



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
SUBSISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**

TEMA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN:

Valoración de la prueba de tracción indirecta vinculada al módulo de rigidez para el control del agrietamiento en las mezclas asfálticas

AUTORA:

Márquez Cueva María Fernanda

**Previo a la obtención del Grado Académico de:
Magíster en Ingeniería de la Construcción**

**Guayaquil, Ecuador
2026**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
SUBSISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por **Márquez Cueva María Fernanda**, como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de **Magíster en Ingeniería de la Construcción**

REVISOR

Ing. Stefany Alcívar Bastidas, MSc.

DIRECTOR DEL PROGRAMA

Ing. Rommel Yela Acosta, Mgs.

Guayaquil, a los 17 días del mes de julio del año 2026



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
SUBSISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Márquez Cueva María Fernanda

DECLARO QUE:

El trabajo de titulación **Valoración de la prueba de tracción indirecta vinculada al módulo de rigidez para el control del agrietamiento en las mezclas asfálticas** para la obtención del **Grado Académico de Magíster en Ingeniería de la Construcción**, ha sido desarrollada en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del ensayo del Grado Académico en mención.

Guayaquil, a los 17 días del mes de julio del año 2026

Márquez Cueva María Fernanda



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
SUBSISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

AUTORIZACIÓN

Yo, Márquez Cueva María Fernanda

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la **publicación** en la biblioteca de la institución del trabajo de titulación previo a la obtención del grado de **Magíster en Ingeniería de la Construcción** titulado: **Valoración de la prueba de tracción indirecta vinculada al módulo de rigidez para el control del agrietamiento en las mezclas asfálticas**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 17 días del mes de julio del año 2026

Márquez Cueva María Fernanda



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

REPORTE COMPILATIO



Informe de análisis

Compilatio Magister+ | UCSG-EC- Universidad Católica de Santiago de Guayaquil

TESIS MÁRQUEZ MARÍA FERNANDA

ID : 92cca2d9a1e942e00766844664b793b203bd1b55



3%

Textos sospechosos

Nombre del fichero : TESIS MÁRQUEZ MARÍA FERNANDA.txt

Tamaño del archivo original : 4,31 MB

Número de palabras : 11.209

Número de caracteres : 72599

Depositante : Rolando Vila Romani

Fecha de depósito : 8 de abril de 2026

Tipo de carga : interface

fecha de fin de análisis : 8 de abril de 2026

 Resumen (sección 1/3)

Localización de los textos sospechosos en el documento :



Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :



Similitudes

<1%

 Sintáctica <1%

 Semántica No medido

Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.



Detección de IA

2%

Textos estilísticamente próximos a un texto generado por una IA.

Este índice es un indicador y no una prueba. Comprueba con el autor si domina los conocimientos mencionados en el documento.



Idiomas no reconocidos

<1%

Pasajes en los que parte del vocabulario utilizado no forma parte del diccionario de la lengua.

Puede tratarse de un intento del autor de modificar el texto para evitar ser detectado.



AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por ser mi mayor fuente de amor, sabiduría y esperanza, sin Él nada sería posible en mi vida.

De manera especial a mi madre, Melania, por su cariño y apoyo constante.

Mi mayor gratitud a mi tutor de tesis, PhD. Rolando Vila. Su conocimiento, capacidad y generosidad hicieron posible la realización de este trabajo. Gracias por el tiempo dedicado a este proyecto.

Mi agradecimiento también, a una querida amiga, Irina Valverde, quien fue soporte, ánimo y ayuda a lo largo de toda esta etapa.

María Fernanda Márquez

DEDICATORIA

Con mucho amor a mi madre, Melania Cueva, por siempre creer en mí.

María Fernanda Márquez

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación e importancia del tema	3
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. Alcance	4
1.5. Metodología.....	5
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Impacto de la prueba de tracción indirecta en la tecnología vial.....	5
2.2. Módulos elásticos en mezclas asfálticas.....	10
2.2.1. Introducción.....	10
2.2.2. Comparación de los módulos resilientes según las normas ASTM D 7369-20 y la EN 12697-26 Anexo C.	15
2.3. Relación entre la resistencia a la tracción indirecta y el módulo.....	22
3. RESULTADOS OBTENIDOS Y PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO.....	26
3.1. Pruebas realizadas.....	26
3.2. Composición representativa de las mezclas asfálticas utilizadas	27
3.2.1. Planta de INDUCTROC	27
3.2.2. Planta de VERDÚ.....	28
3.2.3. Planta de CONCRETO Y PREFABRICADOS (CYP).....	29
3.2.4. Planta de LICOSA.....	30
3.2.5. Planta de Constructora PALOSA	31
3.3. Resumen de resultados	32
3.4. Procesamiento estadístico.....	33
3.4.1. Determinación de los coeficientes del modelo	34
3.4.2. Análisis de varianza (ANOVA).....	35
3.4.3. Intervalos de confianza y de predicción en el modelo ajustado	37
3.5. Resultados del procesamiento estadístico.....	38

3.5.1.	Determinación del modelo ($Y = a + b.X$).....	38
3.5.2.	Valoración de modelos alternativos en el análisis de regresión	40
3.5.3.	Reporte de residuos atípicos	41
3.5.4.	Intervalos de confianza y de predicción	42
3.6.	Valoración práctica del modelo y sus intervalos de confianza y predicción.....	43
3.7.	Observaciones sobre los valores recomendados.....	46
3.8.	Comprobación de los rangos propuestos	47
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	50
4.1.	Conclusiones.....	50
4.2.	Recomendaciones	51
5.	BIBLIOGRAFIA.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la prueba de tracción indirecta.....	1
Figura 2. Configuraciones simples para evaluar el agrietamiento.	6
Figura 3. Distribución de esfuerzos sobre el eje “y”.....	7
Figura 4. Comparación de CTindex versus RTI.	10
Figura 5. Detalle de equipo para prueba de módulo dinámico.....	12
Figura 6. Gráfica esfuerzo-deformación en prueba de módulo dinámico.....	14
Figura 7. Prueba de módulo resiliente en prensa dinámica.	16
Figura 8. Ejemplo de resultados al aplicar una carga.....	16
Figura 9. Representación de la deformación instantánea.	17
Figura 10. Representación de la deformación total.....	17
Figura 11. Dispositivo para colocación de transductores (LVDT)	20
Figura 12. Forma y detalles del pulso de carga.....	20
Figura 13. Relación entre RTI y MR para porcentajes crecientes de RAP a 25°C.....	23
Figura 14. Representación gráfica de la granulometría. Planta INDUCTROC.	28
Figura 15. Representación gráfica de la granulometría. Planta VERDÚ.....	29
Figura 16. Representación gráfica de la granulometría. Planta CYP.....	30
Figura 17. Representación gráfica de la granulometría. Planta LICOSA.	31
Figura 18. Representación gráfica de la granulometría. Planta PALOSA.	32
Figura 19. Representación gráfica del modelo.....	39
Figura 20. Gráfico de residuos.....	41
Figura 21. Gráfico del modelo ajustado con intervalos.	43
Figura 22. Ubicación de los rangos estudiados.	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores constantes para los cálculos.	18
Tabla 2. Procedencia de las briquetas ensayadas.	26
Tabla 3. Resultado de la prueba de extracción de asfalto. Planta INDUCTROC.	27
Tabla 4. Chequeo granulométrico en agregados lavados. Planta INDUCTROC.	28
Tabla 5. Resultado de la prueba de extracción de asfalto. Planta VERDÚ.	28
Tabla 6. Chequeo granulométrico en agregados lavados. Planta VERDÚ.	29
Tabla 7. Resultado de la prueba de extracción de asfalto. Planta CYP.	29
Tabla 8. Chequeo granulométrico en agregados lavados. Planta CYP.	30
Tabla 9. Resultado de la prueba de extracción de asfalto. Planta LICOSA.	30
Tabla 10. Chequeo granulométrico en agregados lavados. Planta LICOSA.	31
Tabla 11. Resultado de la prueba de extracción de asfalto. Planta PALOSA.	31
Tabla 12. Chequeo granulométrico en agregados lavados. Planta PALOSA.	32
Tabla 13. Resumen de resultados a procesar.	33
Tabla 14. Interpretación del valor de r.	35
Tabla 15. Cuadro típico de ANOVA.	36
Tabla 16. Parámetros del modelo lineal.	39
Tabla 17. Resumen del análisis de varianza al modelo.	39
Tabla 18. Modelos alternativos analizados.	41
Tabla 19. Residuos atípicos.	42
Tabla 20. Expresiones de cálculo para los intervalos.	43
Tabla 21. Ejemplo de cálculo para obtener IC e IP.	44
Tabla 22. Resumen de valores de IC e IP.	44
Tabla 23. Ecuaciones representativas de los intervalos.	45
Tabla 24. Valores obtenidos para cumplir las exigencias a los módulos.	45
Tabla 25. Valores recomendados para cumplir las exigencias a los módulos.	46
Tabla 26. Resultados de las pruebas de comprobación.	48

RESUMEN

La presente investigación valora la prueba de tracción indirecta como herramienta para el control del agrietamiento en mezclas asfálticas, vinculándola directamente con el módulo de rigidez. El problema abordado radica en la necesidad de contar con ensayos más accesibles que permitan predecir el comportamiento mecánico y la tendencia al agrietamiento en el contexto vial ecuatoriano. El objetivo principal fue determinar y valorar la relación funcional existente entre la Resistencia a la Tracción Indirecta (RTI) y el Módulo de Rigidez (MRIG) a partir de un análisis estadístico robusto.

La metodología empleó un enfoque experimental realizado en el Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, donde se analizaron 292 muestras provenientes de cinco plantas de producción distintas. Se aplicaron modelos de regresión y análisis de varianza mediante el software STATGRAPHICS® para validar la correlación entre ambas variables.

Los resultados revelaron una relación lineal significativa, respaldada por un coeficiente de correlación de Pearson de 0,85 y un valor-P inferior a 0,05. Además, se establecieron parámetros de control para la RTI a 20°C: un rango satisfactorio (entre 1,05 y 1,20 MPa) y un rango tolerable (entre 0,95 y 1,30 MPa), vinculados a módulos de rigidez que garantizan un desempeño adecuado frente al agrietamiento. Se concluye que la RTI es un parámetro eficaz para el control de calidad rutinario, permitiendo identificar mezclas excesivamente rígidas y quebradizas, contribuyendo así a mejorar la durabilidad de las capas de rodadura en el país.

Palabras clave: Mezclas asfálticas, tracción indirecta, módulo de rigidez, agrietamiento, control de calidad.

ABSTRACT

The present research evaluates the indirect tensile test as a tool for cracking control in asphalt mixtures by directly linking it to the stiffness modulus. The problem addressed lies in the need for more accessible tests that allow predicting mechanical behavior and cracking susceptibility within the Ecuadorian road context. The main objective was to determine and assess the functional relationship between Indirect Tensile Strength (ITS) and Stiffness Modulus (S_{mig}) based on a robust statistical analysis.

The methodology employed an experimental approach conducted at the Road Laboratory of the Catholic University of Santiago de Guayaquil, where 292 samples from five different production plants were analyzed. Regression models and analysis of variance (ANOVA) were applied using STATGRAPHICS® software to validate the correlation between both variables.

The results revealed a significant linear relationship, supported by a Pearson correlation coefficient of 0.85 and a P-value of less than 0.05. Furthermore, control parameters for ITS at 20°C were established: a satisfactory range (between 1.05 and 1.20 MPa) and a tolerable range (between 0.95 and 1.30 MPa), linked to stiffness moduli that ensure adequate performance against cracking. It is concluded that the ITS is an effective parameter for routine quality control, allowing the identification of mixtures that are excessively stiff and brittle or prone to deformation, thus contributing to improving the durability of pavement surface layers in the country.

Keywords: Asphalt mixtures, indirect tensile strength, stiffness modulus, cracking, quality control.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La prueba de tracción indirecta (TI) fue descrita por primera vez en Brasil (Carneiro & Barcellos, 1953), estando su uso limitado durante los primeros años a cilindros de hormigón hidráulico o concreto. A partir de los años sesenta empezó su empleo en mezclas asfálticas (Livneh & Shklarsky, 1962; Breen & Stephens, 1966). El ensayo implica someter una muestra cilíndrica a cargas de compresión distribuidas a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta alcanzar la rotura. Esta aplicación de carga produce un esfuerzo de tracción relativamente uniforme perpendicular a lo largo del plano diametral que contiene la carga aplicada, que termina provocando generalmente una falla por rotura en el mismo. Ver Figura 1.

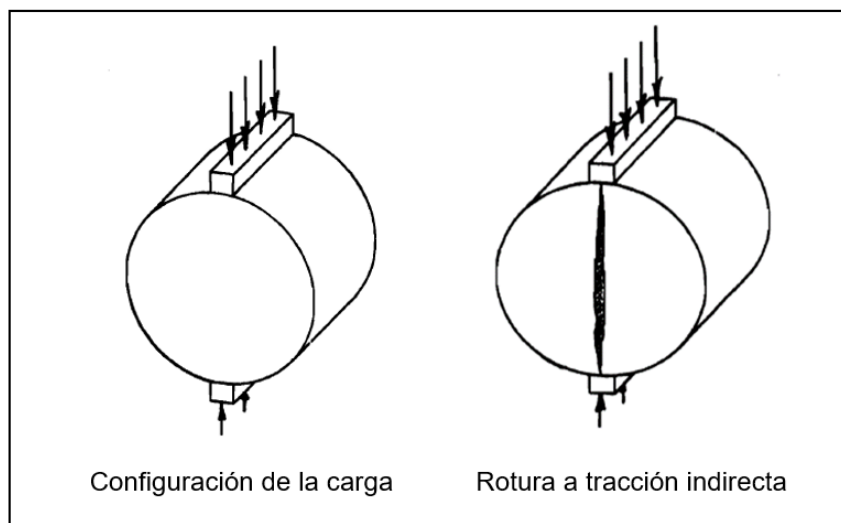


Figura 1. Esquema de la prueba de tracción indirecta.

Fuente: Adaptado de: Kennedy, T.W. & Anagnos, J.N. *Procedures for the Static and Repeated-load Indirect Tensile Test*. Research Report Number 183-14. 1983. pp. 5.

La prueba TI en mezclas asfálticas es muy común para obtener:

- La resistencia a la tracción indirecta (RTI), empleando pruebas estáticas o monotónicas, para determinar la máxima tensión que resiste la mezcla antes de fracturarse.
- El módulo de resiliencia (MR), mediante pruebas dinámicas (cíclicas) evaluado a partir de la recuperación elástica efectiva de la mezcla bajo cargas repetidas.

Es decir, que en un contexto físico mecánico RTI indica cuánto esfuerzo puede soportar la mezcla antes de fallar en tracción y MR mide la capacidad de la mezcla para recuperar su forma después de una carga repetida, relacionado con la rigidez y deformación elástica. En la práctica estas propiedades si bien son diferentes no dejan de estar relacionadas. En general, un material con mayor MR (más rígido) suele tener una mayor RTI, aunque esta relación dependerá de la composición de la mezcla, la temperatura, el nivel de envejecimiento, entre otros.

Actualmente, no se ha identificado un modelo empírico específico que correlacione directamente RTI con MR en las mezclas asfálticas de granulometría densa para capas de rodadura, especialmente en el rango de temperaturas entre 20 °C y 35 °C. Sin embargo, existen algunos estudios que han explorado, de forma muy limitada, correlaciones similares en otros contextos.

En una investigación desarrollada en el Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (Vila, 2017), se establecieron ciertas exigencias para el denominado módulo de rigidez (MRIG) de las mezclas asfálticas obtenidas con el equipo Nottingham Asphalt Mix Tester (NAT) a la temperatura de 20°C, empleando un nivel de deformación controlada de 5 micrones y ondas semi sinusoidales con intervalo de tiempo de 0,12 segundos entre el inicio del pulso de carga y el punto en el que la carga es máxima. Las exigencias para mezclas densas de capa de rodadura producidas en plantas se establecieron evaluando su comportamiento en las diferentes regiones del Ecuador, donde se corroboró que valores de módulos muy bajos provocaban mezclas con tendencia a la deformación y valores muy altos tendencia al agrietamiento. Los rangos de calificación establecidos fueron:

Mezclas satisfactorias: 3.000 a 4.000 MPa.

Mezclas tolerables: 2.500 a 3.000 MPa y 4.000 a 5.000 MPa.

Mezclas inadecuadas: menores a 2.500 MPa o mayores a 5.000 MPa.

Técnica y conceptualmente el MRIG, obtenido de acuerdo a la norma EN 12697-26 Anexo C, es un módulo de resiliencia, si bien este último se realiza bajo la norma ASTM D 4123 mediante carga controlada. No obstante, algunos autores (Baldo et al., 2010) concluyeron en un estudio que ambos métodos dan resultados similares en la mayoría de los casos.

1.2. Justificación e importancia del tema

En el Ecuador el problema fundamental que muestran las mezclas asfálticas en los pavimentos es el agrietamiento, lo que incide en el incremento de las obras de rehabilitación y por ende en un mayor impacto económico. Un aspecto importante relacionado con esta situación es que, tanto el diseño como los controles de calidad a las mezclas, se realizan mediante los criterios del método Marshall (MOP, 2002), donde los parámetros resistentes: estabilidad Marshall y flujo, solo apuntan al control de las deformaciones. O sea, que nuestros problemas son los agrietamientos, pero estos no se consideran en nuestros controles rutinarios.

Dado que la prueba del MRIG no daña la capacidad estructural de la muestra o briqueta evaluada, estas pueden posteriormente ensayarse para determinar su RTI. La relación que pudiera obtenerse entre ambas propiedades pudiera permitir una estimación de los posibles comportamientos esperados, vinculando los valores de RTI que se obtengan en la práctica con el MRIG estimado y las exigencias a estos. Por otra parte, para obtener RTI se emplean ensayos simples de tracción indirecta con cabezal Lottman en prensas convencionales tipo Marshall, existentes en la mayoría de los laboratorios de las plantas asfálticas y laboratorio de materiales.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar y valorar la relación existente entre los valores de resistencia a la tracción indirecta con prueba monotónica y los módulos de rigidez dinámicos, en briquetas asfálticas confeccionadas con mezclas densas para capas de rodadura de diferentes plantas, a partir de los resultados de las pruebas correspondientes en el laboratorio, para formular recomendaciones que permitan un control del agrietamiento empleando la prueba de tracción indirecta.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Seleccionar briquetas de al menos cinco plantas asfálticas, confeccionadas con diferentes diseños de mezclas, entregadas en el Laboratorio de Carreteras para pruebas de módulos de rigidez.
2. Estudiar las características principales de las mezclas en función de la planta de procedencia.
3. Realizar pruebas de tracción indirecta a cada una de dichas briquetas con módulos previamente determinados.
4. Determinar y valorar la relación existente entre la RTI y el MRIG a partir del empleo de un software de análisis estadístico.
5. Hacer recomendaciones y/o establecer exigencias para controlar el agrietamiento en las mezclas a partir de la RTI.

1.4. Alcance

El trabajo que se propone, por su objeto de estudio y los objetivos planteados, es de alcance local y nacional. Los resultados que se obtengan serán de interés y posible aplicación por el M.I. Municipio de Guayaquil, el MTOP (Ministerio de Transporte y Obras Públicas), consultores y técnicos en general vinculados a la temática.

Los resultados que se obtendrán a partir de la investigación permitirán estimar el módulo de rigidez a partir de una prueba simple de tracción indirecta, alertándonos de la mayor o menor tendencia al agrietamiento de la mezcla en cuestión, lo que sin dudas influirá también en la calidad de las futuras mezclas asfálticas colocadas en obras.

1.5. Metodología

El trabajo se realizará con la aplicación del método general de análisis y síntesis. Se hará estudio bibliográfico, procesamiento de datos y aplicación de modelos estadísticos. Se utilizará el programa STATGRAPHICS®. El desarrollo experimental se lo va a ejecutar en el Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Impacto de la prueba de tracción indirecta en la tecnología vial

A lo largo del tiempo se han desarrollado varias pruebas con el objetivo de realizar un control primario o simple de la tendencia al agrietamiento de las mezclas asfálticas, principalmente basadas en el análisis de una carga o esfuerzo de rotura a la tracción. Ver Figura 2. Entre estas se encuentran: (a) la prueba de tracción indirecta, (b) la viga con muesca en un borde o viga entallada, (c) la prueba de tracción en disco barrenado, (d) la prueba de flexión semicircular y (e) y la prueba Fénix.

Sin dudas, la prueba TI tiene ventajas, especialmente por utilizar unas mordazas muy simples y poder trabajar con las briquetas de diámetro 100 mm y la prensa de carga del método Marshall, utilizadas mayoritariamente a nivel mundial. Además de estas ventajas económicas, los resultados que ofrece esta prueba son muy precisos, con dispersiones inferiores al 10%, en comparación con la estabilidad Marshall que puede ser del 15-20% (Tesoriere & Marino, 1990).

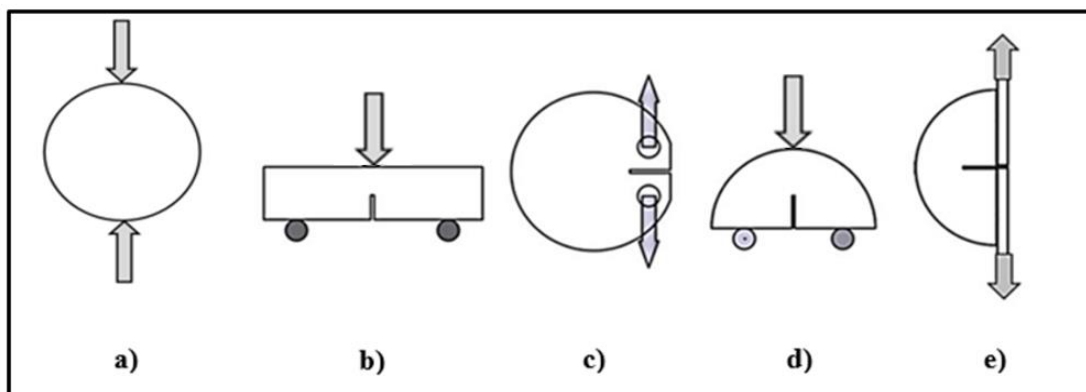


Figura 2. Configuraciones simples para evaluar el agrietamiento.

Fuente: Adaptado de: Romero, E.A. Valoración experimental de soluciones para mejorar el índice de tolerancia al agrietamiento en mezclas asfálticas. Trabajo de titulación. UCSG. 2022. pp. 28.

Los investigadores Kennedy y Hudson (1968) desarrollaron las ecuaciones que explican el estado tensional que se da en una probeta cilíndrica bajo una carga diametral. La carga aplicada a lo largo de dos generatrices diametralmente opuestas describe planos principales de tensiones, uno horizontal y otro vertical. Particularmente en el plano vertical se produce una tensión variable de compresión y una tensión teóricamente uniforme de tracción. Ver Figura 3. Si bien las ecuaciones en la Figura 3 corresponden a un cuerpo sólido elástico lineal ideal, en la práctica los valores de RTI calculados corresponden aproximadamente a los valores reales. Ya que el fallo de la briqueta en el ensayo se produce por rotura a tracción, la resistencia asociada al momento de la rotura puede determinarse por la ecuación:

$$RTI = \frac{2 P_{\text{máx}}}{\Pi. t. d}$$

donde:

RTI: resistencia a la rotura por tracción indirecta.

P_{máx}: carga máxima o carga de rotura

t: espesor de la briqueta

d: diámetro de la briqueta

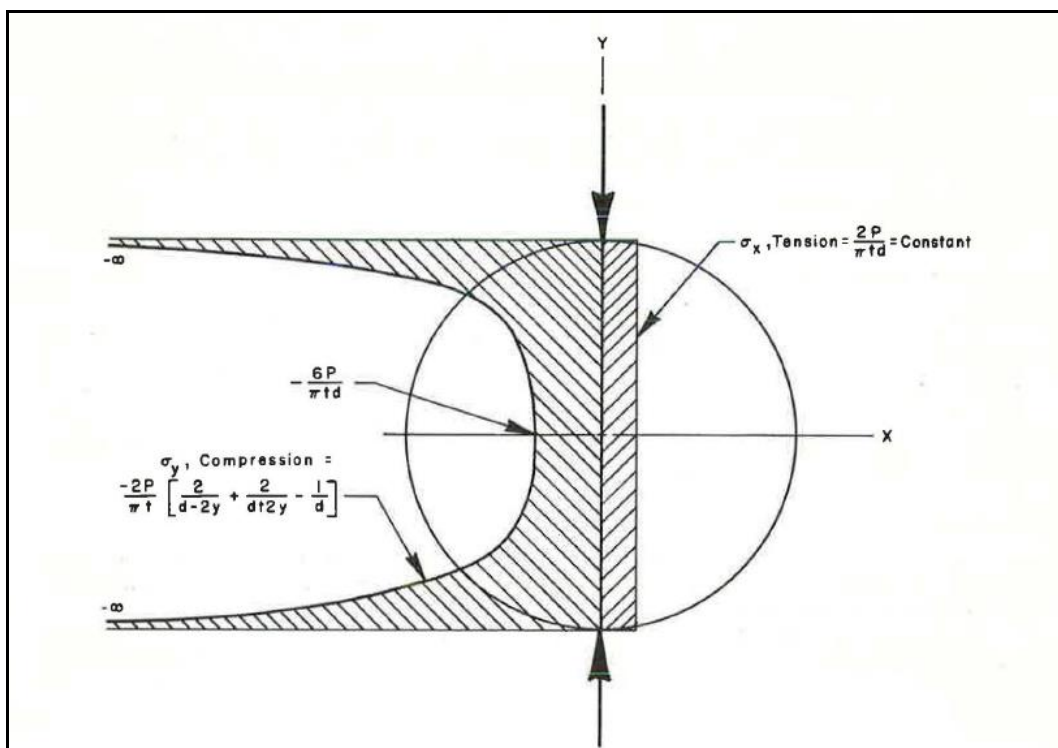


Figura 3. Distribución de esfuerzos sobre el eje “y”.

