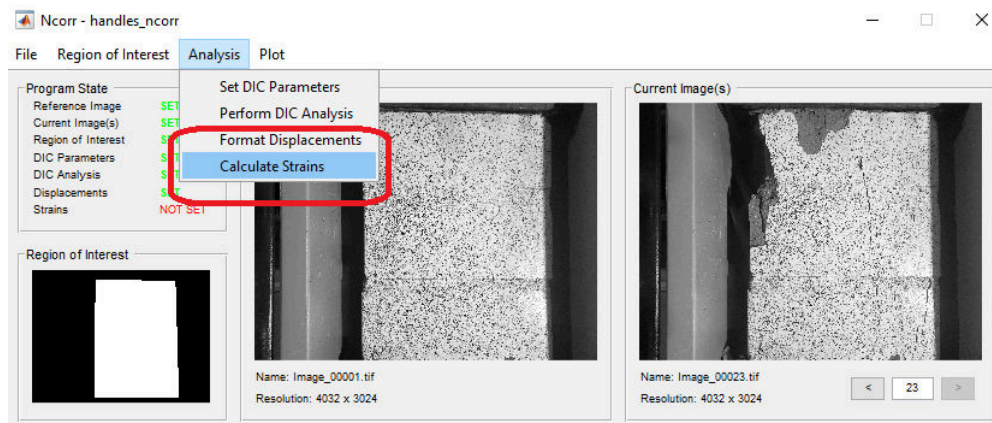
13. Ir a: Analysis > Perform DIC Analysis.



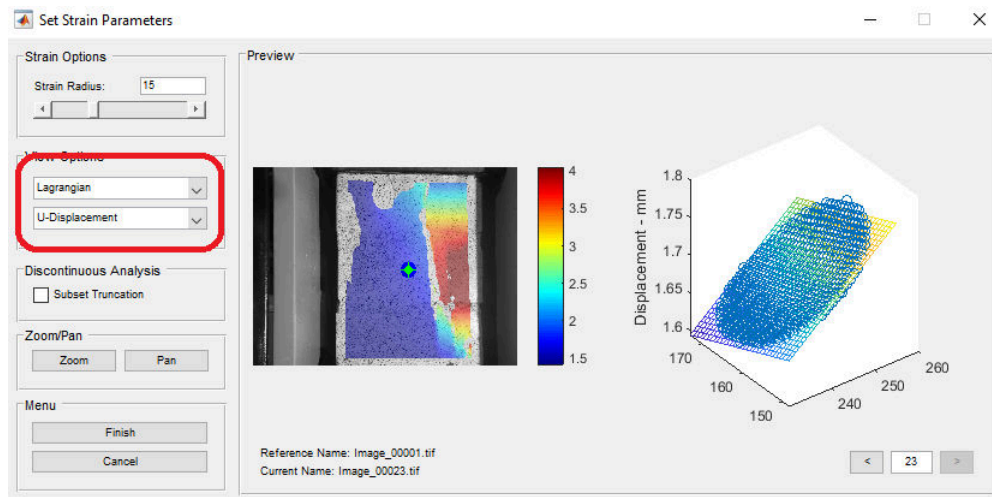
14. La ventana “Select Region” aparecerá. Seleccionar una región continua a procesar.



15. Ir a: Analysis > Calculate Strain.



16. La ventana “Set Parameters” aparecerá. Seleccionar la opción “Lagrangian”. Presionar “finish”.



17. Ir a: “Plot > View Displacement Plots or Plot > View Strain Plots”.



18. Para más detalles del uso del programa, revisar el manual del programa en el siguiente link: <http://www.ncorr.com/index.php/downloads>

Anexo D

Datos Maquina Universal "Zwick/Roell SP-1000"