Fuente: Kennedy, T.W. & Hudson, W.R. *Application of the indirect Tensile Test to Stabilized Materials*. Highway Research Record, No. 235, Highway Research Board. 1968. pp.40.

La prueba TI ha sido una herramienta fundamental para evaluar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, especialmente su resistencia a la tracción y su susceptibilidad al agrietamiento. Entre 1980 y 2000, esta prueba fue ampliamente adoptada en diversos países debido a su simplicidad y a la representatividad de sus resultados en condiciones de carga reales. Según Kennedy et al. (1984), en Estados Unidos se utilizó como método estándar para evaluar la resistencia de mezclas en laboratorio, sirviendo como criterio para el diseño de mezclas resistentes al daño por humedad. La prueba TI fue incorporada posteriormente en el desarrollo de varios protocolos para la evaluación de dicho daño, como el procedimiento Tunnicliff – Root (ASTM D 4867) y el procedimiento Lottman modificado (AASHTO T283). El primero de estos procedimientos es empleado en Ecuador.

En Canadá, algunos investigadores (Tighe & Haas, 1999) utilizaron la prueba TI para estudiar el comportamiento térmico de mezclas asfálticas en climas fríos. La prueba permitió evaluar la cohesión interna de las mezclas y su capacidad de resistir agrietamientos térmicos, lo cual fue clave para el desarrollo de pavimentos duraderos en regiones con severas fluctuaciones de temperatura, proporcionando información esencial sobre la resistencia residual de mezclas envejecidas y recicladas.

En Europa, países como Suecia y el Reino Unido también adoptaron la prueba TI como parte de sus métodos de evaluación de mezclas asfálticas. En particular, el trabajo de Pell y Cooper (1982) en el Reino Unido destacó la sensibilidad de esta prueba para detectar diferencias en la calidad del ligante y la granulometría de los agregados. La prueba fue utilizada para validar mejoras en mezclas de alto desempeño y en la evaluación de nuevos aditivos, como polímeros modificadores. Su aplicación ayudó a establecer criterios de diseño más exigentes en los programas de renovación de carreteras de la década de 1990.

En los EE.UU. un estudio realizado por Baladi y Harichandran (1989) propuso un enfoque más racional para el diseño de mezclas asfálticas mediante el uso de la prueba TI como herramienta central para evaluar propiedades fundamentales del comportamiento del material. El trabajo critica los métodos tradicionales empíricos, como el Marshall y Hveem, por su limitada capacidad para predecir el desempeño a largo plazo del pavimento bajo cargas reales y condiciones ambientales. En su lugar, los autores plantean que la prueba TI aplicada bajo ciertos procedimientos, puede proporcionar parámetros mecánicos clave como módulo resiliente, resistencia a la tracción, capacidad de disipación de energía y parámetros de fatiga, que permiten una caracterización más robusta del comportamiento estructural de la mezcla. El trabajo sentó las bases para una transición desde un diseño empírico a uno verdaderamente mecanicista.

En el método de diseño de mezclas Superpave, desarrollado en el Programa de Investigación Estratégica de Carreteras (SHRP) entre 1993 y 1998, el agrietamiento por bajas temperaturas se aborda mediante la selección de un ligante asfáltico de comportamiento adecuado y la evaluación de los diseños de mezclas empleando

tracción indirecta mediante diferentes procedimientos: fluencia o “creep compliance” y resistencia a la tracción indirecta, ambos desarrollados en el Proyecto A-003A del SHRP por Roque y sus colaboradores de la Universidad Estatal de Pensilvania. Al concluir el SHRP, el procedimiento finalmente fue adoptado bajo la normativa AASHTO T322-03.

En España, en una investigación desarrollada en la Universidad Politécnica de Cataluña liderada por Pérez Jiménez y colaboradores (1999) se aplicó la prueba TI para el control de ejecución de la mezcla en obra, estableciéndose una correlación entre la densidad y la RTI, siendo este último un parámetro más sensible para el control. A partir de los resultados se recomendaron valores mínimos a conseguir en los diferentes tipos de mezclas evaluadas. Para el caso de las mezclas densas D20, similares a las más usuales empleadas para capas de rodadura en Ecuador, los españoles sugieren alcanzar resistencias mínimas de 25 kg/cm² en pruebas a 5°C. Este criterio de RTI mínimas también se observa para algunos tipos de mezclas en las especificaciones italianas, por ejemplo, para mezclas SMA se exigen valores por encima de 6 kg/cm² en pruebas a 25°C (ANAS, 2010).

Respecto a la exigencia de valores mínimos, es de interés mencionar una investigación desarrollada en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (Vila, Mera, Villao & Rodríguez, 2022) empleando la prueba de agrietamiento IDEAL, según la norma ASTM D8225-19, para determinar el índice de tolerancia al agrietamiento (CTindex) en diferentes mezclas y con distintos niveles de envejecimiento. Cuanto mayor sea el valor de CTindex, mejor será la resistencia al agrietamiento y, en consecuencia, menor será la cantidad de agrietamiento en el campo. En el trabajo se concluye que una mayor resistencia a la tracción indirecta, usual en mezclas más envejecidas y rígidas, no implica una mayor resistencia al agrietamiento, ya que disminuye el CTindex. Ver Figura 4. Este criterio debe ser considerado en el trabajo a realizar.

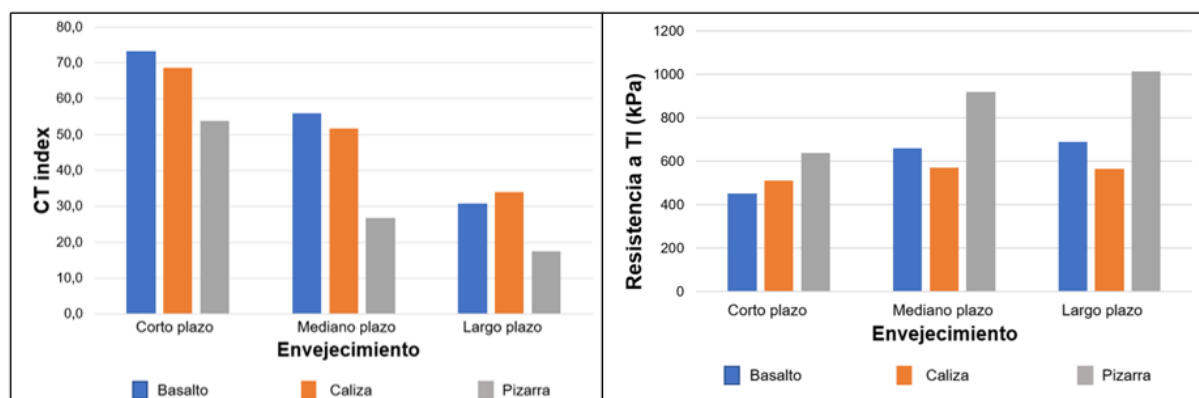


Figura 4. Comparación de CTindex versus RTI.

Fuente: Vila, R., Mera, W.A., Villao, A. & Rodríguez, C. *Experiencias con la prueba IDEAL para caracterizar la resistencia al agrietamiento de mezclas asfálticas en Ecuador*. XXI CILA. Punta del Este. Uruguay. 2022.

Otra fuerte tendencia en los últimos tiempos asociada con la prueba TI es su vinculación con el empleo de herramientas predictivas, en especial modelos basados en la inteligencia artificial, mediante la Red Neuronal Artificial (RNA), que implica el uso de un modelo computacional inspirado en la estructura y función del cerebro humano, para aprender de los datos y realizar predicciones o tomar decisiones. Ejemplos de esta tendencia son los trabajos de Ghasemi, Marasteanu & Turos (2019) y Al Mamun, et al. (2025).

2.2. Módulos elásticos en mezclas asfálticas

2.2.1. Introducción

Las pruebas de módulo resiliente y de módulo dinámico son las empleadas para medir el módulo de elasticidad, que como se conoce, es una medida de la rigidez de la mezcla asfáltica. En ambas pruebas, cargas dinámicas son aplicadas a una muestra midiéndose los desplazamientos. El módulo es entonces calculado como la relación entre el esfuerzo bajo la carga aplicada y la deformación generada. Una diferencia importante entre ambos es que en las pruebas de módulo dinámico se utilizan aplicaciones de carga repetida a compresión con forma de onda senoidal sobre probetas cilíndricas de mezclas y en el módulo resiliente cargas diametrales (tracción

indirecta) del tipo semisenoidal (haversine), con períodos de reposo, sobre briquetas convencionales de 100 o 150 mm de diámetro.

Siempre debe considerarse que la rigidez no es una medida de la resistencia, es decir, no es una medida de la capacidad que tiene la mezcla asfáltica para soportar cargas y esfuerzos sin deformarse ni fallar. Más aún, habría que considerar el tipo de resistencia en particular (compresión, tracción, etc.) con la cual se pretende comparar la rigidez. Un valor alto de rigidez indica que para el esfuerzo aplicado se obtuvo una baja deformación en la mezcla, pero aún esto no significa una alta resistencia. Por ejemplo, un material frágil puede tener una alta rigidez, pero una baja resistencia a la flexión, y un material muy flexible puede tener una baja rigidez, pero obviamente una alta resistencia a la flexión y baja resistencia a compresión. En la práctica, las mezclas muy rígidas (hechas con asfaltos muy duros o envejecidos) son más sensibles al agrietamiento por fatiga y las menos rígidas a las deformaciones permanentes.

El **módulo resiliente** (o módulo de resiliencia) en las mezclas ganó popularidad cuando fue incluido en la Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO 93, donde su determinación solía realizarse mediante la norma ASTM D4123-82 que finalmente fue descontinuada en el 2003. En dicha norma los valores del módulo resiliente se obtienen mediante el cabezal de tracción indirecta con carga repetida. En la actualidad el módulo resiliente se obtiene a partir de la norma ASTM D 7369-20 mediante un procedimiento más elaborado. El módulo resiliente se define como la relación entre el esfuerzo aplicado repetidamente y la deformación elástica recuperable que experimenta el material después de retirar la carga. Matemáticamente se expresa como:

$$Mr = \sigma / \epsilon_r$$

Donde:

Mr = módulo resiliente

σ = esfuerzo aplicado

ϵ_r = deformación resiliente (deformación recuperable)

Vale aclarar que la norma europea EN-12697-26 Anexo C, permite evaluar un módulo resiliente denominado módulo de rigidez (stiffness modulus). El mismo será desarrollado en el próximo numeral.

Por otra parte, el **módulo dinámico** y el **módulo complejo** describen el comportamiento viscoelástico de la mezcla asfáltica cuando es sometida a cargas dinámicas senoidales, similares a las generadas por los vehículos. Se determinan mediante ensayos de carga axial registrándose simultáneamente el esfuerzo aplicado, la deformación generada y el ángulo de desfase entre ambas magnitudes. El procedimiento cubre un amplio intervalo tanto de temperatura como de frecuencia de carga. La serie de ensayos mínima recomendada incluye temperaturas de 5, 25 y 40°C y frecuencias de cargas de 1, 4 y 16 Hz para cada temperatura. Ver en Figura 5 un detalle del equipo empleado para estas pruebas.

El módulo dinámico es el valor absoluto del módulo complejo que define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal (Leiva, 2004).

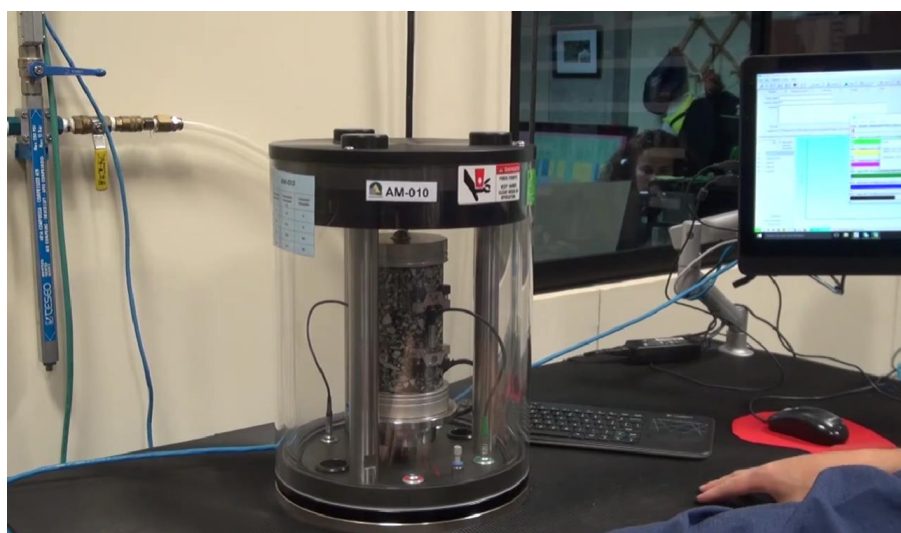


Figura 5. Detalle de equipo para prueba de módulo dinámico.

Fuente: Loría, L.G. *Caracterizando materiales en ingeniería*. Lanamme UCR. 2018.
<https://www.youtube.com/watch?v=ryDY2GO9iz4>.

El módulo complejo (18) es un número complejo que consta de dos partes; la parte real, la cual representa la rigidez (parte elástica) y la imaginaria que representa el amortiguamiento interno de los materiales (parte viscosa) y es definido como la relación de la amplitud del esfuerzo sinusoidal máximo y la amplitud de la deformación sinusoidal máxima como sigue:

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

$$E^* = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \delta)}} = |E^*| e^{i\delta}$$

Donde:

$|E^*|$: Módulo dinámico (valor absoluto del módulo complejo) del material

δ : Ángulo de fase (o ángulo de desfase) del material

La respuesta de un material viscoelástico como la mezcla asfáltica en caliente, bajo carga sinusoidal, está fuera de fase con respecto a la carga aplicada; como es mostrado en la Figura 6. El retraso entre la señal de carga y deformación es llamado ángulo de fase (δ), y está relacionado con el módulo dinámico de la siguiente manera:

$$|E^*| = E_1 + iE_2$$

donde

E_1 Módulo de almacenamiento (parte elástica) = $|E^*| \cos \delta$

E_2 Módulo de pérdida (parte viscosa) = $|E^*| \sin \delta$

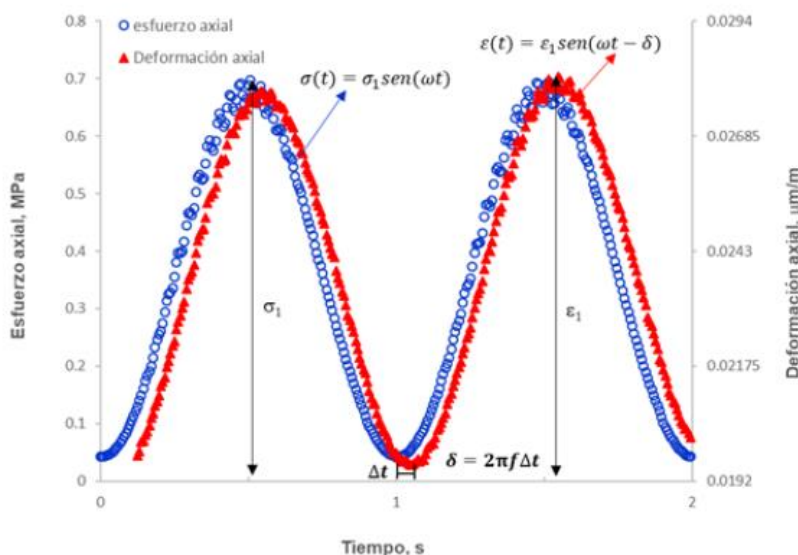


Figura 6. Gráfica esfuerzo-deformación en prueba de módulo dinámico.

Fuente: Delgado, H., Gómez, J.A. & Flores, M. *Propuesta de método de prueba de módulo dinámico en mezclas asfálticas para México*. IMT. Publicación Técnica No. 507. Sanfandila, Querétaro, 2017. ISSN 0188-7297.

Un ángulo de fase (δ) de cero corresponde a un material puramente elástico, mientras que un $\delta = 90^\circ$ es asociado a un material puramente viscoso (newtoniano). Un ángulo de fase entre 0 y 90° corresponde a un material viscoelástico como la mezcla asfáltica.

El procedimiento de prueba para determinar el módulo dinámico se estableció en la norma ASTM D 3497–79, reprobada en 1995 y con una última actualización en el año 2017. Al final del procedimiento deben reportarse los módulos dinámicos obtenidos a las diferentes temperaturas y frecuencias de carga aplicadas. En la norma AASHTO TP 62 ya discontinuada y en la posterior AASHTO T 342-11, reprobada en 2015 y vigente en la actualidad, el procedimiento de cálculo profundiza más en los parámetros viscoelásticos, debiéndose reportar, además de los parámetros mencionados anteriormente, el ángulo de fase promedio entre la tensión aplicada y la deformación medida. En la norma europea EN 12697-26 Anexo D, también se describe un procedimiento para determinar el módulo complejo en cilindros de mezclas asfálticas a partir de una prueba de compresión – tracción.

2.2.2. Comparación de los módulos resilientes según las normas ASTM D 7369-20 y la EN 12697-26 Anexo C.

Norma ASTM D7369-20.

La prueba para módulo resiliente de mezclas asfálticas por tracción indirecta según dicha norma consiste en la aplicación de cargas repetidas de compresión diametral sobre probetas cilíndricas, midiéndose las deformaciones verticales y horizontales de la muestra, lo que permite calcular el coeficiente de Poisson y el módulo resiliente. Ambos parámetros pueden calcularse utilizando la deformación recuperable instantánea o total.

En el procedimiento se aplica un esfuerzo controlado a la muestra de ensayo con un valor entre el 10 y el 20% de su resistencia a la tracción indirecta. La carga diametral cíclica (tipo semisenoidal) se aplica durante intervalos cortos, seguida de periodos de reposo. Cada ciclo suele tener: 0.1 s de carga y 0.9 s de reposo, simulando el paso del tráfico vehicular. Durante el ensayo, se miden las deformaciones horizontales y verticales mediante sensores de alta precisión. Ver Figura 7. Generalmente el ensayo se realiza a 25°C aunque a nivel de investigación se suelen emplear 5, 15, 20 y 25°C, más representativas del comportamiento de la mezcla.

Las pruebas de módulo se realizarán en probetas de 101,6 mm (4") o 152,4 mm (6") de diámetro y de 38,1 mm (1,5") a 63,5 mm (2,5") de espesor. Las probetas se pueden obtener mediante extracción de testigos en el campo o pueden ser confeccionadas en el compactador Marshall o el compactador giratorio. Las muestras deben acondicionarse dentro de una cámara climática por no menos de 6 horas.

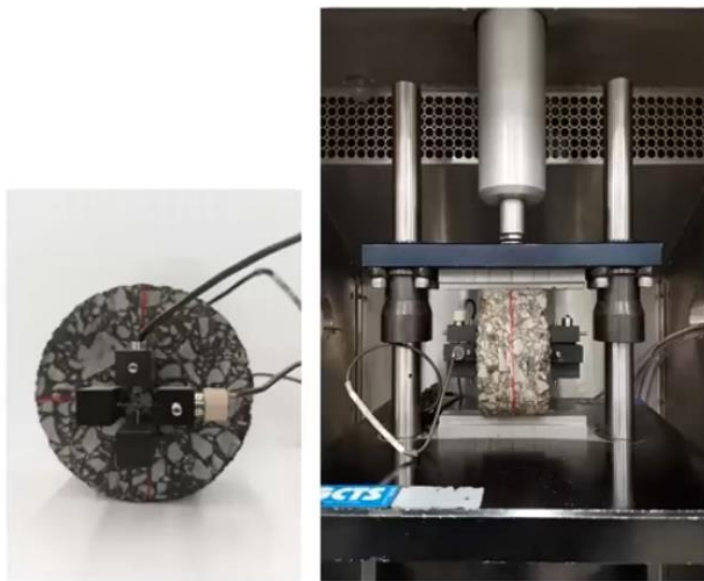


Figura 7. Prueba de módulo resiliente en prensa dinámica.

Fuente: Flores, M. Seminario IMT. “Módulo de resiliencia en mezclas asfálticas”. 2022.

<https://www.youtube.com/watch?v=Uidimn7ZNN4&t=9s>

En la Figura 8 puede observarse, como ejemplo, el resultado de aplicar una onda de carga y las respuestas obtenidas tanto en la deformación vertical como horizontal.

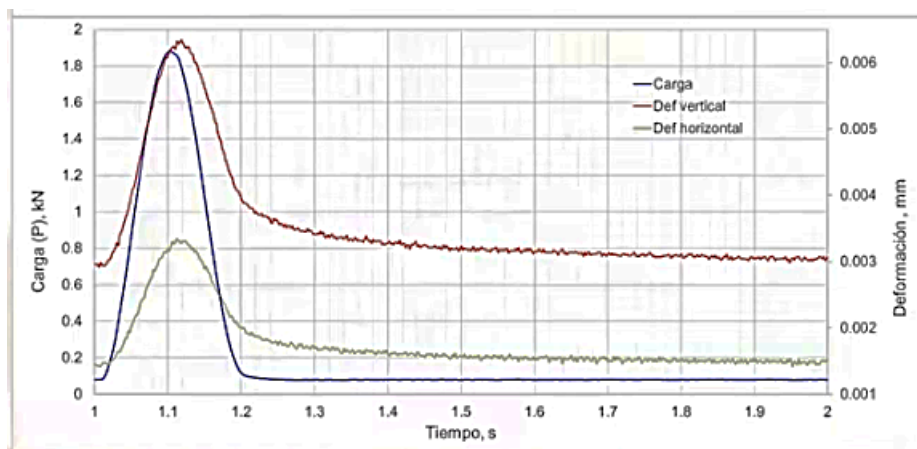


Figura 8. Ejemplo de resultados al aplicar una carga.

Fuente: Flores, M. Seminario IMT. “Módulo de resiliencia en mezclas asfálticas”. 2022.

<https://www.youtube.com/watch?v=Uidimn7ZNN4&t=9s>

En las figuras 9 y 10 se resume de manera gráfica el significado de las deformaciones instantáneas o totales que pudieran aplicarse para los cálculos del coeficiente de Poisson y del módulo resiliente.

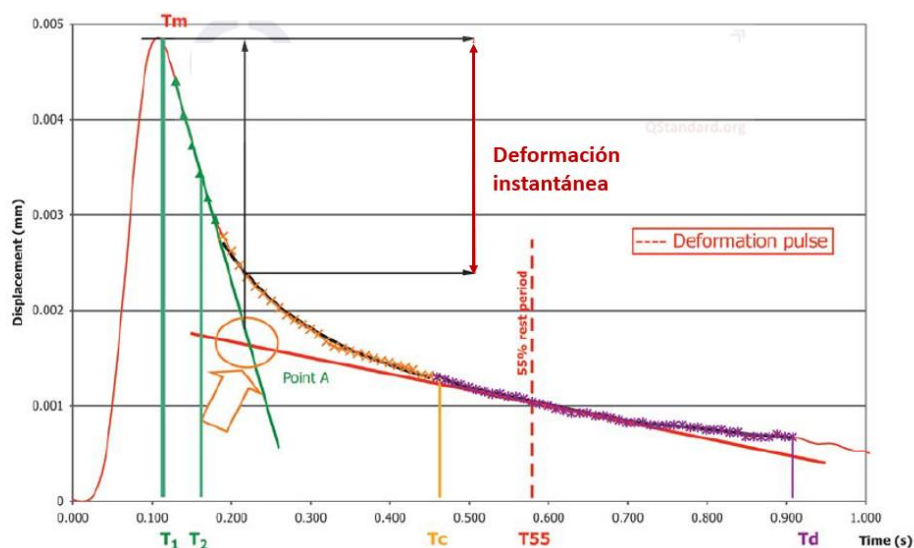


Figura 9. Representación de la deformación instantánea.

Fuente: Adaptado de: ASTM Designation: D7369 – 20. *Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures*. Pp 7.

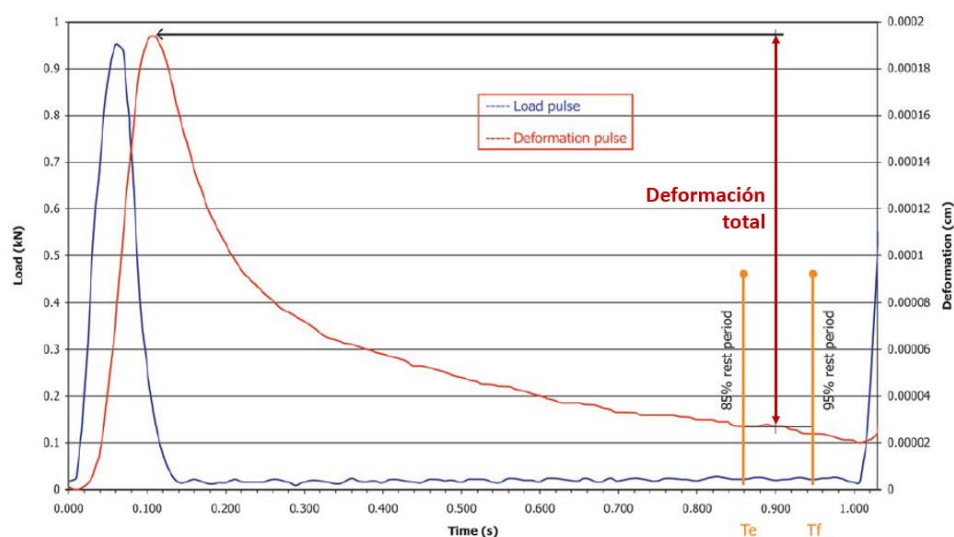


Figura 10. Representación de la deformación total.

Fuente: Adaptado de: ASTM Designation: D7369 – 20. *Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures*. Pp 8.

Dichos cálculos también consideran una serie de valores constantes que dependen de la longitud de los transductores para medir las deformaciones (LVDT). Ver Tabla 1.

Tabla 1. Valores constantes para los cálculos.

longitud LVDT/ diámetro espécimen	Longitud LVDT		l_1	l_2	l_3	l_4
	d=100 mm	D= 150 mm				
0.25	25.0	37.5	0.144357	-0.450802	0.155789	-0.488592
0.50	50.0	75.0	0.233936	-0.780056	0.307445	-1.069463
0.75	0.75	112.5	0.265925	-0.952670	0.430875	-1.934486
1.00	100	150	0.269895	-1.000000	-0.062745	-3.587913

Fuente: Flores, M. Seminario IMT. “Módulo de resiliencia en mezclas asfálticas”. 2022.
<https://www.youtube.com/watch?v=Uidimn7ZNN4&t=9s>

Finalmente, el coeficiente de Poisson se calculará por la expresión:

$$\mu = \frac{I_4 - I_1 \times \left(\frac{\delta_v}{\delta_h} \right)}{I_3 - I_2 \times \left(\frac{\delta_v}{\delta_h} \right)}$$

donde:

μ = coeficiente de Poisson instantáneo o total,

δ_v = deformación vertical recuperable (instantánea o total) medida a lo largo del diámetro vertical de la muestra, en mm (o pulgada), y

δ_h = deformación horizontal recuperable (instantánea o total) medida a lo largo del diámetro horizontal de la muestra, en mm (o pulgada).

Conocido el coeficiente de Poisson se obtendrá el módulo resiliente según:

$$M_R = \frac{P_{cyclic}}{\delta_h t} (I_1 - I_2 \cdot \mu)$$

donde:

M_R = módulo de elasticidad instantáneo o total, MPa (o psi),

δh = deformación horizontal recuperable (instantánea o total), mm (o pulgada),

μ = coeficiente de Poisson instantáneo o total,

t = espesor de la muestra, mm (o pulgada),

$P_{\text{cíclica}} = P_{\text{máx}} - P_{\text{cont}}$ = carga cíclica aplicada a la muestra, N (o libra),

$P_{\text{máx}}$ = carga máxima aplicada, N (o libra), y

P_{cont} = carga de contacto, N (o libra).

El reporte de resultados de acuerdo a la norma es muy exigente incluyéndose la temperatura del ensayo, nivel y forma de carga, número de ciclos aplicados, valores de los coeficientes de Poisson y los módulos resiliente obtenidos para cada muestra ensayada, cada una en dos direcciones a partir de la rotación de 90 grados, y considerando además todos los cálculos a partir de las deformaciones instantáneas y totales.

Norma EN 12697-26:2012

La norma establece en su **Parte 26** varios métodos de prueba a las mezclas asfálticas para determinar su rigidez (stiffness) y en particular el **Anexo C** corresponde a la determinación mediante la prueba de tracción indirecta. Al módulo obtenido, que es técnicamente un módulo resiliente, se le denomina módulo de rigidez.

La carga diametral cíclica (tipo semisenoidal) se aplica durante intervalos cortos, seguida de periodos de reposo. Cada ciclo tiene: 0,25 s de carga y 2,75 s de reposo. Durante el ensayo, solamente se miden las deformaciones horizontales con sensores de alta precisión que se acoplan exteriormente mediante un dispositivo. Ver Figura 11. Generalmente el ensayo se realiza a 20°C, aunque a nivel de investigación se suelen emplear barridos con diferentes temperaturas.

Las probetas cilíndricas deberán tener un espesor de entre 30 y 75 mm y un diámetro nominal de que pudiera corresponder a 80, 100, 120, 150 o 200 mm. Ambas dimensiones se elegirán en función del tamaño máximo nominal del árido de la mezcla. Además, para cada diámetro deberán emplearse las dimensiones adecuadas (ancho y radio de curvatura) de los contactos de carga en los cabezales de tracción indirecta.

Las muestras deben acondicionarse dentro de una cámara climática por no menos de 4 horas.



Figura 11. Dispositivo para colocación de transductores (LVDT)

La prensa empleada deberá ser capaz de aplicar pulsos de carga repetidos con un periodo de reposo. La carga deberá tener una forma de onda semisenoidal (véase la Figura 12). El tiempo de aplicación de la carga se controlará durante el ensayo.

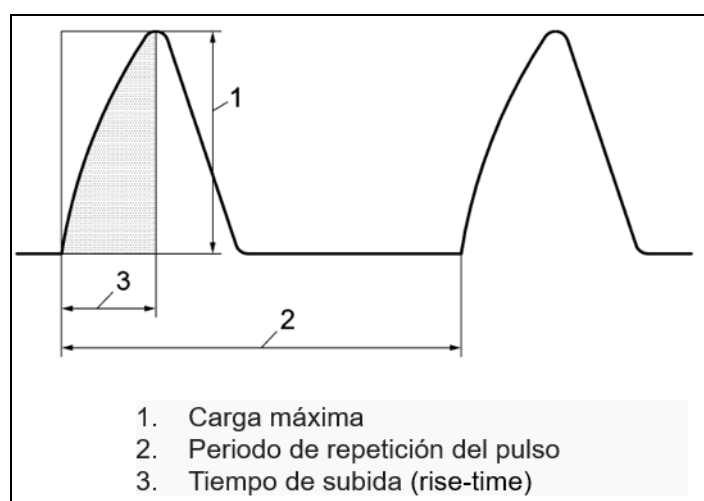


Figura 12. Forma y detalles del pulso de carga.

Fuente: Adaptado de: EN 12697-26:2012. *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt. Part 26: Stiffness. Annex C.* Pp 27.

El factor de área de carga será la relación entre el área sombreada en la Figura 12 y el producto del tiempo de subida y la carga máxima, siendo el valor recomendado 0,6. Cuando este factor se desvía de 0,60, el módulo de rigidez medido deberá corregirse, como se mostrará posteriormente. El tiempo de subida recomendado es de 124 ± 4 ms, pero se pueden usar otros. El pulso de carga aplicado se selecciona para lograr una deformación horizontal máxima transitoria. La experiencia indica que el valor adecuado de dicha deformación horizontal máxima es de 5 ± 2 μ m para muestras de 100 mm de diámetro.

Cuando el módulo de rigidez de un material es relativamente alto, el tiempo de carga es corto o la temperatura de ensayo es baja, la capacidad del sistema de carga puede ser insuficiente para generar la carga y deformación horizontales especificadas. En este caso, puede ser necesario utilizar una muestra de menor diámetro o reducir su espesor.

Usando las mediciones de los cinco pulsos de carga que se realizan se determinará el módulo de rigidez medido para cada pulso de carga utilizando la siguiente ecuación:

$$E = \frac{F \times (\nu + 0,27)}{(z \times h)}$$

donde:

E = módulo de rigidez medido (MPa)

F = valor máximo de la carga vertical aplicada (N)

z = amplitud de la deformación horizontal obtenida durante el ciclo de carga (mm)

h = espesor medio de la muestra (mm)

ν = coeficiente de Poisson (si no se determina se asume 0.35 para todas las temperaturas).

El módulo de rigidez medido se ajustará a un factor de área de carga de 0,60 utilizando la siguiente ecuación:

$$E' = E \times (1 - 0,322 \times (\log(E) - 1,82) \times (0,60 - k))$$

Donde:

E' es el módulo de rigidez (MPa), ajustado al factor de área de carga de 0,60, y k es el factor de área de carga medido.

En el desarrollo del numeral 2.2.2 se han respetado las denominaciones de las respectivas normas.

2.3. Relación entre la resistencia a la tracción indirecta y el módulo

En los últimos años se han desarrollado muchas investigaciones internacionalmente con el empleo de la prueba TI, la mayoría de ellos enfocados al empleo de mezclas con asfaltos modificados con polímeros y cauchos de llantas (Kok & Yilmaz, 2009; Meqtoof, Hussein & Younis, 2022; Chen, Lin & Wu, 2023), mezclas con fillers (Yildiz & Sargin, 2024) y mezclas recicladas a partir de pavimentos asfálticos recuperados (RAP) (Chaitanyaa, Srib & Reddyc, 2015). En este último artículo de investigadores hindúes, se integran algunos trabajos de laboratorio realizados para la evaluación del comportamiento de mezclas bituminosas con diferentes proporciones de RAP frente a la fatiga, obteniéndose una relación entre el MR y RTI evaluados para mezclas con porcentajes variables de 0 a 50% de RAP. Ver Figura 13. La determinación de MR se realizó de acuerdo con ASTM D4123 con tiempo de aplicación de carga de 0,1 s (frecuencia de 1 Hz) y temperatura de 25°C. Los valores de RTI se obtuvieron según ASTM D6931 también a 25°C. Como se aprecia, existió una muy buena correlación entre los valores obtenidos.

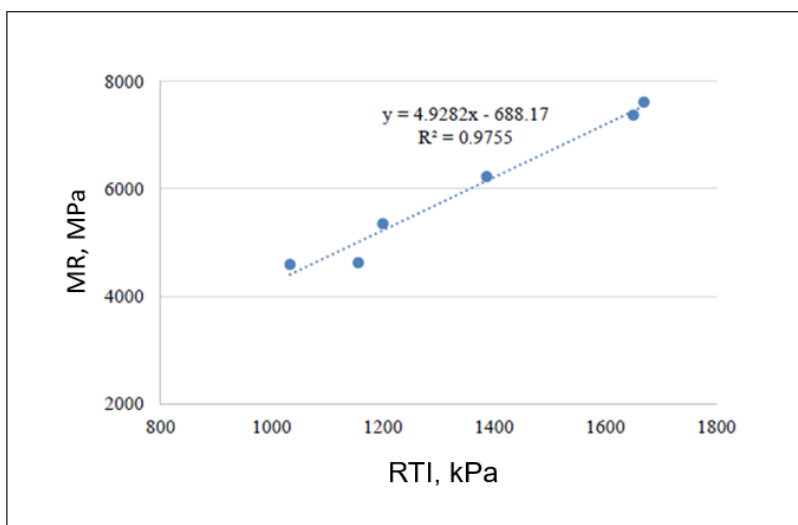


Figura 13. Relación entre RTI y MR para porcentajes crecientes de RAP a 25°C.

Fuente: Adaptado de: Chaitanyaa, G., Srib, M. & Reddyc, K. *Fatigue performance of bituminous mixes containing reclaimed asphalt pavement (RAP) material*. 3rd Conference of Transportation Research Group of India. 2015.

En un estudio realizado en Indonesia se investigó la relación entre la resistencia a la tracción indirecta (RTI) y el módulo resiliente (MR) en mezclas asfálticas con betún espumado. Se observó que ambos parámetros disminuyen con el incremento de la temperatura de ensayo y se reportó una correlación significativa de tipo regresión potencial entre RTI y MR. Estos resultados indican que la rigidez medida bajo carga repetida y la RTI pueden estar vinculadas de forma cuantificable, sugiriendo que ambos parámetros responden a mecanismos mecánicos comunes dentro de la mezcla asfáltica (Widayat, 2018).

En la misma línea, los investigadores Kumar, Velayudhan, Rathan y Mathew (2025) desarrollaron un modelo predictivo de la RTI y evaluaron simultáneamente el MR de mezclas bituminosas considerando condiciones de humedad y temperatura. Los autores propusieron que la RTI puede emplearse como variable predictora del módulo resiliente, observando que las variaciones del MR bajo diferentes condiciones ambientales guardan coherencia con los cambios registrados en la resistencia indirecta. Este estudio refuerza la existencia de una relación funcional entre propiedades de resistencia y rigidez, y plantea la posibilidad de estimar parámetros de rigidez a partir de ensayos más simples como el de tracción indirecta.

De manera complementaria, Bastidas y Rondón (2024) en Colombia analizaron el efecto del contenido de ligante, la temperatura y la velocidad de carga sobre los valores de RTI y el MR en mezclas asfálticas en caliente. Sus resultados indicaron que ambos parámetros aumentan al disminuir la temperatura y al incrementar la velocidad de aplicación de carga, identificándose además una correlación matemática significativa entre los valores experimentales de ITS y RM. Este estudio refuerza la evidencia de que la resistencia a tracción indirecta y los parámetros de rigidez presentan un comportamiento interrelacionado bajo condiciones de ensayo controladas.

Un trabajo muy interesante desarrollado por Cerni, Bocci, Cardone y Corradini (2017) analizó la correlación entre las mediciones de rigidez obtenidas mediante ensayos de tracción indirecta dinámicos (EN 12697-26) y estáticos. Sin embargo, en el mismo las pruebas estáticas no se circunscriben a determinar RTI, sino módulos estáticos aplicando la teoría de Hondros, lo que requiere contar con los gráficos de las curvas tensión-deformación generadas en las pruebas, algo que para nuestro caso en particular no sería posible de obtener. El programa italiano incluyó ensayos a 10, 20 y 30 °C en diferentes hormigones asfálticos, estableciéndose buenas correlaciones entre los módulos dinámicos y estáticos.

En el contexto ecuatoriano, la determinación del módulo de rigidez (MRIG) en mezclas asfálticas no constituye aún una práctica ampliamente implementada en laboratorios de control de calidad e investigación, debido principalmente a la limitada disponibilidad de equipos capaces de aplicar cargas repetidas a frecuencia controlada bajo condiciones térmicas estables. Esta situación restringe la generación sistemática de información local sobre parámetros modulares, a pesar de su relevancia dentro de enfoques de diseño mecanicista–empírico.

Un antecedente significativo en la incorporación de criterios basados en desempeño lo constituye la investigación desarrollada en el Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, en la cual se propusieron exigencias para mezclas asfálticas evaluadas mediante el equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT). El estudio incluyó el análisis experimental de mezclas provenientes de 15

plantas de producción y 9 pavimentos flexibles ubicados en distintas regiones del país (Vila, 2017).

A partir de los resultados experimentales obtenidos a 20 °C bajo carga controlada, se establecieron rangos de aceptación para el módulo de rigidez:

- Mezclas satisfactorias: 3.000–4.000 MPa
- Mezclas tolerables: 2.500–3.000 MPa y 4.000–5.000 MPa
- Mezclas inadecuadas: menores a 2.500 MPa o mayores a 5.000 MPa

Estos valores representan una de las pocas referencias técnicas nacionales orientadas a la evaluación modular de mezclas asfálticas bajo un enfoque de desempeño. No obstante, la disponibilidad operativa de equipos como el NAT es limitada en el país, lo que dificulta la aplicación generalizada de este tipo de caracterización.

En contraste, la determinación de RTI según la norma ASTM D6931, es fácilmente ejecutable en laboratorios nacionales debido a la mayor disponibilidad de prensas tipo Marshall. Si bien la RTI fue concebida principalmente para determinar la resistencia máxima bajo carga monotónica y evaluar la susceptibilidad al daño por humedad, su configuración geométrica —carga diametral aplicada sobre probetas cilíndricas— es comparable a la empleada en el ensayo de módulo de rigidez en tracción indirecta.

Considerando que ambos ensayos pueden ejecutarse bajo condiciones térmicas equivalentes y comparten una configuración de carga similar, se establece una base metodológica que permite analizar la posible existencia de una relación funcional entre el MRIG y la RTI. En el ámbito ecuatoriano, la búsqueda de este vínculo adquiere especial relevancia, ya que podría permitir aproximaciones al comportamiento de rigidez a partir de ensayos más accesibles, contribuyendo al fortalecimiento técnico del control de calidad y del diseño estructural de pavimentos.

Bajo esta perspectiva, la posible correlación entre MRIG y RTI no solo tendría implicaciones en términos de caracterización mecánica, sino también en la definición de criterios orientados al control del agrietamiento. Considerando que la investigación desarrollada en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil estableció rangos de aceptación para el MRIG asociados al desempeño estructural de mezclas asfálticas, la identificación de una relación funcional entre MRIG y RTI podría permitir, de manera complementaria, establecer recomendaciones preliminares basadas en la resistencia a tracción para contextos donde no se disponga de ensayos modulares.

Desde un enfoque mecanicista, el agrietamiento ocurre cuando las tensiones inducidas superan la capacidad resistente del material; por tanto, la interacción entre rigidez y resistencia constituye un aspecto fundamental en la respuesta estructural del pavimento. En este sentido, la exploración de vínculos entre ambos parámetros podría contribuir al fortalecimiento de criterios nacionales de control de calidad orientados a la mitigación del agrietamiento.

3. RESULTADOS OBTENIDOS Y PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO

3.1. Pruebas realizadas

Se procesaron experimentalmente un total de 292 briquetas tipo Marshall correspondientes a mezclas asfálticas densas usuales en Ecuador con tamaño máximo de 12 mm y porcentajes de vacíos en la mezcla muy próximos a 4%. Estas proceden en su gran mayoría de 5 plantas de asfaltos en caliente ubicadas en los alrededores de la ciudad de Guayaquil, distribuidas según la Tabla 2.

Tabla 2. Procedencia de las briquetas ensayadas.

PLANTA	NO. DE BRIQUETAS
INDUCTROC	112
VERDÚ	78
CONCRETO Y PREFAB.	51
LICOSA	29
PALOSA	9
VARIAS	13
TOTAL	292

Las briquetas llegaron a nuestro laboratorio para pruebas de módulos de rigidez, solicitadas a las empresas constructoras por el M.I. Municipio de Guayaquil como parte de los controles de calidad exigidos. En realidad, el proceso de trabajo comenzó en agosto de 2023. Ya que las briquetas ensayadas para obtener el MRIG no sufren ninguna alteración estructural, a las mismas en un plazo máximo de una semana se les determinaron las RTI. De esta forma se empezó a acumular la información a procesar.

3.2. Composición representativa de las mezclas asfálticas utilizadas

Las plantas mencionadas trabajan con canteras y trituradoras propias más el cemento asfáltico AC 20 procedente de la Refinería de Esmeraldas, por lo que no existe mucha variación en la composición de las mezclas producidas en las mismas. Todas las mezclas fueron diseñadas por el método Marshall y poseen la aprobación del M.I. Municipio de Guayaquil. La extracción de asfalto se realizó según la norma ASTM D 2172-05 y la granulometría de los agregados lavados según la ASTM D 422-07. Ver tablas 3 a 12 y figuras 14 a 18.

3.2.1. Planta de INDUCTROC

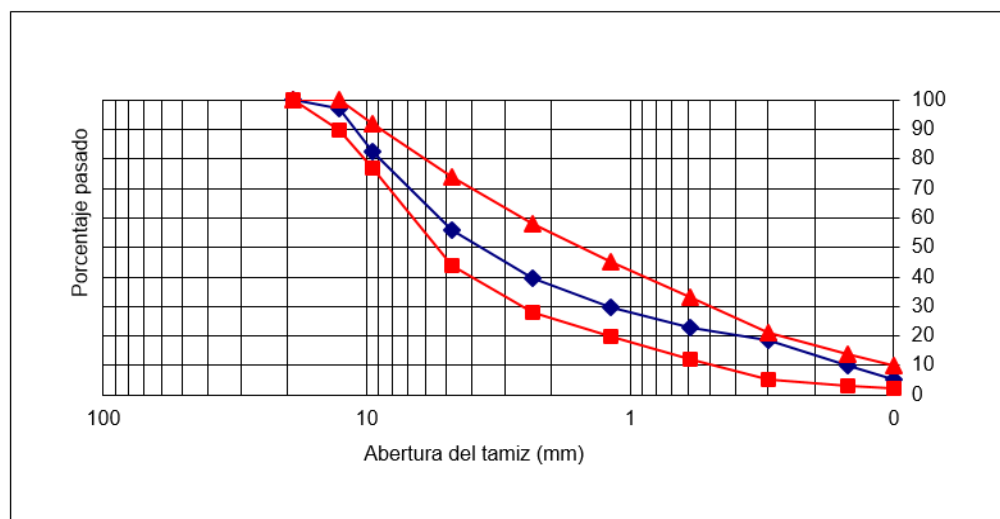
Tabla 3. Resultado de la prueba de extracción de asfalto. Planta INDUCTROC.

W1. PESO DE LA MUESTRA DE MEZCLA ASFÁLTICA (gr):	1000,00
F1. PESO DEL FILTRO ANTES DE LA EXTRACCIÓN (gr):	18,40
W2. CONTENIDO DE HUMEDAD (gr):	0,00
W3A. PESO DE AGREG. LAVADOS EN CENTRÍFUGA (gr):	925,10
F2. PESO DEL FILTRO DESPUES DE LA EXTRACCIÓN (gr):	18,50
W3B = F2 - F1	0,10
W3. PESO AGREG. INCLUYENDO FILTRO (gr) (W3A+W3B):	925,20
W4. PESO DE MATERIAL MINERAL EN EXTRACTO (gr):	7,35
% DE ASFALTO = $\{[(W1-W2) - (W3+W4)] / (W1-W2)\} * 100$	6,74

Tabla 4. Chequeo granulométrico en agregados lavados. Planta INDUCTROC.

ABERTURA DE TAMICES		PESO RET. ACUM. (gr)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASADO ACUMULADO	ESPEC. 1/2" MOP 2002	
No.	mm				Mínimo	Máximo
3/4"	19,00	0,0	0,0	100,0	100	100
1/2"	12,70	27,1	2,9	97,1	90	100
3/8"	9,52	161,5	17,3	82,7		
# 4	4,75	411,1	44,1	55,9	44	74
# 8	2,36	564,9	60,6	39,4	28	58
#16	1,19	655,7	70,3	29,7		
#30	0,59	718,9	77,1	22,9		
# 50	0,30	759,3	81,4	18,6	5	21
#100	0,15	840,0	90,1	9,9		
# 200	0,10	883,0	94,7	5,3	2	10
FONDO	FONDO	932,6				

ESPECIFICACIÓN: 1/2". MOP- 001 F- 2002. TABLA 405-5.1.

**Figura 14.** Representación gráfica de la granulometría. Planta INDUCTROC.

3.2.2. Planta de VERDÚ

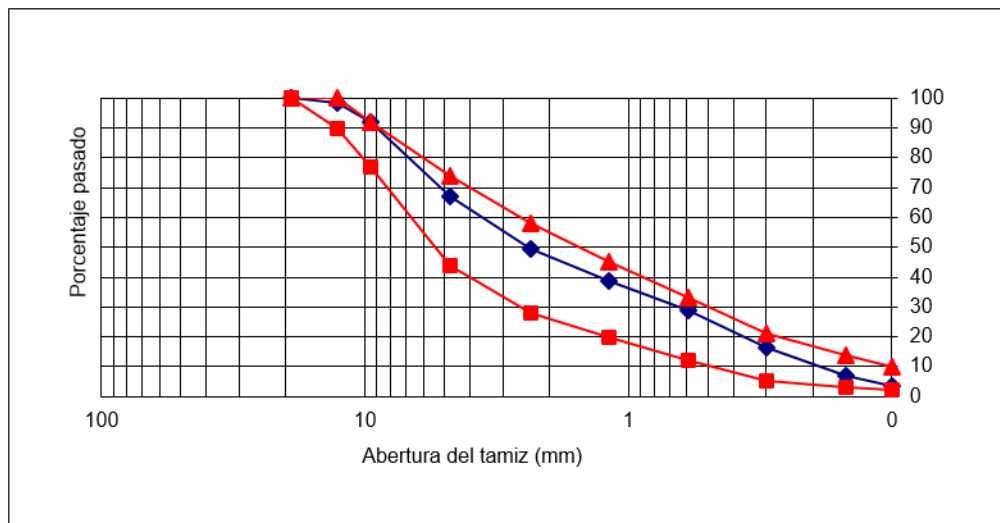
Tabla 5. Resultado de la prueba de extracción de asfalto. Planta VERDÚ.

W1. PESO DE LA MUESTRA DE MEZCLA ASFÁLTICA (gr):	1000,00
F1. PESO DEL FILTRO ANTES DE LA EXTRACCIÓN (gr):	16,70
W2. CONTENIDO DE HUMEDAD (gr):	0,00
W3A. PESO DE AGREG. LAVADOS EN CENTRÍFUGA (gr):	936,70
F2. PESO DEL FILTRO DESPUES DE LA EXTRACCIÓN (gr):	17,20
W3B = F2 - F1	0,50
W3. PESO AGREG. INCLUYENDO FILTRO (gr) (W3A+W3B):	937,20
W4. PESO DE MATERIAL MINERAL EN EXTRACTO (gr):	4,20
% DE ASFALTO = $\{[(W1-W2) - (W3+W4)] / (W1-W2)\} * 100$	5,86

Tabla 6. Chequeo granulométrico en agregados lavados. Planta VERDÚ.