Probeta P-01

Probeta P-01		
Datos Maquina Universal "Zwick/Roell"		
Tiempo	Deformación	Esfuerzo (Kg/cm2)
1	0.000332	428.44
2	0.001139	896.12
3	0.001900	1383.95
4	0.002660	1895.75
5	0.003420	2447.33
6	0.004180	3122.82
7	0.004941	3785.84
8	0.005701	3950.76
9	0.006461	3917.18
10	0.007221	3943.11
11	0.007981	4017.88
12	0.008742	3954.36
13	0.009502	3895.90
14	0.010262	3910.89
15	0.011022	4023.83
16	0.011783	4198.12
17	0.012543	4298.12
18	0.013303	4378.90
19	0.014063	4465.59
20	0.014824	4545.73
21	0.015584	4612.31
22	0.016344	4670.69
23	0.017104	4739.76
24	0.017865	4799.67
25	0.018625	4854.44
26	0.019385	4898.37
27	0.020145	4952.19
28	0.020906	4996.89
29	0.021666	5038.81
30	0.022426	5074.10

31	0.023186	5113.05
32	0.023947	5146.09
33	0.024707	5178.49
34	0.025467	5207.56
35	0.026227	5234.64
36	0.026988	5260.94
37	0.027748	5284.07
38	0.028508	5300.79
39	0.029268	5325.44
40	0.030029	5345.09
41	0.030789	5363.28
42	0.031549	5379.25
43	0.032594	5400.13
44	0.034008	5424.79
45	0.035513	5447.81
46	0.037156	5468.66
47	0.038680	5484.75
48	0.040242	5497.47
49	0.041912	5508.57
50	0.043617	5516.49
51	0.045046	5521.26
52	0.046589	5524.19
53	0.048295	5524.88
54	0.050029	5523.00
55	0.051676	5519.05
56	0.053387	5513.10
57	0.055208	5503.51
58	0.057243	5488.46
59	0.059389	5465.77
60	0.061365	5430.96
61	0.063375	5361.86
62	0.065481	5228.33
63	0.067608	5013.08
64	0.069476	4769.55
65	0.071647	4384.33
66	0.073000	4044.88

Probeta P-02

Probeta P-02		
Datos Maquina Universal "Zwick/Roell SP-1000"		
Tiempo	Deformación	Esfuerzo (Kg/cm2)
1	0.00010	517.87
2	0.00091	1488.58
3	0.00190	2114.66
4	0.00288	2818.41
5	0.00387	3656.69
6	0.00485	3976.73
7	0.00584	3872.16
8	0.00682	3841.54
9	0.00781	3870.43
10	0.00880	3869.02
11	0.00978	4008.57
12	0.01077	4156.60
13	0.01175	4272.26
14	0.01274	4384.02
15	0.01372	4489.63
16	0.01471	4589.53
17	0.01570	4678.77
18	0.01668	4763.19
19	0.01767	4840.04
20	0.01865	4909.07
21	0.01964	4973.91
22	0.02062	5032.67
23	0.02161	5089.77
24	0.02260	5141.48
25	0.02358	5186.85
26	0.02457	5230.18
27	0.02555	5270.82
28	0.02654	5306.55
29	0.02752	5339.01
30	0.02851	5370.61
31	0.02950	5398.03
32	0.03048	5422.30
33	0.03147	5445.34
34	0.03245	5464.54
35	0.03344	5484.57

36	0.03442	5501.30
37	0.03541	5515.85
38	0.03640	5529.46
39	0.03738	5540.41
40	0.03837	5550.96
41	0.03935	5559.36
42	0.04034	5567.83
43	0.04132	5573.01
44	0.04231	5577.77
45	0.04330	5582.18
46	0.04428	5583.70
47	0.04527	5584.88
48	0.04625	5584.52
49	0.04724	5583.30
50	0.04822	5580.35
51	0.04921	5575.80
52	0.05020	5569.79
53	0.05118	5561.02
54	0.05165	5549.54
55	0.05209	5534.58
56	0.05306	5515.67
57	0.05347	5488.97
58	0.05443	5454.16
59	0.05481	5408.89
60	0.05576	5352.80
61	0.05670	5286.00
62	0.05705	5207.26
63	0.05799	5117.65
64	0.05892	5014.43
65	0.05986	4896.42
66	0.06080	4764.52
67	0.06173	4613.88
68	0.06267	4444.49
69	0.06361	4251.02
70	0.06453	4025.02