ABERTURA DE TAMICES		PESO RET.	% RETENIDO	% PASADO	ESPEC. 1/2" MOP 2002	
No.	mm	ACUM. (gr)	ACUMULADO	ACUMULADO	Mínimo	Máximo
3/4"	19,00	0,0	0,0	100,0	100	100
1/2"	12,70	13,5	1,4	98,6	90	100
3/8"	9,52	76,0	8,1	91,9		
# 4	4,75	310,6	33,0	67,0	44	74
# 8	2,36	476,6	50,6	49,4	28	58
#16	1,19	575,2	61,1	38,9		
#30	0,59	669,8	71,1	28,9		
# 50	0,30	786,9	83,6	16,4	5	21
#100	0,15	874,9	92,9	7,1		
# 200	0,10	909,0	96,6	3,4	2	10
FONDO	FONDO	941,4				

ESPECIFICACIÓN: 1/2". MOP- 001 F- 2002. TABLA 405-5.1.

**Figura 15.** Representación gráfica de la granulometría. Planta VERDÚ.

3.2.3. Planta de CONCRETO Y PREFABRICADOS (CYP)

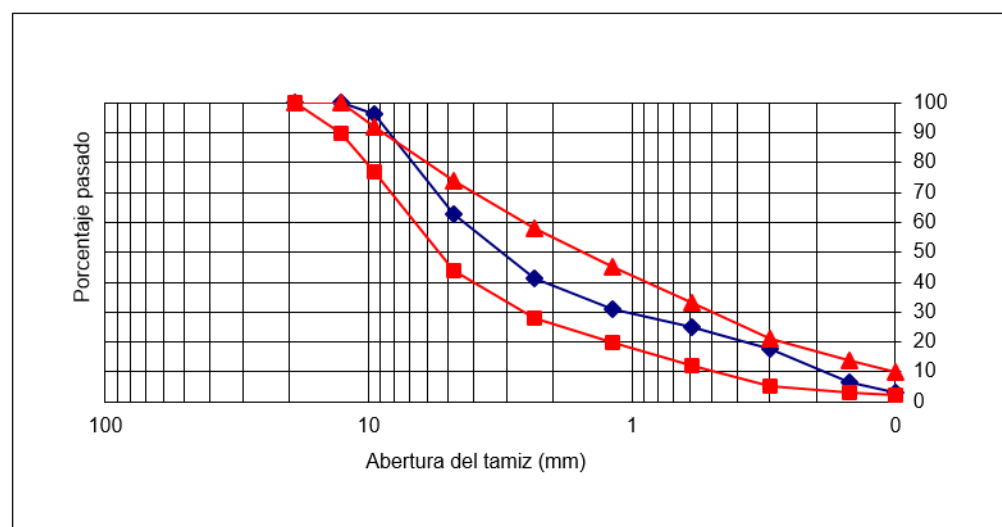
Tabla 7. Resultado de la prueba de extracción de asfalto. Planta CYP.

W1. PESO DE LA MUESTRA DE MEZCLA ASFÁLTICA (gr):	1000,00
F1. PESO DEL FILTRO ANTES DE LA EXTRACCIÓN (gr):	15,30
W2. CONTENIDO DE HUMEDAD (gr):	0,00
W3A. PESO DE AGREG. LAVADOS EN CENTRÍFUGA (gr):	926,80
F2. PESO DEL FILTRO DESPUES DE LA EXTRACCIÓN (gr):	16,70
W3B = F2 - F1	1,40
W3. PESO AGREG. INCLUYENDO FILTRO (gr) (W3A+W3B):	928,20
W4. PESO DE MATERIAL MINERAL EN EXTRACTO (gr):	4,20
% DE ASFALTO = $\{[(W1-W2) - (W3+W4)] / (W1-W2)\} * 100$	6,76

Tabla 8. Chequeo granulométrico en agregados lavados. Planta CYP.

ABERTURA DE TAMICES		PESO RET. ACUM. (gr)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASADO ACUMULADO	ESPEC. 1/2" MOP 2002	
No.	mm				Mínimo	Máximo
3/4"	19,00	0,0	0,0	100,0	100	100
1/2"	12,70	0,0	0,0	100,0	90	100
3/8"	9,52	36,4	3,9	96,1		
# 4	4,75	347,7	37,3	62,7	44	74
# 8	2,36	547,8	58,8	41,2	28	58
#16	1,19	643,6	69,0	31,0		
#30	0,59	699,3	75,0	25,0		
# 50	0,30	768,6	82,4	17,6	5	21
#100	0,15	873,6	93,7	6,3		
# 200	0,10	904,5	97,0	3,0	2	10
FONDO	FONDO	932,4				

ESPECIFICACIÓN: 1/2". MOP- 001 F- 2002. TABLA 405-5.1.

**Figura 16.** Representación gráfica de la granulometría. Planta CYP.

3.2.4. Planta de LICOSA

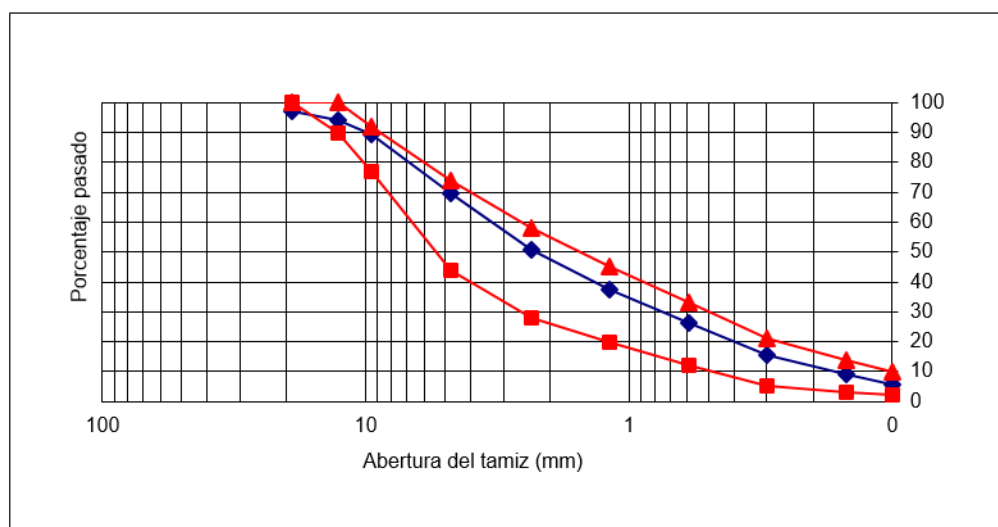
Tabla 9. Resultado de la prueba de extracción de asfalto. Planta LICOSA.

W1. PESO DE LA MUESTRA DE MEZCLA ASFÁLTICA (gr):	1000,00
F1. PESO DEL FILTRO ANTES DE LA EXTRACCIÓN (gr):	17,30
W2. CONTENIDO DE HUMEDAD (gr):	0,00
W3A. PESO DE AGREG. LAVADOS EN CENTRÍFUGA (gr):	927,70
F2. PESO DEL FILTRO DESPUES DE LA EXTRACCIÓN (gr):	18,20
W3B = F2 - F1	0,90
W3. PESO AGREG. INCLUYENDO FILTRO (gr) (W3A+W3B):	928,60
W4. PESO DE MATERIAL MINERAL EN EXTRACTO (gr):	7,35
% DE ASFALTO = $\{[(W1-W2) - (W3+W4)] / (W1-W2)\} * 100$	6,41

Tabla 10. Chequeo granulométrico en agregados lavados. Planta LICOSA

ABERTURA DE TAMICES		PESO RET. ACUM. (gr)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASADO ACUMULADO	ESPEC. 1/2" MOP 2002	
No.	mm				Mínimo	Máximo
3/4"	19,00	27,2	2,9	97,1	100	100
1/2"	12,70	56,5	6,0	94,0	90	100
3/8"	9,52	98,9	10,6	89,4		
# 4	4,75	284,8	30,4	69,6	44	74
# 8	2,36	460,8	49,2	50,8	28	58
#16	1,19	587,3	62,7	37,3		
#30	0,59	689,5	73,7	26,3		
# 50	0,30	790,2	84,4	15,6	5	21
#100	0,15	850,4	90,9	9,1		
# 200	0,10	884,2	94,5	5,5	2	10
FONDO	FONDO	936,0				

ESPECIFICACIÓN: 1/2". MOP- 001 F- 2002. TABLA 405-5.1.

**Figura 17.** Representación gráfica de la granulometría. Planta LICOSA.

3.2.5. Planta de Constructora PALOSA

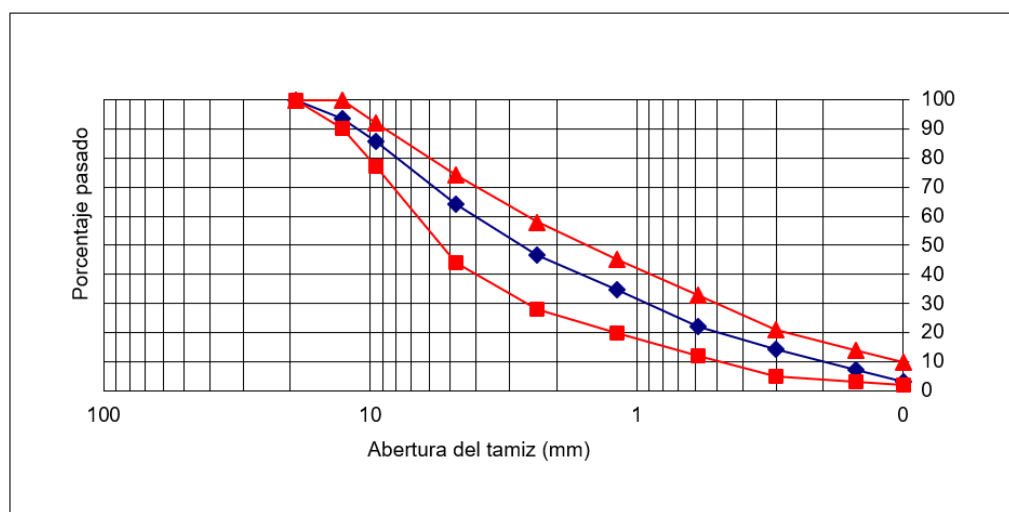
Tabla 11. Resultado de la prueba de extracción de asfalto. Planta PALOSA.

W1. PESO DE LA MUESTRA DE MEZCLA ASFÁLTICA (gr):	1000.00
F1. PESO DEL FILTRO ANTES DE LA EXTRACCIÓN (gr):	16.35
W2. CONTENIDO DE HUMEDAD (gr):	0.00
W3A. PESO DE AGREG. LAVADOS EN CENTRÍFUGA (gr):	934.40
F2. PESO DEL FILTRO DESPUES DE LA EXTRACCIÓN (gr):	17.10
W3B = F2 - F1	0.75
W3. PESO AGREG. INCLUYENDO FILTRO (gr) (W3A+W3B):	935.15
W4. PESO DE MATERIAL MINERAL EN EXTRACTO (gr):	4.20
% DE ASFALTO = $\{[(W1-W2) - (W3+W4)] / (W1-W2)\} * 100$	6.07

Tabla 12. Chequeo granulométrico en agregados lavados. Planta PALOSA.

ABERTURA DE TAMICES		PESO RET. ACUM. (gr)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASADO ACUMULADO	ESPEC. 1/2" MOP 2002	
No.	mm				Mínimo	Máximo
3/4"	19.00	0.0	0.0	100.0	100	100
1/2"	12.70	61.3	6.5	93.5	90	100
3/8"	9.52	133.1	14.2	85.8		
# 4	4.75	337.4	35.9	64.1	44	74
# 8	2.36	501.2	53.4	46.6	28	58
#16	1.19	612.8	65.2	34.8		
#30	0.59	731.9	77.9	22.1		
# 50	0.30	805.3	85.7	14.3	5	21
#100	0.15	872.2	92.9	7.1		
# 200	0.10	911.0	97.0	3.0	2	10
FONDO	FONDO	939.4				

ESPECIFICACIÓN: 1/2". MOP- 001 F- 2002. TABLA 405-5.1.

**Figura 18.** Representación gráfica de la granulometría. Planta PALOSA.

3.3. Resumen de resultados

En la Tabla 13 se presentan todos los resultados obtenidos. En el ANEXO 1 se muestran precisiones sobre su obtención.

Tabla 13. Resumen de resultados a procesar.

NO.	MRIG (MPa)	RTI (MPa)	NO.	MRIG (MPa)	RTI (MPa)	NO.	MRIG (MPa)	RTI (MPa)	NO.	MRIG (MPa)	RTI (MPa)	NO.	MRIG (MPa)	RTI (MPa)	NO.	MRIG (MPa)	RTI (MPa)
1	3314	1,25	51	2184	0,97	101	4155	1,39	151	2888	1,11	201	3755	1,23	251	3764	1,17
2	3202	1,18	52	2471	0,96	102	4460	1,42	152	3980	1,16	202	3306	1,14	252	2840	1,07
3	2689	1,18	53	2389	1,04	103	3965	1,20	153	6501	1,54	203	3406	1,14	253	3290	1,10
4	2943	1,11	54	3099	0,97	104	3451	1,33	154	4443	1,20	204	3521	1,14	254	3633	1,13
5	2538	1,07	55	3399	1,04	105	4388	1,30	155	4227	1,30	205	3949	1,17	255	3477	1,11
6	4346	1,30	56	5249	1,37	106	4948	1,32	156	4054	1,28	206	3099	1,05	256	3531	1,02
7	3550	1,33	57	3401	1,13	107	3968	1,20	157	4440	1,30	207	2515	0,99	257	3078	1,04
8	3549	1,30	58	2813	1,19	108	2785	1,06	158	3659	1,24	208	3131	1,03	258	4322	1,25
9	3819	1,31	59	2853	1,18	109	1970	0,85	159	3661	1,27	209	2669	0,97	259	4327	1,28
10	4296	1,30	60	3457	1,13	110	3868	1,22	160	3936	1,22	210	2569	1,01	260	4263	1,23
11	4311	1,35	61	3736	1,16	111	2262	0,87	161	3756	1,36	211	2792	1,03	261	4161	1,17
12	4418	1,50	62	3704	1,15	112	3586	1,03	162	3394	1,05	212	2085	0,89	262	5493	1,36
13	4021	1,18	63	3819	1,14	113	3347	1,14	163	2999	0,95	213	2908	1,11	263	4443	1,32
14	3328	1,20	64	4486	1,28	114	3539	1,02	164	2918	0,94	214	2693	1,00	264	3218	1,11
15	3026	0,98	65	4187	1,20	115	3094	1,14	165	3936	1,06	215	2432	0,97	265	3970	1,12
16	3031	0,98	66	2564	1,11	116	3334	1,08	166	3756	1,21	216	2515	0,99	266	4374	1,19
17	4651	1,24	67	2644	1,09	117	3180	1,05	167	2464	0,87	217	2592	1,00	267	4930	1,31
18	2938	1,00	68	2622	1,12	118	2477	0,99	168	3393	1,22	218	3281	1,10	268	4440	1,13
19	4516	1,16	69	3195	1,17	119	1701	0,85	169	3479	1,27	219	3688	1,19	269	3003	1,04
20	5062	1,45	70	3746	1,06	120	3633	1,13	170	3636	1,21	220	3769	1,23	270	3158	1,12
21	4225	1,16	71	3175	1,24	121	3923	1,09	171	2378	1,01	221	3386	1,09	271	2876	1,18
22	2923	0,95	72	3793	1,15	122	4078	1,05	172	2562	1,00	222	4009	1,19	272	5685	1,46
23	2548	0,80	73	3522	1,17	123	3427	1,11	173	3607	1,11	223	3497	1,17	273	3479	1,02
24	2970	1,05	74	4144	1,12	124	2981	0,94	174	3486	1,12	224	4649	1,26	274	4996	1,32
25	2490	0,87	75	4515	1,22	125	4155	1,12	175	3993	1,16	225	3702	1,09	275	2245	0,81
26	2804	0,90	76	3927	1,33	126	3800	1,08	176	2302	0,89	226	4869	1,27	276	3209	0,99
27	3885	1,15	77	4740	1,27	127	3040	0,97	177	2261	0,87	227	4436	1,38	277	2811	0,95
28	3414	1,16	78	5989	1,53	128	3469	1,07	178	2027	0,81	228	4487	1,28	278	5150	1,28
29	3454	1,07	79	5500	1,47	129	3804	1,08	179	2298	0,95	229	3929	1,21	279	3559	0,93
30	3446	1,15	80	6143	1,40	130	3784	1,13	180	2557	0,88	230	2617	0,93	280	2784	0,92
31	3111	1,03	81	4277	1,32	131	3513	1,13	181	2729	0,95	231	2960	0,99	281	4462	1,11
32	3103	0,97	82	3968	1,31	132	2254	0,92	182	2247	0,87	232	3003	1,01	282	4358	1,16
33	2113	1,01	83	4907	1,34	133	2447	0,95	183	1703	0,79	233	3052	0,91	283	4151	1,13
34	2474	1,13	84	5027	1,40	134	2603	1,03	184	2299	0,86	234	3224	0,93	284	5169	1,22
35	2640	1,12	85	5307	1,35	135	2442	0,97	185	1828	0,75	235	3286	0,91	285	4029	1,21
36	1911	1,00	86	1891	0,81	136	2259	0,92	186	2566	0,93	236	3276	1,02	286	3545	1,17
37	2114	1,03	87	2238	0,89	137	2041	0,91	187	2056	0,83	237	2958	1,12	287	2038	0,88
38	1871	1,01	88	4294	1,17	138	4146	1,12	188	2811	0,98	238	2810	1,15	288	2548	0,97
39	1818	0,98	89	5010	1,20	139	3038	1,02	189	2368	0,94	239	3036	1,16	289	2223	1,00
40	3935	1,04	90	2574	1,11	140	2847	1,16	190	2325	1,00	240	6266	1,47	290	2671	1,09
41	3265	1,09	91	2747	1,16	141	2283	0,98	191	4105	1,31	241	4504	1,35	291	2558	1,02
42	3506	1,13	92	3492	1,14	142	4071	1,05	192	6471	1,71	242	4491	1,27	292	2617	1,05
43	3841	1,15	93	4224	1,12	143	4005	1,08	193	5035	1,40	243	4775	1,31			
44	1759	0,78	94	4343	1,17	144	3374	1,15	194	2778	1,09	244	6708	1,59			
45	1716	0,86	95	5240	1,08	145	2383	0,99	195	2337	1,01	245	3374	1,20			
46	1839	1,02	96	3502	1,11	146	3361	1,15	196	2013	0,94	246	5302	1,35			
47	2234	0,98	97	3533	1,12	147	2830	1,06	197	2374	0,88	247	3767	1,17			
48	1771	0,89	98	3624	1,22	148	2079	0,91	198	2741	0,96	248	3748	1,27			
49	2297	1,02	99	3455	1,11	149	2520	1,03	199	3129	0,97	249	3157	1,08			
50	2685	1,12	100	3495	1,09	150	2342	1,01	200	3641	1,15	250	3925	1,16			

3.4. Procesamiento estadístico

Para el análisis estadístico de los resultados se utilizó el programa STATGRAPHICS® Centurión XV (2006), con vista a ajustar los datos a un modelo de regresión simple. En un modelo de regresión, la variable de respuesta Y es expresada como una función de una o más variables preestablecidas de X, más el ruido. En muchos (pero no todos) casos, la función es lineal, por lo que el modelo puede expresarse como:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1,i} + \beta_2 X_{2,i} + \beta_3 X_{3,i} + \dots + \beta_k X_{k,i} + \varepsilon_i$$

Donde el subíndice i representa la observación i-ésima en la muestra de datos, las β son los coeficientes desconocidos del modelo y la ε es una desviación aleatoria

que normalmente se asume proviene de una distribución normal con media 0 y desviación estándar σ .

Dado un conjunto de datos con una variable de respuesta Y y una o más variables conocidas, el objetivo del análisis de regresión es construir un modelo que:

1. Describa las relaciones existentes entre las variables, de tal forma que permita obtener una Y bien predicha, dados los valores conocidos de las X.
2. No contenga más variables X que las necesarias para generar una buena predicción.

A continuación, se analizan los aspectos más importantes que se abordarán en el procesamiento estadístico de nuestros datos.

3.4.1. Determinación de los coeficientes del modelo

En la práctica, el modelo estadístico que será ajustado es una línea recta de la forma:

$$\text{MRIG} = \beta_0 + \beta_1 \text{RTI} + \varepsilon$$

Donde la variable dependiente (Y) es MRIG en MPa y la variable independiente (X) es RTI también en MPa. En la ecuación superior, β_1 es la pendiente de la recta, mientras que β_0 es el intercepto con el eje Y. En la determinación de estos coeficientes el programa chequea el estadístico t y el valor P.

El estadístico t (también llamado t de Student) sirve para probar si un coeficiente estimado (β_i) para la pendiente o el intercepto es significativamente diferente de cero. Si $|t|$ es grande (en valor absoluto), indica que el coeficiente es significativamente distinto de cero. Por otra parte, **el valor P**, que está asociado al estadístico t, indica la probabilidad de obtener un valor del estadístico t igual o más extremo que el observado, suponiendo que la hipótesis nula sea cierta.

En este caso, la hipótesis nula (H_0) es:

$$H_0: \beta_i = 0$$

y la alternativa:

$$H_0: \beta_i \neq 0$$

Como interpretación práctica:

Si $p < \alpha$ (por ejemplo, $\alpha = 0.05$, usual), se rechaza $H_0 \Rightarrow$ el coeficiente es significativo, es decir, la variable X influye en Y.

Si $p \geq \alpha$, no hay evidencia suficiente para afirmar que el coeficiente difiera de cero.

En la determinación de coeficientes también se calcula el **coeficiente de correlación de Pearson (r)**, que es una medida estadística que indica el grado y la dirección de la relación lineal entre dos variables cuantitativas.

El rango de valores esperado es: $-1 \leq r \leq +1$

El significado del signo es el siguiente:

- $r > 0$: relación directa o positiva $\rightarrow$ cuando una variable aumenta, la otra tiende a aumentar.
- $r < 0$: relación inversa o negativa $\rightarrow$ cuando una variable aumenta, la otra tiende a disminuir.
- $r = 0$: no hay relación lineal (aunque puede haber una relación no lineal).

La magnitud de la relación entre las variables se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. Interpretación del valor de r.

Valor de r	Interpretación aproximada
0.00 – 0.19	Muy débil o inexistente
0.20 – 0.39	Débil
0.40 – 0.59	Moderada
0.60 – 0.79	Fuerte
0.80 – 1.00	Muy fuerte

3.4.2. Análisis de varianza (ANOVA)

ANOVA en una regresión lineal simple se utiliza para evaluar si el modelo de regresión explica una cantidad significativa de la variabilidad observada en la variable dependiente. Es decir, sirve para probar si existe una relación lineal significativa entre la variable independiente (X) y la variable dependiente (Y).

El ANOVA de regresión divide la variabilidad total de Y en dos componentes:

$$SST = SSR + SSE$$

donde:

- SST (Suma Total de Cuadrados) mide la variabilidad total de Y alrededor de su media.
- SSR (Suma de Cuadrados de la Regresión) mide la parte de la variabilidad explicada por la recta de regresión.
- SSE (Suma de Cuadrados del Error) mide la parte de la variabilidad no explicada (residuos).

A partir de estos datos la estructura del cuadro ANOVA puede representarse según la Tabla 15.

Tabla 15. Cuadro típico de ANOVA

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Estadístico F
Regresión	SSR	1	$MSR = SSR / 1$	$F = MSR / MSE$
Error (residual)	SSE	$n - 2$	$MSE = SSE / (n - 2)$	
Total	SST	$n - 1$		

Donde:

n = número de observaciones

F = es el estadístico que permite probar la hipótesis de significancia del modelo.

Las hipótesis del análisis de varianza serían también:

Hipótesis nula (H_0): $\beta_i = 0$

→ No existe relación lineal entre X y Y.

Hipótesis alternativa (H_1): $\beta_i \neq 0$

→ Sí existe una relación lineal entre X y Y.

Si el valor calculado de F es mayor que el valor crítico de la tabla F (o si el valor $p < 0.05$, usualmente), se rechaza H_0 y se concluye que la regresión es significativa. De los datos procesados también se puede calcular el coeficiente de determinación R^2 .

$$R^2 = SSR / SST$$

R^2 indica la proporción de la variación en la variable dependiente que es explicada por las variables independientes de un modelo de regresión. Un valor de R^2 cercano a 1 significa que el modelo explica una gran cantidad de la variabilidad de los datos, indicando un buen ajuste; mientras que un valor cercano a 0 indica un ajuste deficiente.

3.4.3. Intervalos de confianza y de predicción en el modelo ajustado

En un gráfico de un modelo ajustado, por ejemplo, de regresión lineal, normalmente aparecen dos tipos de bandas que se explican a continuación (Kutner et al., 2005).

1. Límites o intervalos de confianza (IC)

Estos delimitan un rango dentro del cual es muy probable que se encuentre el valor medio esperado de la variable dependiente para un valor dado de la variable independiente. O sea, muestran la incertidumbre sobre la recta/media del modelo, no sobre cada observación individual y son más estrechos que los de predicción porque reflejan únicamente la variabilidad en la estimación del valor promedio. Ejemplo: con un 95% de confianza, *el verdadero valor medio de Y (MRIG) para un valor de X dado (RTI) está dentro de ese intervalo.*

La determinación de IC se realiza a partir de la siguiente expresión:

$$IC = \hat{Y} \pm t * s_{Y.X} * \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(X - \bar{X})^2}{\sum(X - \bar{X})^2}}$$

Donde:

$\hat{Y}$: valor de la variable dependiente calculada por la ecuación lineal de regresión para un valor de la variable independiente X,

n: tamaño de la muestra,

t: valor de la distribución t de Student considerando un porcentaje de confiabilidad y el valor de n,

$S_{Y,X}$: Error estándar de la estimación,

$\bar{X}$: media aritmética de los valores de la variable independiente.

2. Límites o intervalos de predicción (IP)

Estos delimitan un rango dentro del cual es muy probable que caiga una nueva observación individual de la variable dependiente, dado un valor de la variable independiente. Incluyen no solo la incertidumbre del modelo sino también la variabilidad natural de los datos individuales alrededor de la media. Por eso, siempre son más amplios que los intervalos de confianza. Ejemplo: con un 95% de confianza, una nueva medición de Y para ese X caerá dentro de ese intervalo.

El cálculo de IP se realiza de acuerdo a la ecuación que se muestra, siendo ya conocidos los parámetros involucrados.

$$IP = \hat{Y} \pm t * s_{Y.X} * \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(X - \bar{X})^2}{\sum (X - \bar{X})^2}}$$

En conclusión, si quieres saber el valor medio esperado, debes atender al intervalo de confianza; pero si lo que te interesa es dónde caerá una nueva observación individual, miras el intervalo de predicción.

3.5. Resultados del procesamiento estadístico

3.5.1. Determinación del modelo ($Y = a + b.X$)

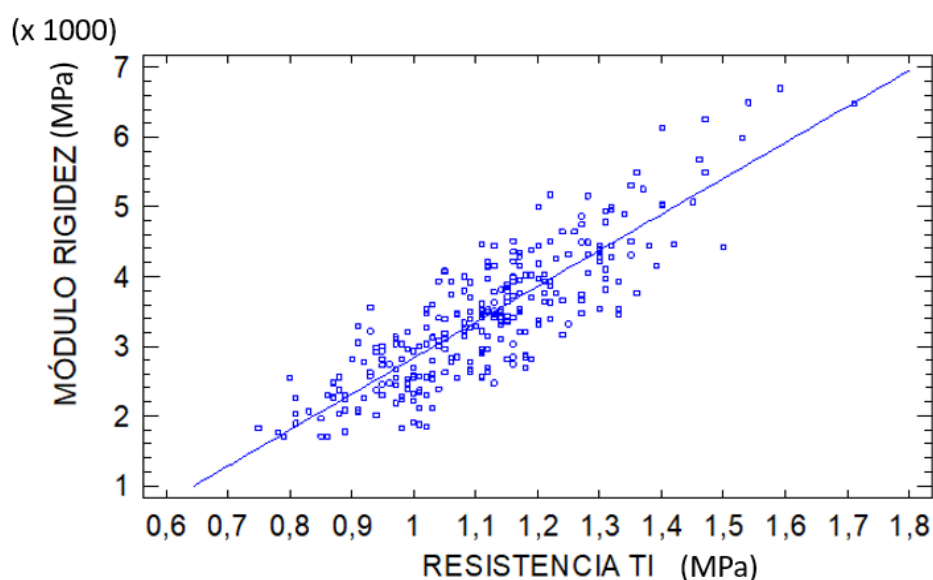
A continuación, se muestra el procesamiento de la regresión simple realizada para las variables RTI (independientes, X) y MRIG (dependiente, Y), ambas en unidades MPa, con el programa STATGRAPHICS. Ver tablas 16 y 17. Se incluyen observaciones que permiten ayudar en su adecuada interpretación.

Tabla 16. Parámetros del modelo lineal.

Parámetro	Mínimos cuadrados estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
Intercepto, a	-2330,09	208,99	-11,15	0,0000
Pendiente, b	5160,82	185,91	27,76	0,0000

La ecuación del modelo ajustado es: **MRIG = -2330,09 + 5160,82 RTI**

El gráfico del modelo ajustado se muestra en la Figura 19.

**Figura 19.** Representación gráfica del modelo.**Tabla 17.** Resumen del análisis de varianza al modelo.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1,92E+08	1	1,92E+08	770,62	0,0000
Residuo	7,24E+07	290	249540		
Total (Corr.)	2,65E+08	291			

Además:

Coeficiente de correlación, $r = 0,85$

R-cuadrada = 72,66%

Error estándar de la estimación, $S_{y,x} = 499,54$

Error absoluto medio = 400,72

Estadístico Durbin-Watson = 1,23138 (P=0,0000)

Observaciones

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación entre MRIG y RTI. Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre MRIG y RTI con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 72,66% de la variabilidad en MRIG. El coeficiente de correlación r es igual a 0,85, indicando una relación muy fuerte entre las variables. El error estándar del estimado, $S_{y,x}$, indica que la desviación estándar de los residuos es 499,54. Este valor se empleará para construir los límites de confianza y predicción para nuevas observaciones.

El error absoluto medio (MAE) de 400,72 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95,0%.

3.5.2. Valoración de modelos alternativos en el análisis de regresión

En la Tabla 18 se muestra un resumen de los coeficientes de correlación r y los valores de R^2 que el programa obtiene al valorar el posible empleo de otros modelos diferentes al lineal.

Observaciones

Como se aprecia en la Tabla 18, solo un modelo daría resultados ligeramente superiores al lineal, el modelo cuadrado de X (polinomio de segundo grado). Sin embargo, por ser las diferencias tan pequeñas respecto a los valores de " r " y R^2 , así como por facilidades para su aplicación práctica, se decidió continuar trabajando con el lineal.

Tabla 18. Modelos alternativos analizados.

Modelo	Coefficiente r	R-Cuadrada
Cuadrado de X	0,855	73,04%
Lineal	0,852	72,66%
Raíz Cuadrada de Y	0,850	72,25%
Raíz Cuadrada Doble	0,849	72,09%
Raíz Cuadrada de X	0,848	71,91%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,846	71,57%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,845	71,45%
Multiplicativa	0,844	71,18%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,844	71,15%
Logaritmo de X	0,842	70,82%
Exponencial	0,841	70,75%
Curva S	-0,838	70,21%
Cuadrado de Y	0,837	70,04%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,834	69,52%
Log-Y Cuadrado-X	0,830	68,85%
Doble Inverso	0,827	68,42%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,826	68,19%
Inversa de X	-0,823	67,74%
Inversa-Y Log-X	-0,821	67,39%
Cuadrado-Y Log-X	0,813	66,08%
Inversa de Y	-0,806	65,02%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,783	61,37%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,783	61,23%

3.5.3. Reporte de residuos atípicos

En la Figura 20 se muestran los residuos estudentizados de la data analizada. Estos residuos indican cuántas desviaciones estándar se desvía cada valor observado de MRIG del modelo ajustado, utilizando todos los datos excepto esa observación. La Tabla 19 de residuos atípicos enlista todas las observaciones que tienen residuos estudentizados mayores a 2, en valor absoluto.

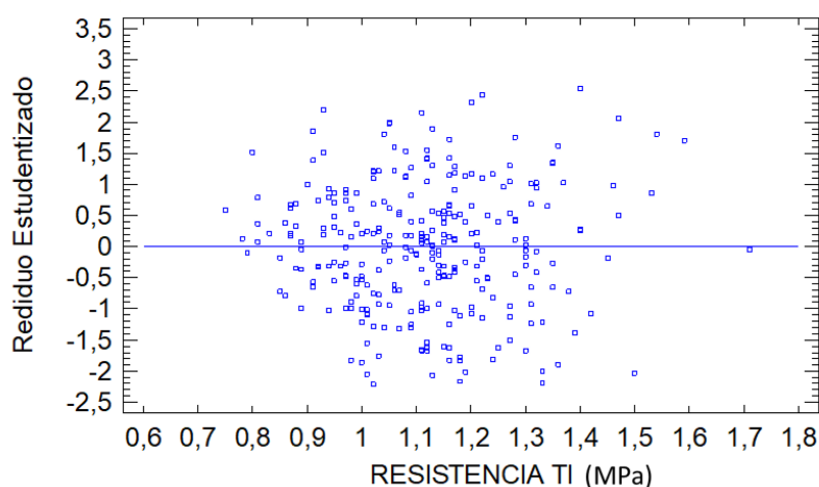
**Figura 20.** Gráfico de residuos.

Tabla 19. Residuos atípicos.

Fila en hoja de datos	X	Y	Predicciones Y	Residuos	Residuos estudentizados
3	1,18	2689	3759,68	-1070,68	-2,16
12	1,50	4418	5411,15	-993,15	-2,02
34	1,13	2474	3501,64	-1027,64	-2,07
38	1,01	1871	2882,34	-1011,34	-2,04
46	1,02	1839	2933,95	-1094,95	-2,21
58	1,19	2813	3811,29	-998,29	-2,01
80	1,40	6143	4895,07	1247,93	2,54
89	1,20	5010	3862,90	1147,10	2,32
104	1,33	3451	4533,81	-1082,81	-2,19
240	1,47	6266	5256,32	1009,68	2,05
279	0,93	3559	2469,48	1089,52	2,20
281	1,11	4462	3398,43	1063,57	2,15
284	1,22	5169	3966,12	1202,88	2,43

Observaciones

En la Tabla 19 se aprecia que existen 13 residuos estudentizados mayores que 2, pero ninguno mayor que 3. De existir observaciones con residuos mayores a 3 es conveniente examinarlos detenidamente para determinar si son valores aberrantes que debieran ser eliminados del modelo y/o analizados de forma particular. En nuestro estudio se decidió no desechar ningún resultado, a partir de que solo un residuo estudentizado superó el valor de 2.5. Como se observa en la Figura 20, la gran mayoría de los puntos se encuentra en el rango de $\pm 1,5$.

3.5.4. Intervalos de confianza y de predicción

Ya se ha mencionado el significado e importancia de estos intervalos y en especial, para nuestro estudio, el de confianza. El programa empleado presenta gráficamente ambos intervalos. Ver Figura 21.

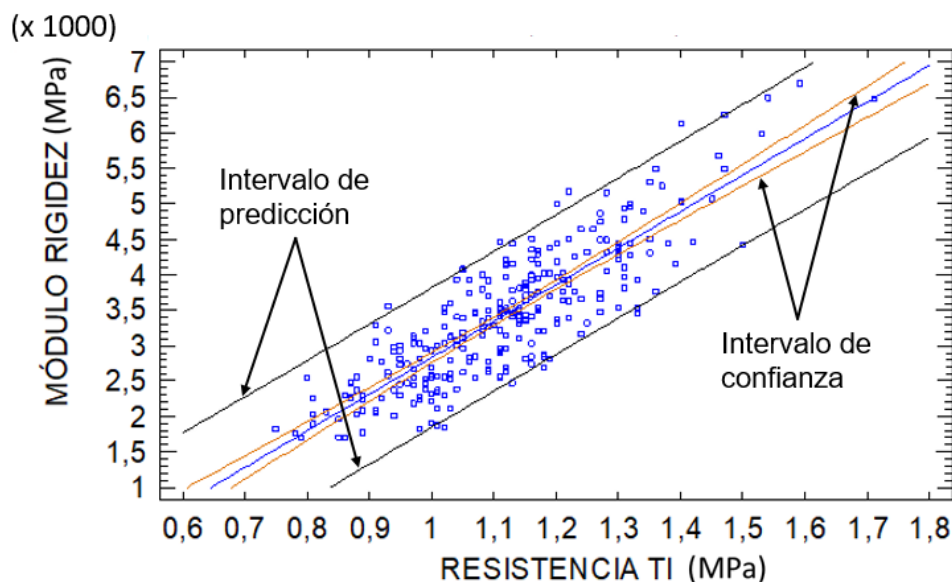


Figura 21. Gráfico del modelo ajustado con intervalos.

3.6. Valoración práctica del modelo y sus intervalos de confianza y predicción

Para un adecuado y preciso trabajo con los intervalos es necesario conocer las ecuaciones que lo representan en la Figura 21, algo que no se pudo obtener directamente del programa STATGRAPHICS. Por esta razón, se procedió a obtener dichas ecuaciones a partir de nuestra data original de 292 pares de puntos (RTI, MRIG) y la ayuda de hojas de cálculo Excel.

Las ecuaciones para obtener los intervalos correspondientes a cada valor de X (RTI) ya han sido presentados en el numeral 3.4.3, y ambas manejan los mismos datos para su funcionamiento. Ver Tabla 20. Ya en el ANOVA se había comprobado que existe una relación estadísticamente significativa entre MRIG y RTI con un nivel de confianza del 95,0%, por lo que se decidió utilizar este porcentaje para la determinación de los intervalos.

Tabla 20. Expresiones de cálculo para los intervalos.

Intervalo de confianza	Intervalo de predicción
$IC = \hat{Y} \pm t * s_{Y \cdot X} * \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(X - \bar{X})^2}{\sum (X - \bar{X})^2}}$	$IP = \hat{Y} \pm t * s_{Y \cdot X} * \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(X - \bar{X})^2}{\sum (X - \bar{X})^2}}$

El procesamiento de la información en Excel se resume con un ejemplo en la Tabla 21. Como se observa, para un valor de X (RTI) de 1.00 MPa, el valor de Y (MRIG) predicho sería 2831 MPa variando IC entre 2902 y 2760 MPa y el IP entre 3816 y 1845 MPa.

Tabla 21. Ejemplo de cálculo para obtener IC e IP.

Variable	Valor	Observación
n=	292	DATO
Confiabilidad=	0,95	DATO
t- Student=	1,968	DATO
$S_{y.x}$ =	499,5	DATO
X=	1,00	ENTRADA
$\bar{X}$ =	1,11	DATO
$\sum(X-\bar{X})^2$ =	7,22	DATO
$\hat{y}$ =	2831	SALIDA
IC(+)=	2902	SALIDA
IC(-)=	2760	SALIDA
IP(+)=	3816	SALIDA
IP(-)=	1845	SALIDA

Variando X(RTI) entre 0.70 y 1.80 MPa se obtuvieron los valores mostrados en la Tabla 22, los que fueron empleados para obtener las ecuaciones respectivas. Ver Tabla 23. Todas las ecuaciones presentaron valores de R^2 igual a 1.

Tabla 22. Resumen de valores de IC e IP

X=	0,70	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15
IC(+)=	1444	1927	2169	2412	2656	2902	3151	3405	3664
IC(-)=	1121	1670	1944	2218	2490	2760	3027	3289	3546
IP(+)=	2279	2790	3046	3303	3559	3816	4074	4332	4590
IP(-)=	286	807	1067	1327	1586	1845	2104	2362	2620
X=	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80
IC(+)=	3929	4197	4468	4741	5015	5564	6114	6666	7217
IC(-)=	3797	4045	4290	4533	4775	5258	5740	6221	6702
IP(+)=	4848	5107	5366	5626	5886	6406	6928	7451	7976
IP(-)=	2878	3135	3392	3648	3905	4416	4926	5435	5943

Tabla 23. Ecuaciones representativas de los intervalos.

Intervalos	Ecuaciones
IC(+)=	$y = 454,64x^2 + 4138,1x - 1683,7$
IC(-)=	$y = -454,64x^2 + 6183,5x - 2976,5$
IP(+)=	$y = 67,277x^2 + 5010,9x - 1261,6$
IP(-)=	$y = -67,038x^2 + 5310,1x - 3398,1$

Con el empleo de estas ecuaciones, en particular las de confianza, pudiera estimarse el comportamiento esperado de una mezcla asfáltica de rodadura, vinculando los valores de X (RTI, MPa) que se obtengan en la práctica experimentalmente, con los valores de Y calculados (MRIG, MPa), sobre los cuales ya existen exigencias de calidad. Es conocido que mezclas con comportamientos satisfactorios presentan módulos entre 3000 y 4000 MPa, pudiéndose ampliar el rango para considerarlas tolerables entre 2500 y 5000 MPa, aunque a nuestro juicio y por razones de seguridad se considera mejor el rango entre 2500 y 4500 MPa. Este ajuste se considera oportuno a partir de que las mezclas aumentan su tendencia a agrietarse cuando se incrementan mucho sus módulos de rigidez, siendo este un problema de suma importancia en nuestros pavimentos asfálticos.

Utilizando las ecuaciones para el intervalo de confianza se obtienen los resultados exactos que aparecen en la Tabla 24. Para manejo como posibles exigencias, los mismos se ajustaron según la Tabla 25.

Tabla 24. Valores obtenidos para cumplir las exigencias a los módulos.

Rango 3000 a 4000 MPa		Rango 2500 a 4500 MPa	
IC(+)		IC(+)	
X=	1,212	X=	1,307
Y=	4000	Y=	4500
IC(-)		IC(-)	
X=	1,047	X=	0,952
Y=	3000	Y=	2500

Tabla 25. Valores recomendados para cumplir las exigencias a los módulos.

Rango 3000 a 4000 MPa		Rango 2500 a 4500 MPa	
IC(+)		IC(+)	
X=	1,20	X=	1,30
Y=	3937	Y=	4464
IC(-)		IC(-)	
X=	1,05	X=	0,95
Y=	3015	Y=	2488

3.7. Observaciones sobre los valores recomendados

Es conocido que con un 95% de confianza, valor utilizado en este estudio, el verdadero valor medio de Y (MRIG) para un valor de X dado (RTI) está dentro del intervalo de confianza, estando los rangos recomendados dentro de esa lógica estadística. Es decir, que si un valor promedio de RTI sobre 3 briquetas, en MPa, obtenido a 20°C y bajo velocidad de carga de 50 mm/min, nos da por ejemplo 1.10 MPa (entre 1.05 y 1.20 MPa), podemos suponer que el valor medio del MRIG correspondiente estará entre 3000 y 4000 MPa (valores satisfactorios). Por otra parte, si el valor obtenido de RTI nos hubiese dado 1.25 MPa (entre 1.20 y 1.30 MPa o entre 0.95 y 1.05 MPa), entonces el valor medio del MRIG correspondiente estaría entre 2500 y 4500 MPa (valores tolerables).

Más allá de estos criterios, se analiza a continuación en la Figura 22 la ubicación de los rangos satisfactorio y tolerable, el primero marcado en rojo con líneas continuas y el segundo con discontinuas.

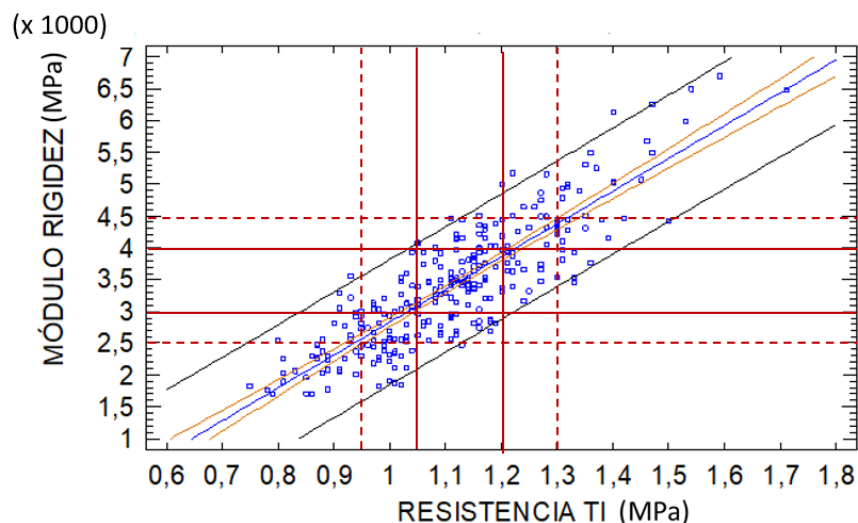


Figura 22. Ubicación de los rangos estudiados.

Para el rango satisfactorio (RTI de 1.05 a 1.20 MPa) se observa que la mayor parte de los puntos cae en el cuadro central de líneas continuas con módulos entre 3000 y 4000 MPa, aunque los que pudieran escapar de ese intervalo hacia arriba o hacia abajo, quedarían casi en su totalidad entre 2500 y 4500 MPa, rango tolerable. Para este último rango (RTI de 1.05 a 1.20 MPa), mayoritariamente los puntos se encuentran en el cuadrante establecido por las líneas discontinuas, o sea, cumpliendo con módulos entre 2500 y 4500 MPa. Solo un estimado de un 5% de los puntos quedaría afuera.

Estas observaciones basadas en la Figura 22 nos da más seguridad respecto a la recomendación de emplear la RTI como posible parámetro para el control de la rigidez de la mezcla con una prueba simple, vinculada fundamentalmente con el fenómeno de agrietamiento, aunque sin dudas puede dar alertas sobre su posible tendencia a deformarse cuando existe muy baja rigidez a 20°C.

3.8. Comprobación de los rangos propuestos

Para valorar los criterios y recomendaciones desarrolladas se procedió a determinar la resistencia TI en nuevas muestras tomadas en 5 plantas, de las cuales solo dos corresponden a las empleadas inicialmente en los estudios. Los resultados se muestran en la Tabla 26.

Si comparamos los resultados promedios obtenidos de la Tabla 26 con los recomendados de la Tabla 25 puede comentarse que:

Planta 1: El promedio de 1.39 MPa supera el límite de 1.30 MPa lo que indica un comportamiento previsible no tolerable ante el agrietamiento. Incluso se presentan dos resultados en muestras ensayadas muy elevados. Esta planta en realidad trabaja con agregados pétreos de alta absorción, lo que tiende a rigidizar la mezcla. El coeficiente de variación (CV) obtenido fue el más alto de todos (12,0).

Planta 2: Presenta un valor de RTI promedio de 0.93 MPa también fuera del rango tolerable, aunque en este caso, por ser muy bajo (menor a 0.95 MPa). El CV fue también elevado, aunque sin superar el valor de 10.

Tabla 26. Resultados de las pruebas de comprobación.

Planta	Muestra	Altura (cm)	Carga (kN)	Resistencia TI (MPa)
PLANTA 1	1	5,30	12,3	1,45
	2	5,10	9,7	1,20
	3	5,20	12,5	1,51
			Promedio: Desv. Estándar: Coef. Variación:	1,39 0,17 12,0
PLANTA 2	4	5,70	9,1	1,00
	5	5,50	8,3	0,94
	6	5,70	7,6	0,83
			Promedio: Desv. Estándar: Coef. Variación:	0,93 0,09 9,39
PLANTA 3	7	6,10	10,4	1,07
	8	6,10	10,2	1,05
	9	6,10	11,1	1,14
			Promedio: Desv. Estándar: Coef. Variación:	1,09 0,05 4,45
PLANTA 4	10	6,00	10,4	1,09
	11	6,10	11,2	1,15
	12	6,00	10,2	1,06
			Promedio: Desv. Estándar: Coef. Variación:	1,10 0,04 3,90
PLANTA 5	13	6,10	9,9	1,01
	14	6,00	10,2	1,07
	15	6,10	9,3	0,95
			Promedio: Desv. Estándar: Coef. Variación:	1,01 0,06 5,60

Plantas 3 y 4: Los resultados corresponden a una misma planta produciendo una misma mezcla según el diseño, pero en diferentes días. Los valores de 1.09 y 1.10 MPa son muy parecidos pudiendo catalogarse las mezclas según el RTI como satisfactorias. Ambos reportes presentan los CV bajos, por debajo de 4,5.

Planta 5: El valor promedio fue de 1.01 MPa, que si bien no cumple con el rango satisfactorio lo hace con el tolerable. El CV obtenido se considera adecuado para este tipo de ensayo.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

El ensayo de tracción indirecta con su configuración de carga diametral sobre una muestra cilíndrica, constituye una base experimental versátil, que permite evaluar tanto la resistencia a la tracción indirecta como propiedades de rigidez a través de diferentes procedimientos dinámicos.

Se determinó según el análisis estadístico realizado el vínculo entre la RTI y el MRIG medido con el equipo NAT, es decir, la existencia de una relación lineal significativa entre ambas a partir del resultado de un “valor-P” inferior a 0,05 en el análisis de varianza (ANOVA). Además, de una intensidad muy fuerte en dicha relación evidenciada por un coeficiente de correlación de Pearson de 0,85.

Se registró un valor del estadístico de Durbin-Watson de 1,23 que indica la presencia de una autocorrelación positiva en los residuos del modelo. Este tipo de autocorrelación es frecuente en series extensas obtenidas en laboratorio y pueden atribuirse a variaciones sistemáticas propias del proceso experimental. Sin embargo, la magnitud de esta autocorrelación no compromete la validez de la tendencia principal del modelo debido a su elevado ajuste.

El análisis de residuos estudentizados identificó 13 valores atípicos en el total de 292 muestras analizadas, con desviaciones superiores a ± 2 pero menores a ± 3 . Esto indica que no son valores erráticos que afectan la estabilidad del modelo, por lo cual no fueron desechados y constituyeron parte del análisis realizado.

La ecuación de ajuste obtenida: $MRIG = -2330,09 + 5160,82 RTI$; permite establecer una relación confiable entre las variables involucradas. El valor estadístico T de 11,15 (valor absoluto) para el intercepto y de 27,76 para la pendiente, ambos con valor-P de prácticamente cero, sustentan que ambos coeficientes son significativos.

A partir de la determinación de las ecuaciones de los intervalos de confianza se pudieron obtener los rangos de RTI vinculados a los rangos de comportamiento satisfactorio y tolerable de los MRIG. Finalmente se obtuvo que el rango satisfactorio

correspondiente a módulos entre 3000 y 4000 MPa se puede ubicar entre 1,20 y 1.05 MPa y el rango tolerable correspondiente a módulos entre 2500 y 4500 MPa a valores entre 1.30 y 0.95 MPa.