Probeta P-03

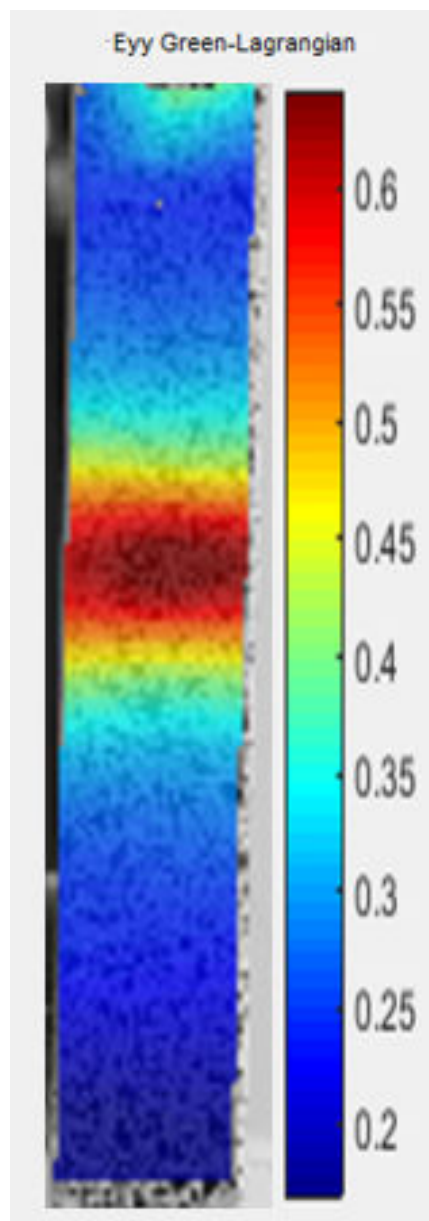
Probeta P-03		
Datos Maquina Universal "Zwick/Roell SP-1000"		
Tiempo	Deformación	Esfuerzo (Kg/cm2)
1	0.00019	519.68
2	0.00117	1486.33
3	0.00226	2439.06
4	0.00335	3468.96
5	0.00444	4147.53
6	0.00553	4042.57
7	0.00661	4045.67
8	0.00770	4039.47
9	0.00879	4060.33
10	0.00988	4073.63
11	0.01097	4212.42
12	0.01205	4337.85
13	0.01314	4443.24
14	0.01423	4539.84
15	0.01532	4627.57
16	0.01641	4708.55
17	0.01749	4778.48
18	0.01858	4843.92
19	0.01967	4903.72
20	0.02076	4956.41
21	0.02185	5001.99
22	0.02293	5045.47
23	0.02402	5084.65
24	0.02511	5118.07
25	0.02620	5148.64
26	0.02729	5176.62
27	0.02837	5201.77
28	0.02946	5223.18
29	0.03055	5242.40
30	0.03164	5259.26

31	0.03273	5274.92
32	0.03381	5287.31
33	0.03490	5298.98
34	0.03599	5308.04
35	0.03708	5315.93
36	0.03817	5321.87
37	0.03925	5326.52
38	0.04034	5330.43
39	0.04143	5332.20
40	0.04252	5332.62
41	0.04361	5331.74
42	0.04469	5329.84
43	0.04578	5326.39
44	0.04687	5321.78
45	0.04796	5315.03
46	0.04905	5307.10
47	0.05013	5296.87
48	0.05122	5283.34
49	0.05231	5264.98
50	0.05340	5239.79
51	0.05449	5205.44
52	0.05557	5156.68
53	0.05666	5091.52
54	0.05775	5007.78
55	0.05884	4907.39
56	0.05993	4787.32
57	0.06101	4642.74
58	0.06210	4469.94
59	0.06319	4264.93
60	0.06428	4019.30
61	0.06537	3714.80

Anexo E

Matrices los mapas de deformación "STRAIN MAPS" P-01, P-02, P-03

"STRAIN MAPS" P-01, P-02, P-03



Matriz del mapa de deformaciones de P-01

[illegible]

Matriz del mapa de deformaciones de P-02

[illegible]

Matriz del mapa de deformaciones de P-03

[illegible]