Estos rangos nos permiten emplear la RTI como parámetro para el control de la rigidez de la mezcla con una prueba simple, dada su relación con el MRIG, y vinculada fundamentalmente con el fenómeno de agrietamiento, es decir, valores muy altos de RTI indican mezclas muy rígidas que pueden ser quebradizas, con un probable comportamiento inadecuado ante la fatiga a futuro. Por el contrario, valores muy bajos de RTI pueden dar alertas sobre la posible tendencia de la mezcla asfáltica a deformarse de acuerdo a los límites indicados anteriormente.

4.2. Recomendaciones

El proceso de elaboración de las briquetas para la determinación de las RTI debe cumplir con la normativa vigente bajo un control estricto, para minimizar la desviación de sus resultados.

Se recomienda aplicar los resultados de este trabajo como complemento en los diseños de mezclas asfálticas densas para capa de rodadura, así como en los controles rutinarios, que se realizan en la actualidad en Ecuador, en los cuales la resistencia al agrietamiento no se considera.

Los técnicos que trabajan en el campo de los pavimentos asfálticos deben comprender que valores elevados en la RTI no son necesariamente buenos en una mezcla, sino que deben ubicarse en los rangos mencionados, en nuestro caso a 20°C. Esta lógica de análisis incluso falla, a nuestro juicio, en algunas recomendaciones internacionales.

5. BIBLIOGRAFIA

- AASHTO T283. (2014). Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington D.C.
- AASHTO T322. (2003). Standard Method of Test for Determining the Creep Compliance and Strength of Hot-Mix Asphalt (HMA) Using the Indirect Tensile Test Device. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington D.C.
- AASHTO T 342-11 (2015). Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA). American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington D.C.
- AASHTO TP 62. Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA). Status: inactive. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington D.C.
- Al Mamun, S., Kadir, M. A., Ahmed, T. U., & Hossain, M. I. (2025). Prediction of indirect tensile strength and tensile strength ratio of rejuvenated asphalt mixes using machine learning models. *Processes*, 13(5), 1489. <https://doi.org/10.3390/pr13051489>
- ANAS. (2010). Capitolato Speciale dAppalto - Parte 2 Norme tecniche - Pavimentazioni stradali e autostradali.
- ASTM D2172-05. Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen from Bituminous Paving Mixtures. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- ASTM D 3497–79 (1995). Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures. Last Updated: Aug 16, 2017. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, www.astm.org
- ASTM D4123-82. (1995). Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures (Withdrawn 2003). ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org

- ASTM D4123-82. Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1982, www.astm.org
- ASTM D422-63(2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- ASTM D4867 / D4867M. (2014). Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D6931. (2012). Standard test method for indirect tensile strength (IDT) of bituminous mixes. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- ASTM D 7369-20. Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, www.astm.org
- ASTM D8225-19. Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org
- Baladi, G. Y. y Harichandran, R. S. (1989). Asphalt Mix Design and the Indirect Test: A new Horizon. Asphalt Concrete Mix Design: Development of More Rational Approaches, ASTM STP 1041, W. Gartner, Jr., Ed, American Society for Testing and Material (Philadelphia), 86-105.
- Baldo, N., Dal Ben, M., Pasetto, M., Van de Ven, M.& Molenaar, A.A.A. (2010). Indirect Tensile Test for the Determination of the Stiffness and the Resilient Modulus of Asphalt Concretes: Experimental Analysis of the EN 12697 -26 and the ASTM D 4123 Standards. 11th Int. Conf. Asphalt Pavs, pp. 878-796.
- Bastidas, J. G. & Rondón, H. A. (2024). Assessment of asphalt binder content, temperature and loading rate in indirect tensile strength and resilient modulus tests of a hot-mix asphalt – Comparison with Marshall design method. Construction and Building Materials. Volume 426. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136158>

- Breen, J. J., & Stephens, J.E. (1966). Split Cylinder Test Applied to Bituminous Mixtures at Low Temperatures. *Journal of Materials*, Vol 1, No.1, American Society for Testing and Materials, March 1966.
- Carneiro, F. L. & Barcellos, A. (1953). Concrete Tensile Strength. Bulletin No. 13, International Association of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, Paris, March 1953, pp. 97-127.
- Cerni, G., Bocci, E., Cardone, F. & Corradini, A. (2017). Correlation Between Asphalt Mixture Stiffness Determined Through Static and Dynamic Indirect Tensile Tests. *Arabian Journal for Science and Engineering*. Volume 42, pp. 1295–1303. <https://doi.org/10.1007/s13369-016-2380-3>
- Chaitanyaa, G., Srib, M. & Reddyc, K. (2015). Fatigue performance of bituminous mixes containing reclaimed asphalt pavement (RAP) material. 3rd Conference of Transportation Research Group of India.
- Chen, M., Lin, J., & Wu, S. (2023). Performance of waste PET-modified asphalt mixtures under moisture damage using ITS and TSR tests. *Journal of Cleaner Production*, 393, 136369. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136369>
- Delgado, H., Gómez, J.A. & Flores, M. Propuesta de método de prueba de módulo dinámico en mezclas asfálticas para México. IMT. Publicación Técnica No. 507. Sanfandila, Querétaro, 2017. ISSN 0188-7297.
- EN 12697-26:2012. Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt. Part 26: Stiffness. Annex C. Test applying indirect tension to cylindrical specimens (IT-CY).
- EN 12697-26:2012. Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt. Part 26: Stiffness. Annex D. Direct tension-compression test on cylindrical specimens (DTC-CY).
- EN 12697-26. (2019). Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Módulo de Rigidez. AENOR.
- Flores, M. Seminario IMT. “Módulo de resiliencia en mezclas asfálticas”. 2022. <https://www.youtube.com/watch?v=Udimn7ZNN4&t=9s>

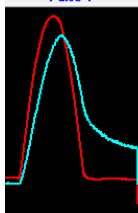
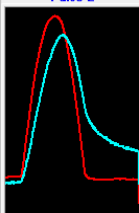
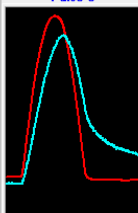
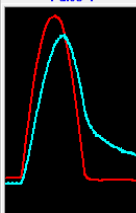
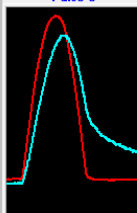
- Ghasemi, M., Marasteanu, M., & Turos, M. (2019). Predicting asphalt mixture dynamic modulus using indirect tensile strength and artificial neural network. *International. Journal of Pavement Engineering*, 20(2), 152–163. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1289873>
- Kennedy, T.W. & Anagnos, J.N. (1983). Procedures for the Static and Repeated-load Indirect Tensile Test. Research Report Number 183-14. Center for Transportation Research. The University of Texas at Austin.
- Kennedy, T.W. & Hudson, W.R. (1968). Application of the indirect Tensile Test to Stabilized Materials. Highway Research Record, No. 235, Highway Research Board, pp.36-48.
- Kennedy, T. W., Roberts, F. L., & Lee, K. W. (1984). Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixtures using the Texas Boiling Test. Transportation Research Record, No. 968, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 45–54.
- Kok, B. V., & Yilmaz, M. (2009). The effects of using lime and styrene–butadiene–styrene on moisture susceptibility resistance of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 23(5), 1999–2006. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.009>
- Kumar, J. B.; Velayudhan, S.; Rathan, A. S. & S. Mathew. (2025). Development of Indirect Tensile Strength (ITS) model and resilient modulus assessment considering moisture conditions on bituminous mixtures. *Innovative Infrastructure Solutions* 11(1). December 2025. <https://doi.org/10.1007/s41062-025-02357-4>
- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J. & Li, W. (2005). *Applied Linear Statistical Models* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Leiva, F. (2004). Módulo dinámico de mezclas asfálticas. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAME).
- Livneh, M. & Shklarsky, E. (1962). The Splitting Test for Determination of Bituminous Concrete Strength. *Proceedings, AAPT*, Vol 31, pp. 457-476.
- Loría, L.G. Caracterizando materiales en ingeniería. Lanamme UCR. 2018. <https://www.youtube.com/watch?v=ryDY2GO9iz4>.

- Meqtoof, A. A., Hussein, A. K., & Younis, R. K. (2022). Effects of SBS modified asphalt on performance of hot mix asphalt. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01305. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01305>
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2002). *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes*. Quito. Ecuador, pp. 1-772.
- Pell, P. S., & Cooper, K. E. (1982). The evaluation of the properties of bituminous roadbases and bases by indirect tensile tests. *Journal of the Institute of Petroleum*, 68(634), 124–134.
- Pérez Jiménez, F.E.; Miró Recasens, R. y Martínez, A. (1999). Empleo del ensayo de tracción indirecta para el control de calidad de la ejecución de mezclas bituminosas. *X Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto*. Tomo II. Sevilla, España, pp. 869-878.
- STATGRAPHICS® Centurión XV. (2006). *Manual de usuario*. EE.UU. www.statgraphics.com
- Tesoriere, G. & Marino, S. (1990). Thermic Effects for Rupture Tests at Indirect Tensile Test on Asphalt Concrete. *Proceedings of the Fourth International Symposium Held by RILEM (Budapest)*, pp. 320-328.
- Tighe, S. L., & Haas, R. (1999). Evaluation of cold weather performance of asphalt pavements using the indirect tensile test. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 26(2), 181–188. <https://doi.org/10.1139/I98-063>
- Vila, R. (2017). *Estudios y propuestas sobre la calidad de los asfaltos y de las mezclas asfálticas en Ecuador*. Dirección de Publicaciones. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Vila, R., Mera, W.A., Villao, A. & Rodríguez, C. (2022). Experiencias con la prueba IDEAL para caracterizar la resistencia al agrietamiento de mezclas asfálticas en Ecuador. *XXI CILA*. Punta del Este. Uruguay.
- Widayat, D. (2018). Correlation of indirect tensile strength to resilient modulus parameter of cold mix asphalt with foamed bitumen. *Jurnal Jalan Jembatan* 27 (2):88-96. <https://binamarga.pu.go.id/jurnal/index.php/jurnaljalanjembatan/article/view/258>.

Yildiz, S., & Sargin, S. (2024). The effect of hydrated lime on the indirect tensile strength of hot mix asphalt at different temperatures. *International Journal of Pavement Engineering*, Advance online publication. <https://doi.org/10.1080/10298436.2024.2324059>

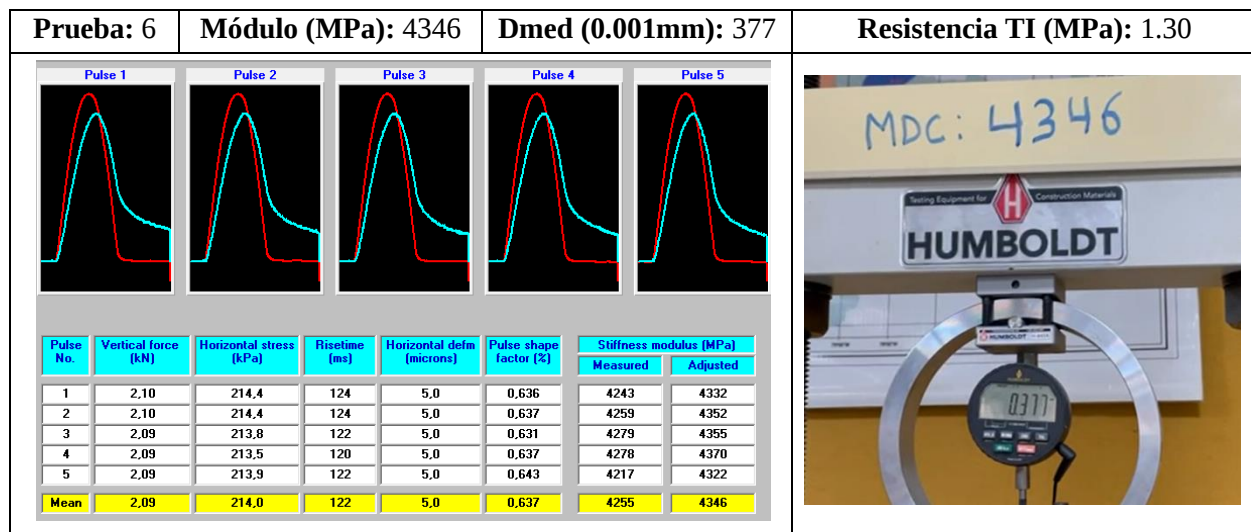
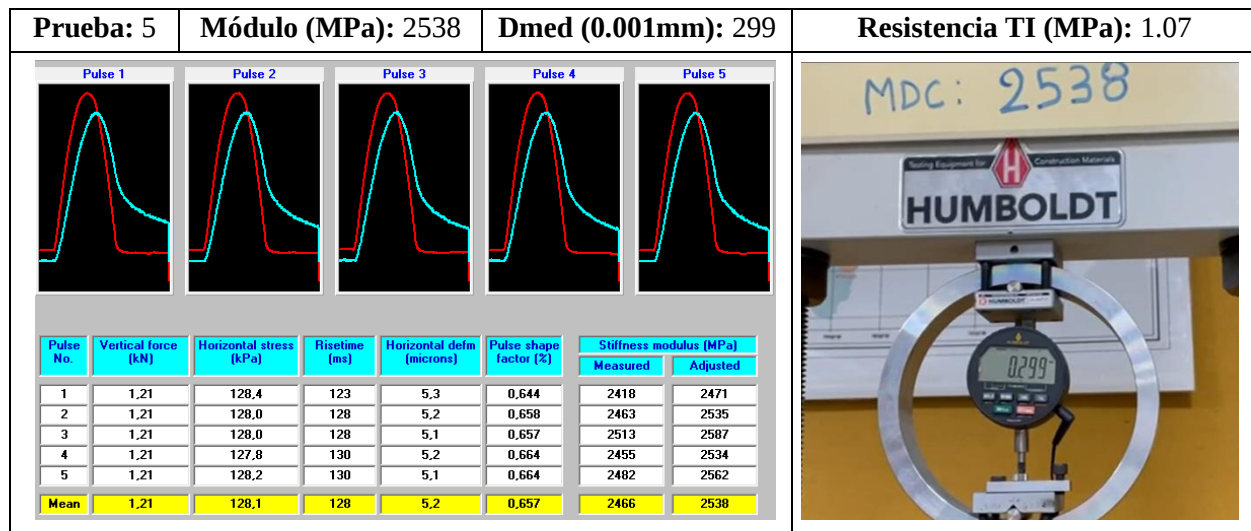
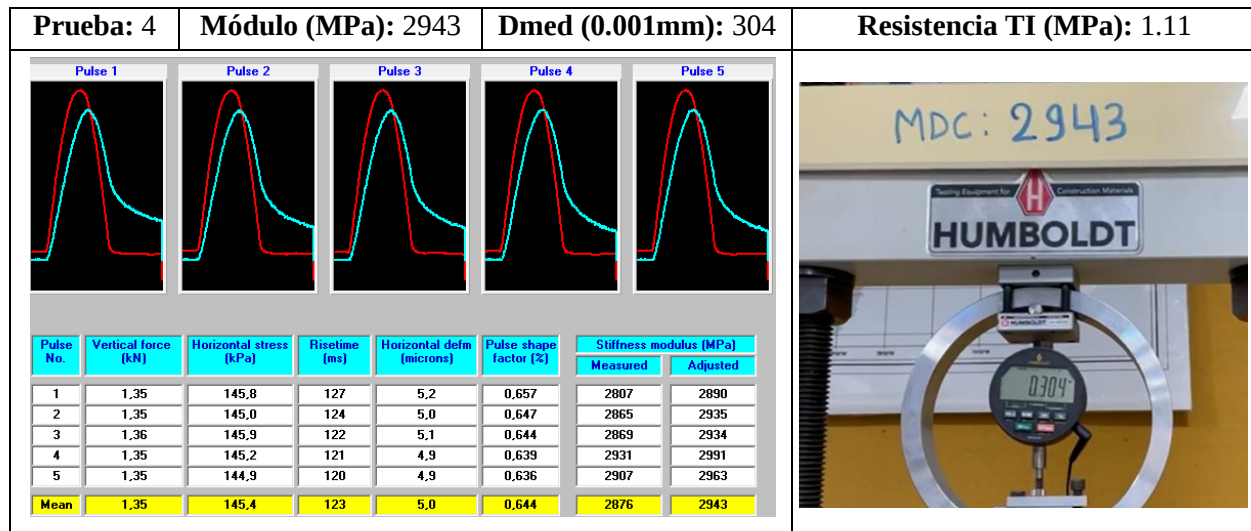
ANEXOS

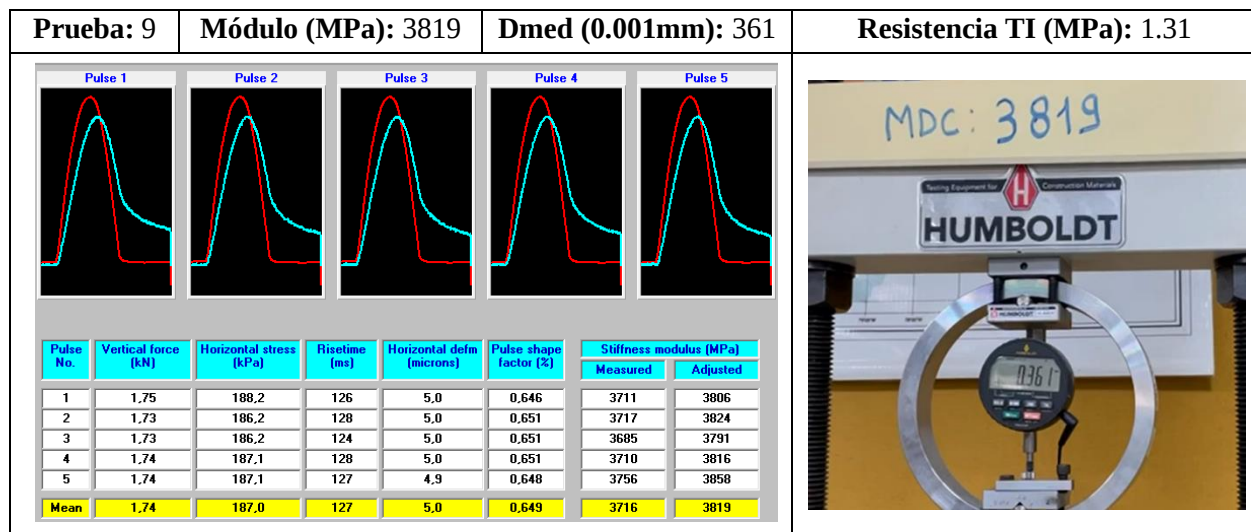
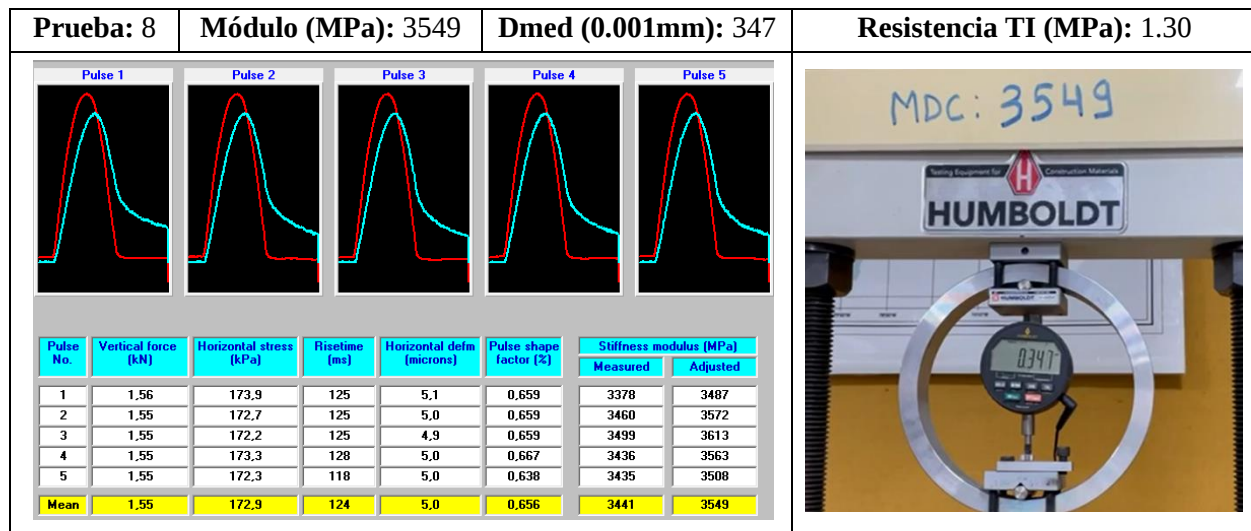
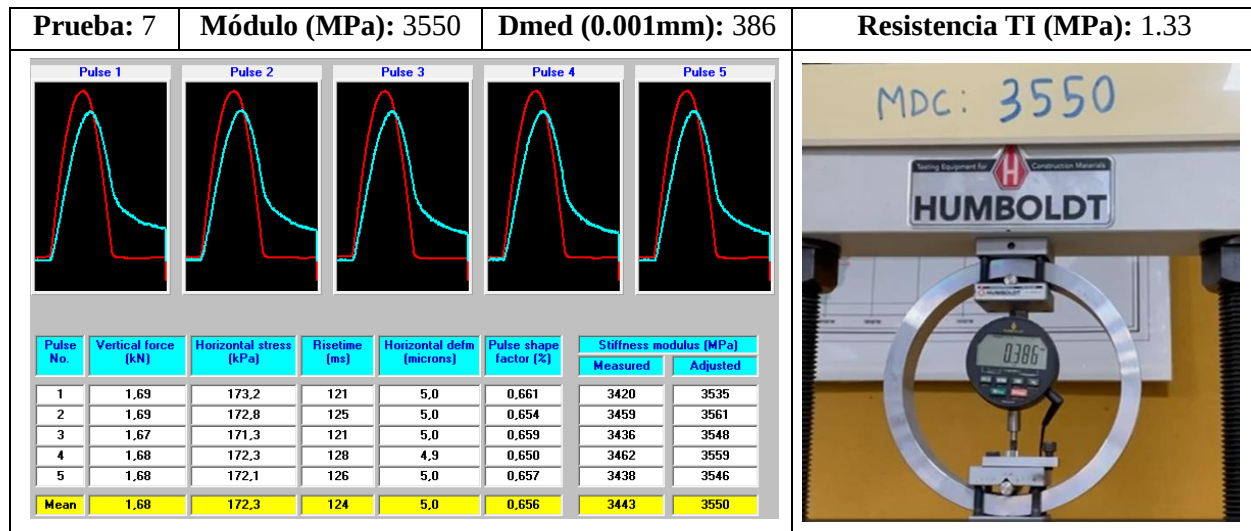
Salida de resultados de MRIG del equipo NAT y de la prueba de TI

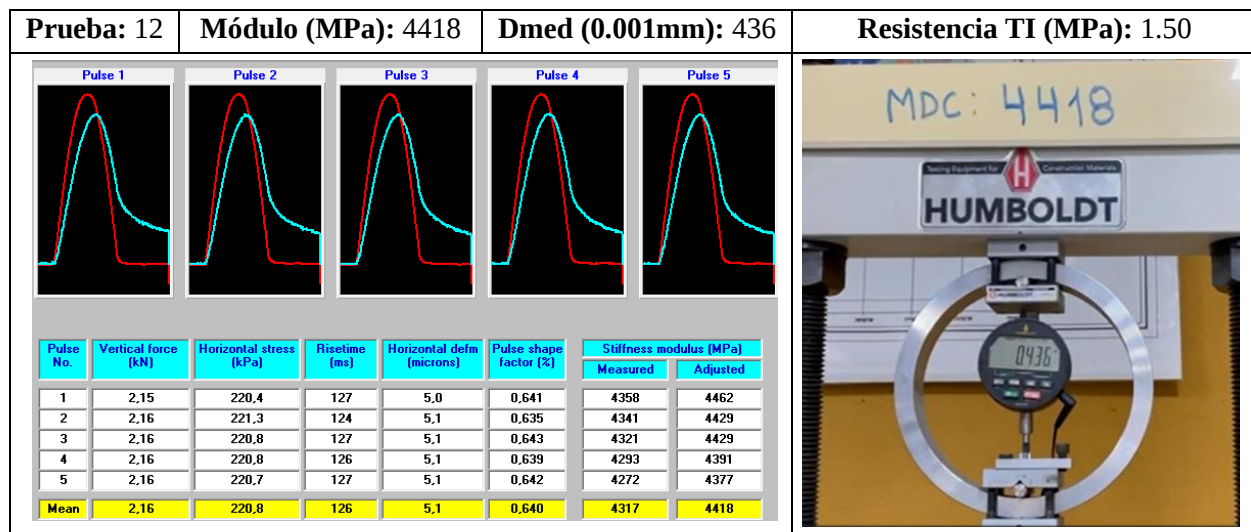
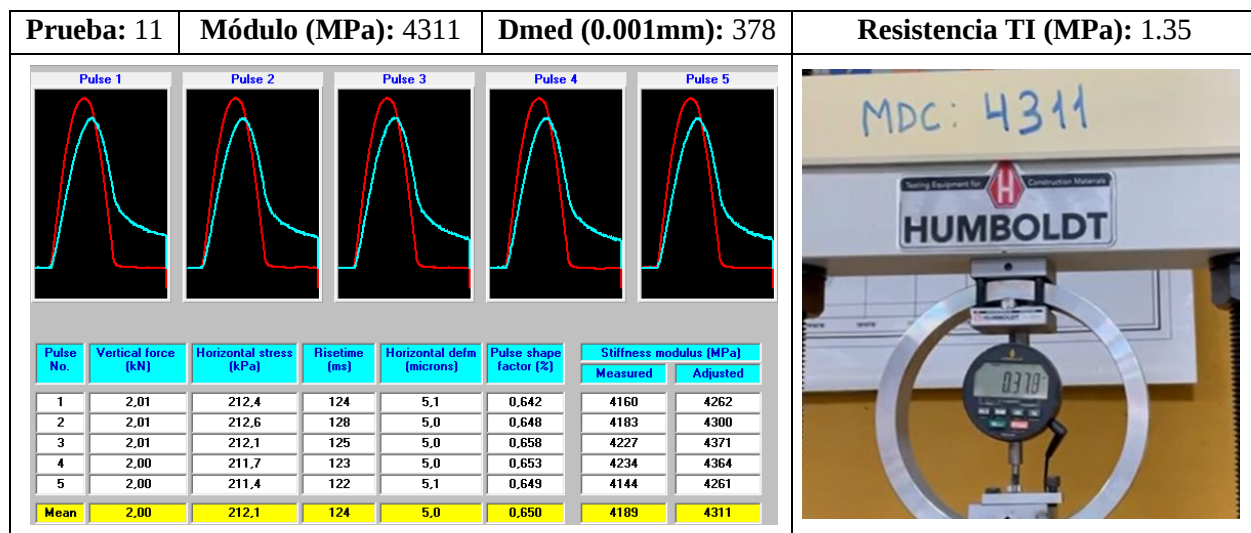
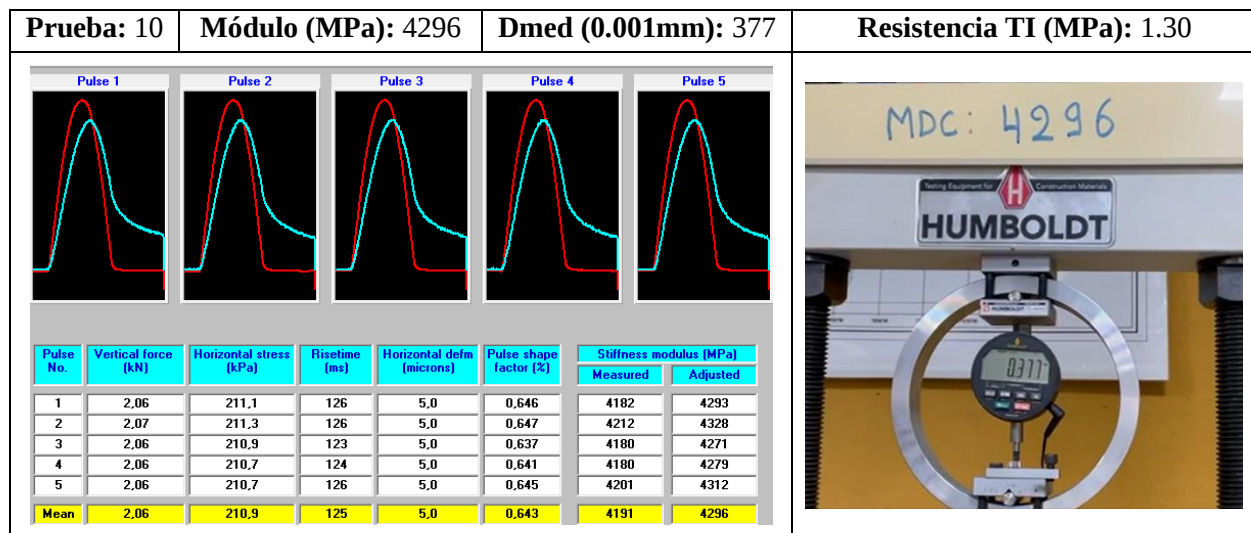
Prueba: 1		Módulo (MPa): 3314		Dmed (0.001mm): 346		Resistencia TI (MPa): 1.25																																																											
    																																																																	
<table><tr><th rowspan="2">Pulse No.</th><th rowspan="2">Vertical force (kN)</th><th rowspan="2">Horizontal stress (kPa)</th><th rowspan="2">Risetime (ms)</th><th rowspan="2">Horizontal defm (microns)</th><th rowspan="2">Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr><tr><td>1</td><td>1,51</td><td>163,0</td><td>126</td><td>5,1</td><td>0,647</td><td>3175</td><td>3256</td></tr><tr><td>2</td><td>1,51</td><td>162,5</td><td>121</td><td>5,0</td><td>0,644</td><td>3255</td><td>3334</td></tr><tr><td>3</td><td>1,50</td><td>161,6</td><td>120</td><td>5,0</td><td>0,641</td><td>3243</td><td>3316</td></tr><tr><td>4</td><td>1,51</td><td>162,4</td><td>124</td><td>5,0</td><td>0,653</td><td>3247</td><td>3341</td></tr><tr><td>5</td><td>1,53</td><td>164,3</td><td>123</td><td>5,0</td><td>0,640</td><td>3251</td><td>3322</td></tr><tr><td>Mean</td><td>1,51</td><td>162,8</td><td>123</td><td>5,0</td><td>0,645</td><td>3234</td><td>3314</td></tr></table>								Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)		Measured	Adjusted	1	1,51	163,0	126	5,1	0,647	3175	3256	2	1,51	162,5	121	5,0	0,644	3255	3334	3	1,50	161,6	120	5,0	0,641	3243	3316	4	1,51	162,4	124	5,0	0,653	3247	3341	5	1,53	164,3	123	5,0	0,640	3251	3322	Mean	1,51	162,8	123	5,0	0,645	3234	3314
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																											
						Measured	Adjusted																																																										
1	1,51	163,0	126	5,1	0,647	3175	3256																																																										
2	1,51	162,5	121	5,0	0,644	3255	3334																																																										
3	1,50	161,6	120	5,0	0,641	3243	3316																																																										
4	1,51	162,4	124	5,0	0,653	3247	3341																																																										
5	1,53	164,3	123	5,0	0,640	3251	3322																																																										
Mean	1,51	162,8	123	5,0	0,645	3234	3314																																																										
																																																																	

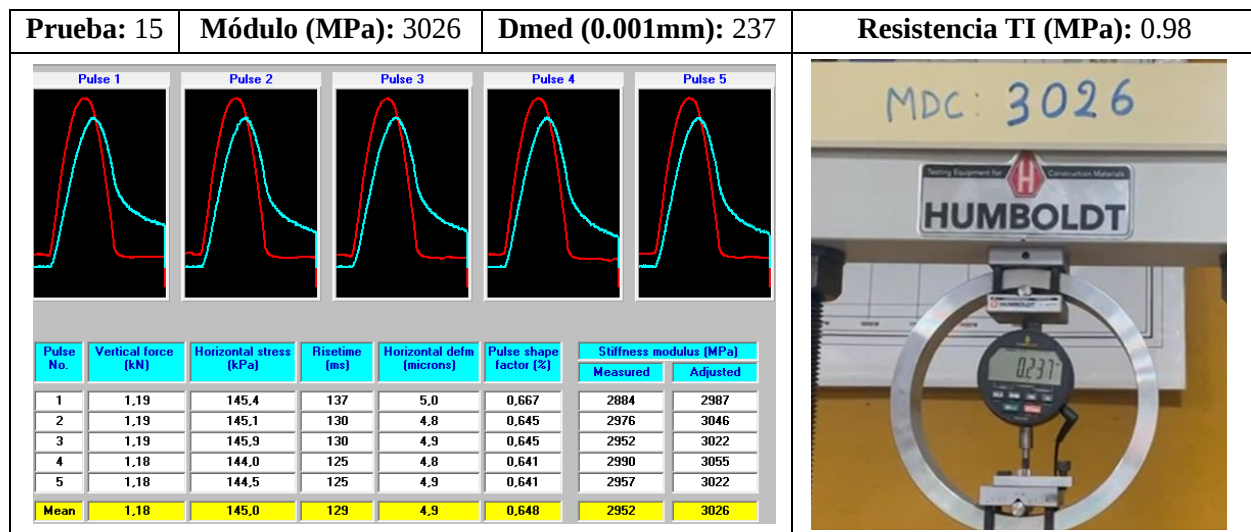
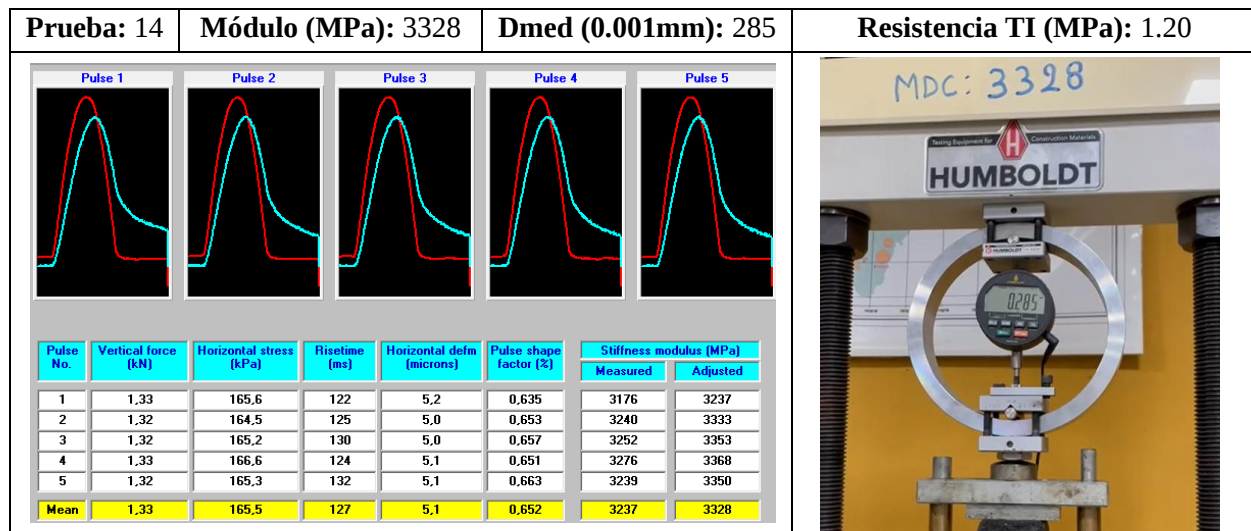
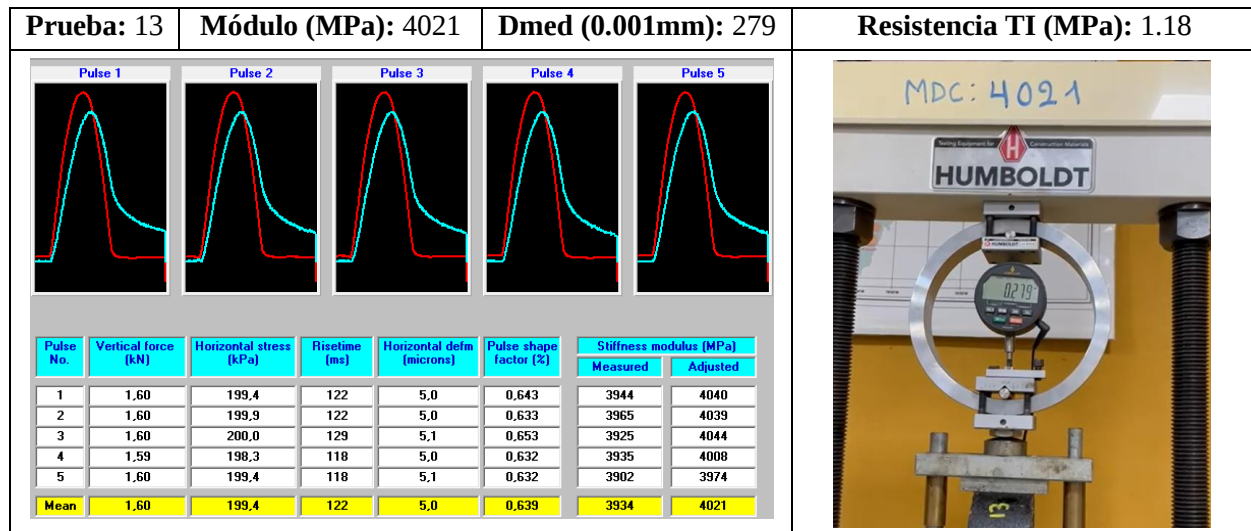
Prueba: 2	Módulo (MPa): 3202	Dmed (0.001mm): 320	Resistencia TI (MPa): 1.18				
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5			MDC: 3202 HUMBOLDT 0320				
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)	
						Measured	Adjusted
1	1,44	157,5	120	5,1	0,638	3068	3130
2	1,44	158,0	128	5,0	0,661	3108	3211
3	1,44	157,5	128	5,0	0,660	3144	3245
4	1,43	156,7	120	4,9	0,636	3170	3233
5	1,44	158,0	121	5,0	0,641	3122	3191
Mean	1,44	157,5	123	5,0	0,647	3123	3202

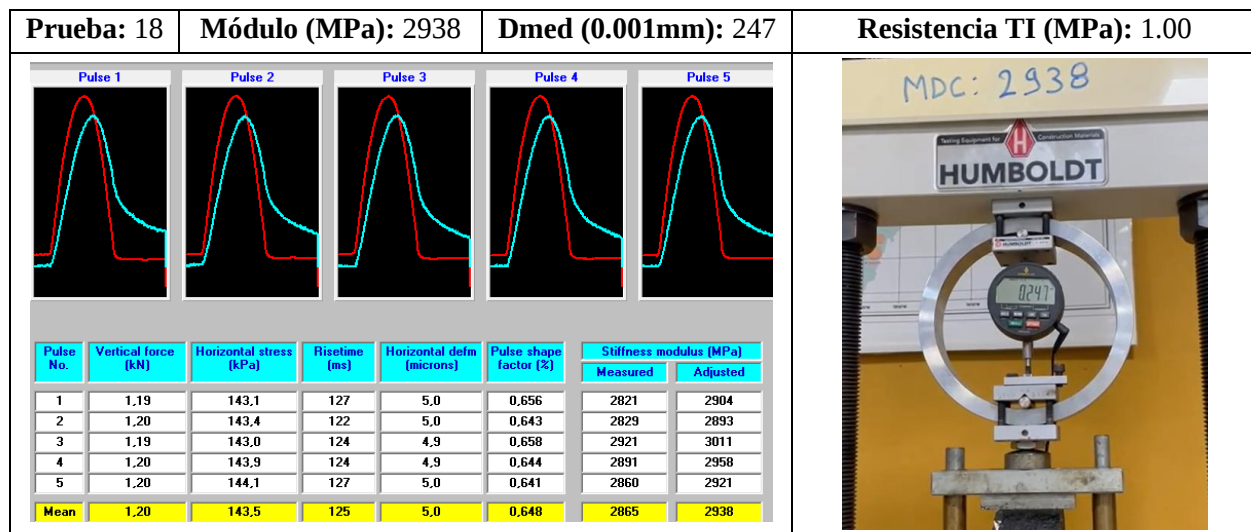
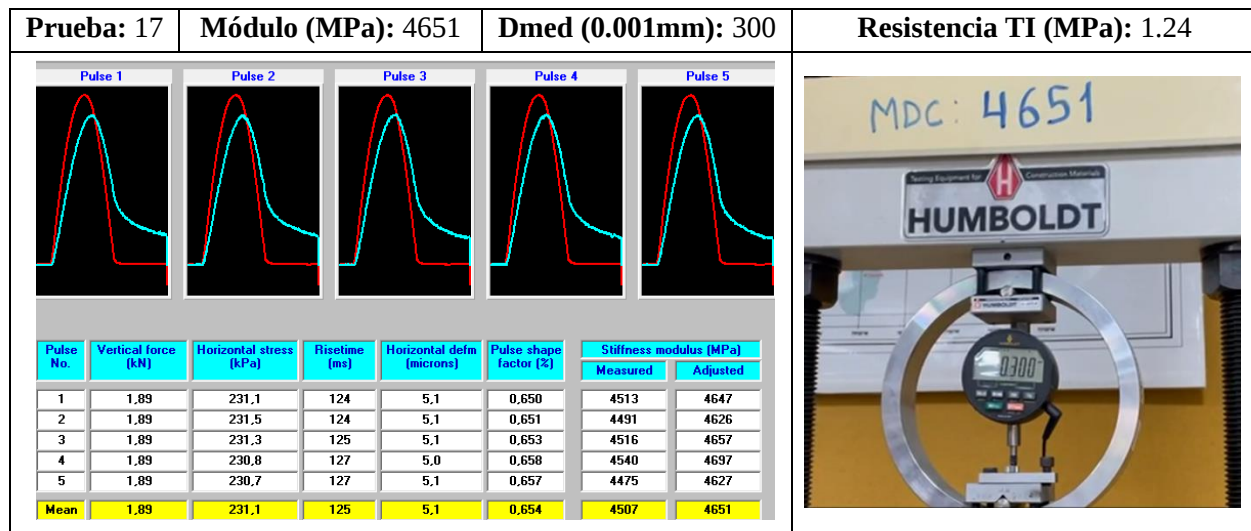
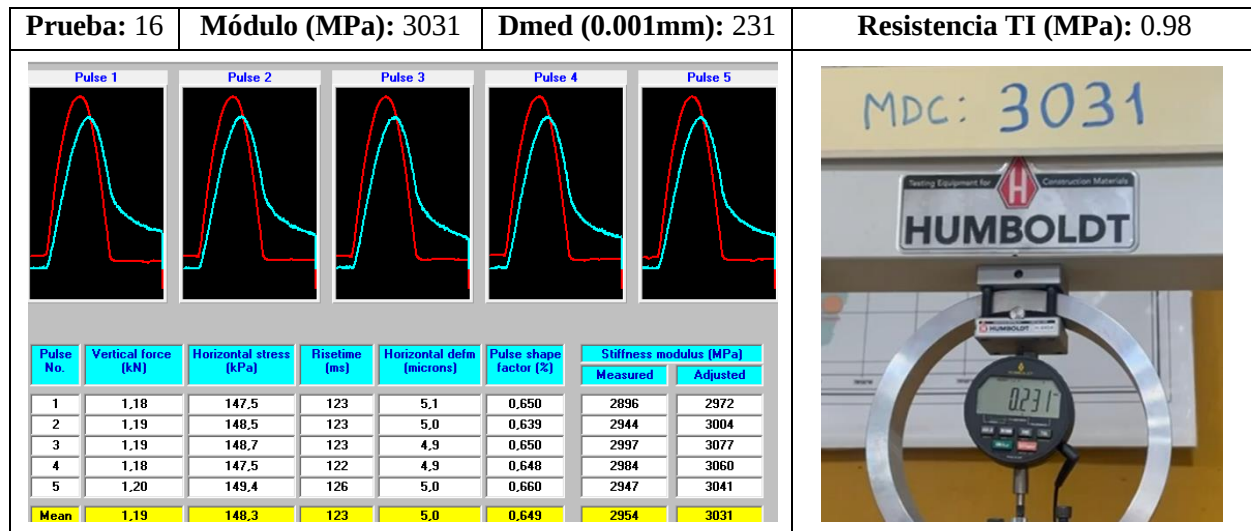
Prueba: 3	Módulo (MPa): 2689	Dmed (0.001mm): 302	Resistencia TI (MPa): 1.18																																																										
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5																																																													
<table><tr><th rowspan="2">Pulse No.</th><th rowspan="2">Vertical force (kN)</th><th rowspan="2">Horizontal stress (kPa)</th><th rowspan="2">Risetime (ms)</th><th rowspan="2">Horizontal defm (microns)</th><th rowspan="2">Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr><tr><td>1</td><td>1,11</td><td>128,4</td><td>126</td><td>5,0</td><td>0,651</td><td>2572</td><td>2639</td></tr><tr><td>2</td><td>1,10</td><td>127,2</td><td>126</td><td>4,8</td><td>0,650</td><td>2649</td><td>2717</td></tr><tr><td>3</td><td>1,09</td><td>126,6</td><td>124</td><td>4,8</td><td>0,655</td><td>2609</td><td>2683</td></tr><tr><td>4</td><td>1,10</td><td>127,3</td><td>124</td><td>4,8</td><td>0,643</td><td>2623</td><td>2681</td></tr><tr><td>5</td><td>1,10</td><td>127,1</td><td>124</td><td>4,8</td><td>0,656</td><td>2648</td><td>2724</td></tr><tr><td>Mean</td><td>1,10</td><td>127,3</td><td>125</td><td>4,8</td><td>0,651</td><td>2620</td><td>2689</td></tr></table>				Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)		Measured	Adjusted	1	1,11	128,4	126	5,0	0,651	2572	2639	2	1,10	127,2	126	4,8	0,650	2649	2717	3	1,09	126,6	124	4,8	0,655	2609	2683	4	1,10	127,3	124	4,8	0,643	2623	2681	5	1,10	127,1	124	4,8	0,656	2648	2724	Mean	1,10	127,3	125	4,8	0,651	2620	2689
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)							Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																	
				Measured	Adjusted																																																								
1	1,11	128,4	126	5,0	0,651	2572	2639																																																						
2	1,10	127,2	126	4,8	0,650	2649	2717																																																						
3	1,09	126,6	124	4,8	0,655	2609	2683																																																						
4	1,10	127,3	124	4,8	0,643	2623	2681																																																						
5	1,10	127,1	124	4,8	0,656	2648	2724																																																						
Mean	1,10	127,3	125	4,8	0,651	2620	2689																																																						
MDC: 2689 Humboldt 0.302																																																													

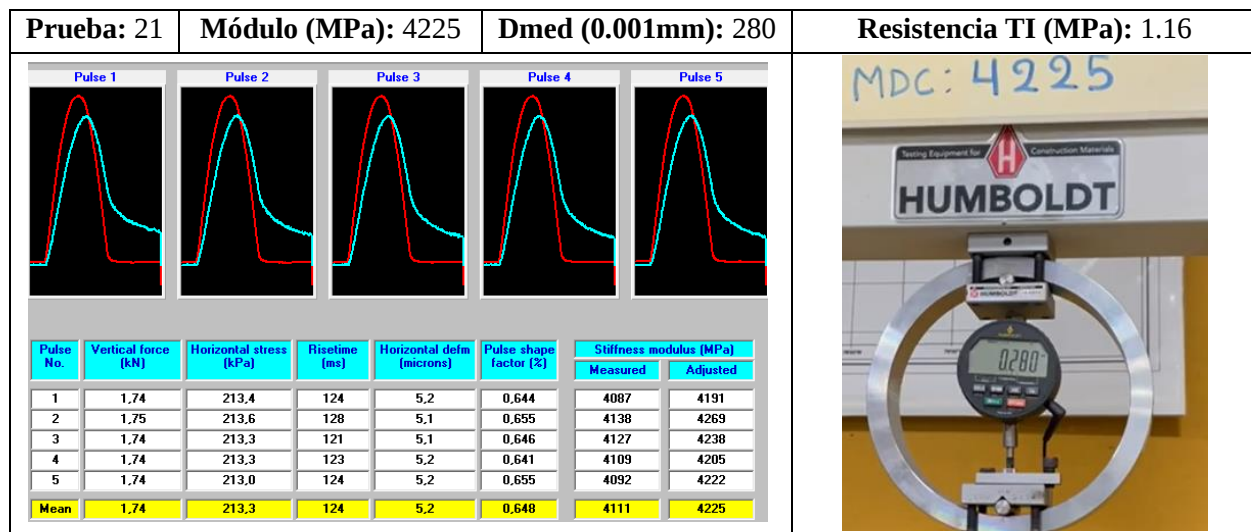
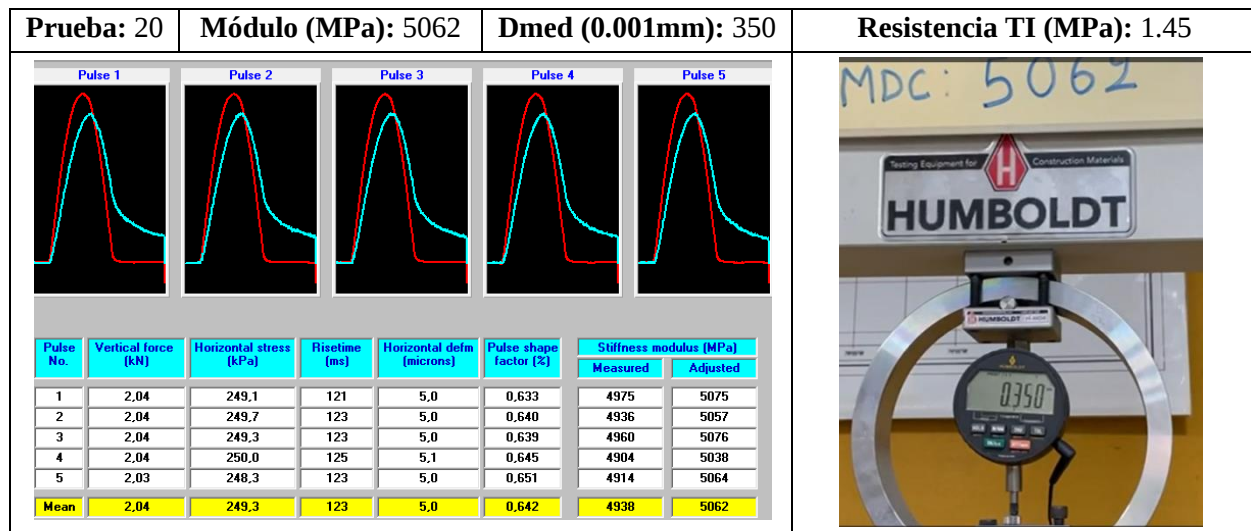
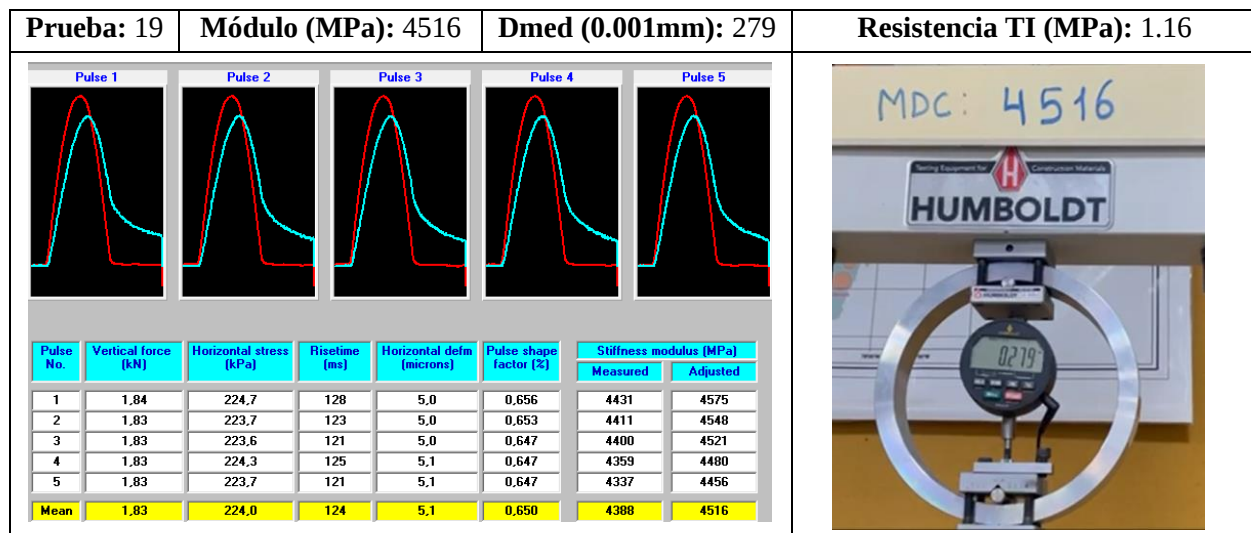


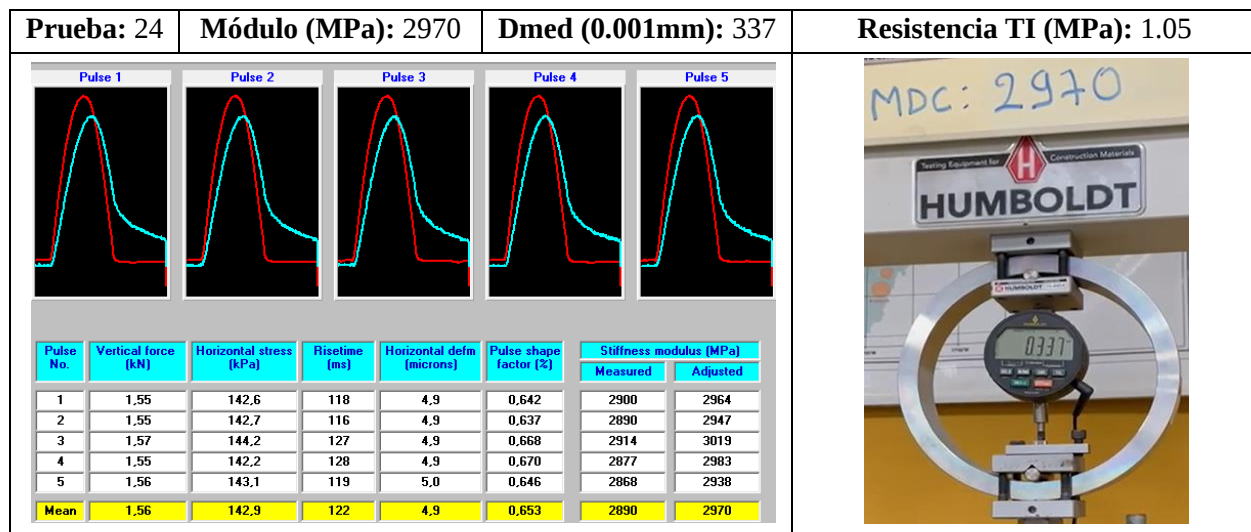
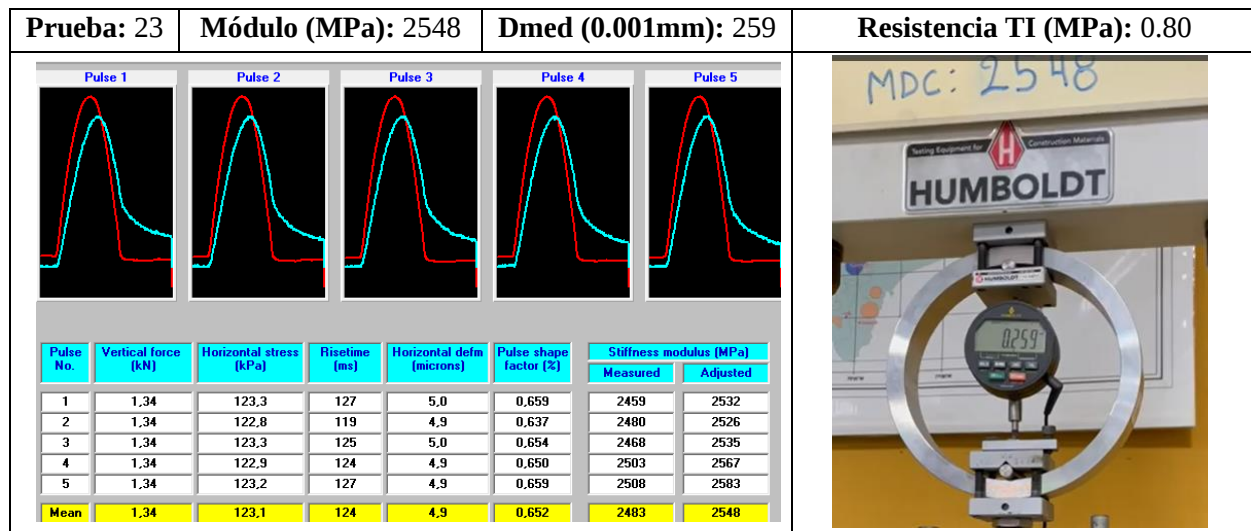
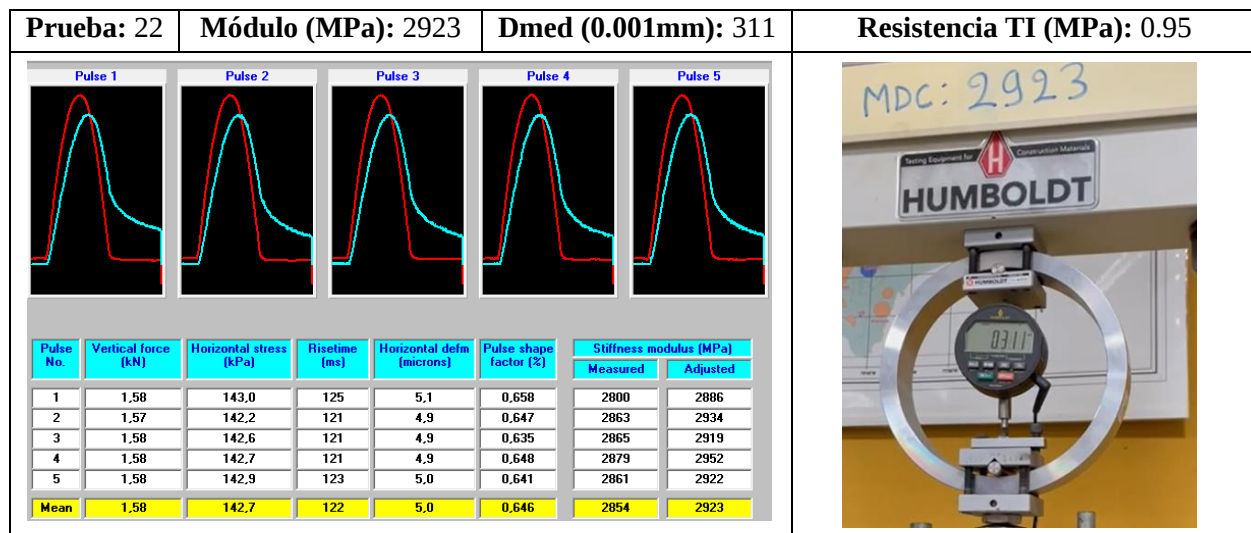


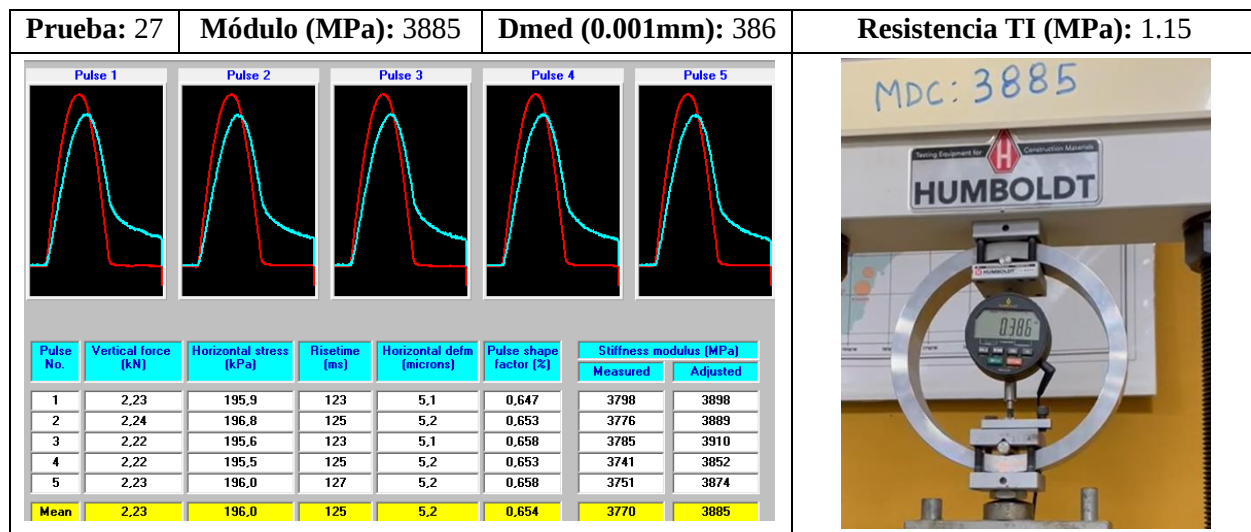
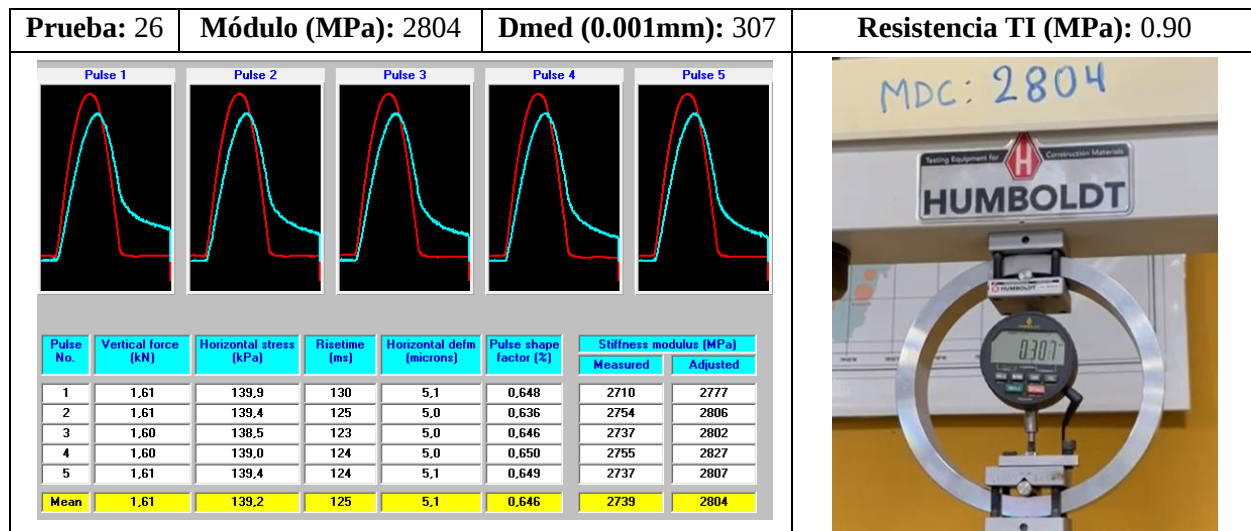
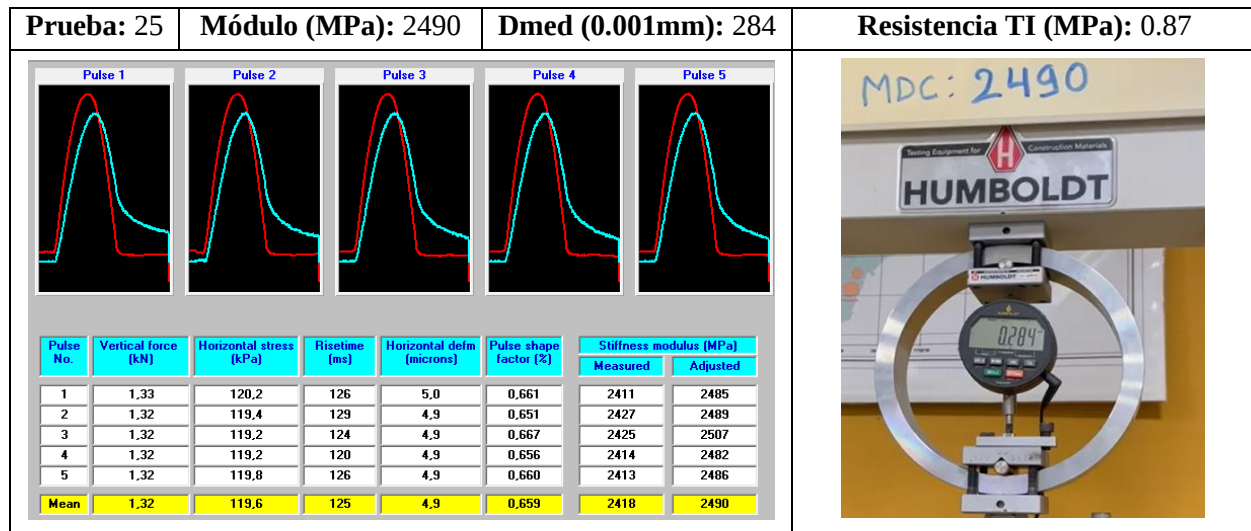


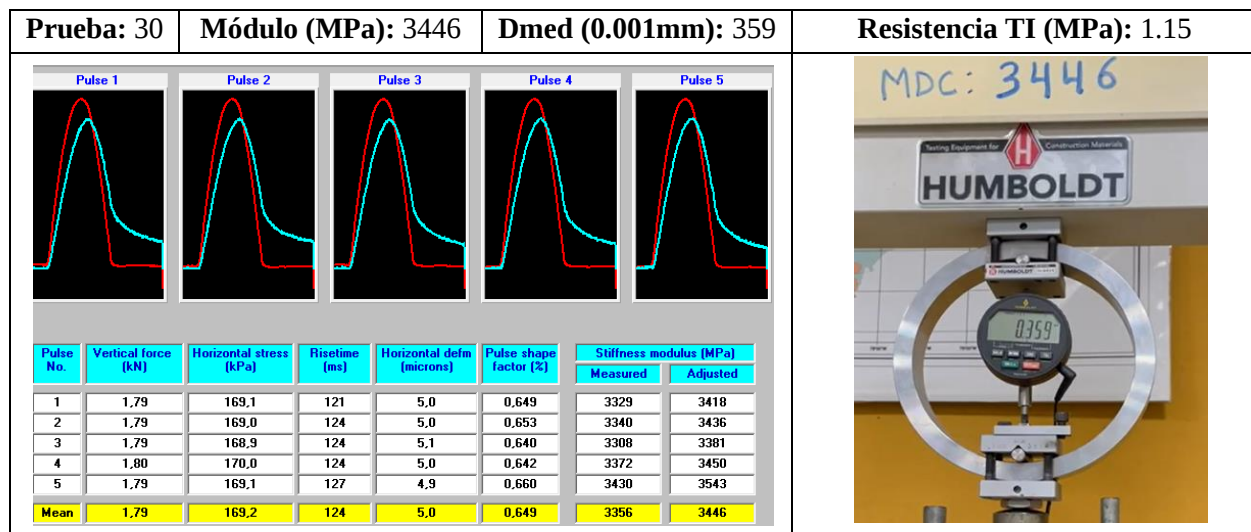
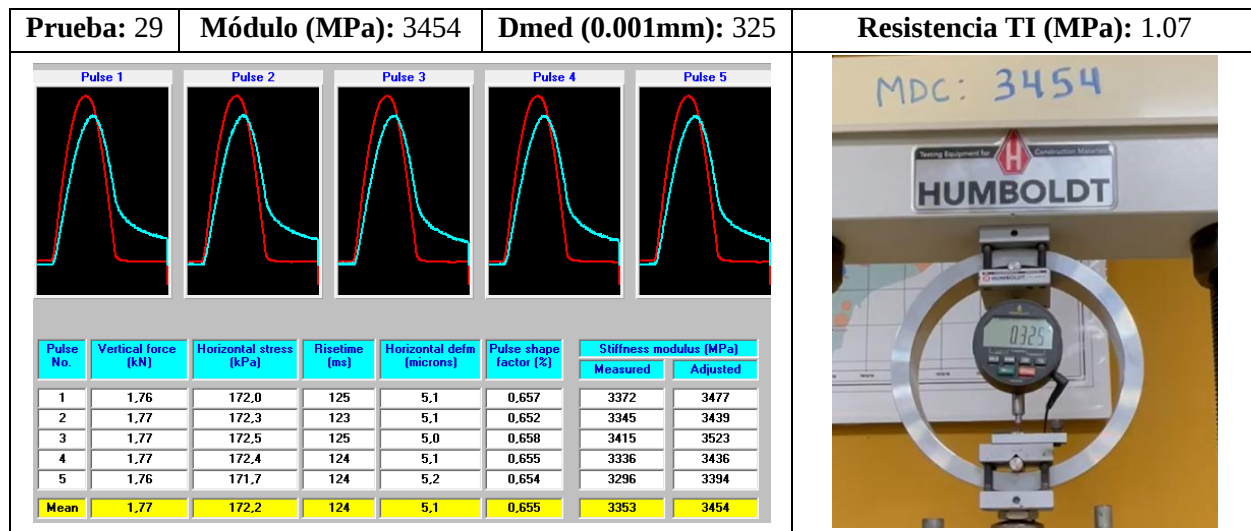
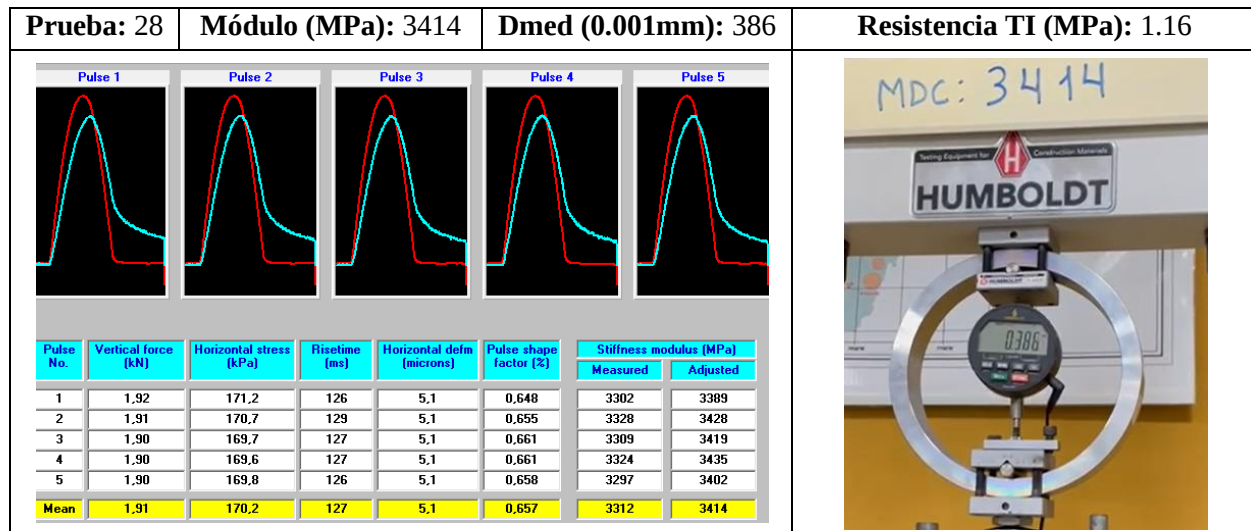


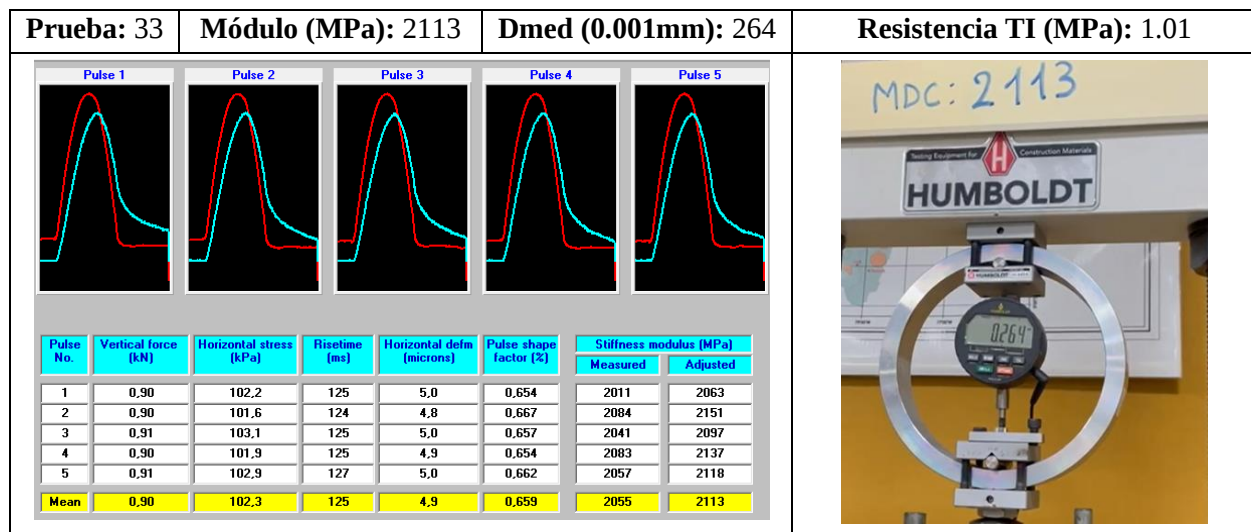
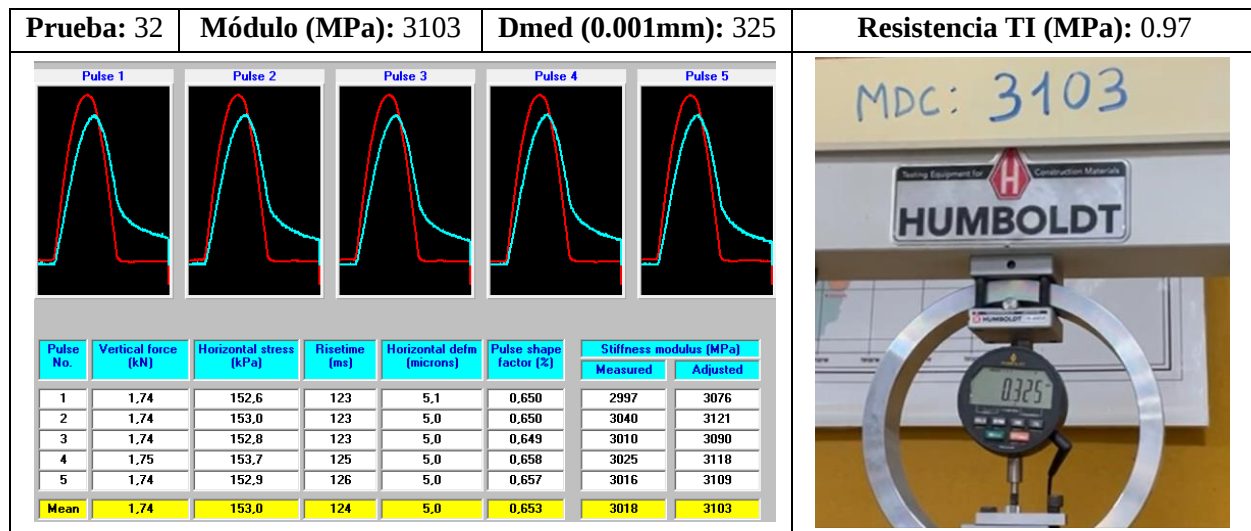
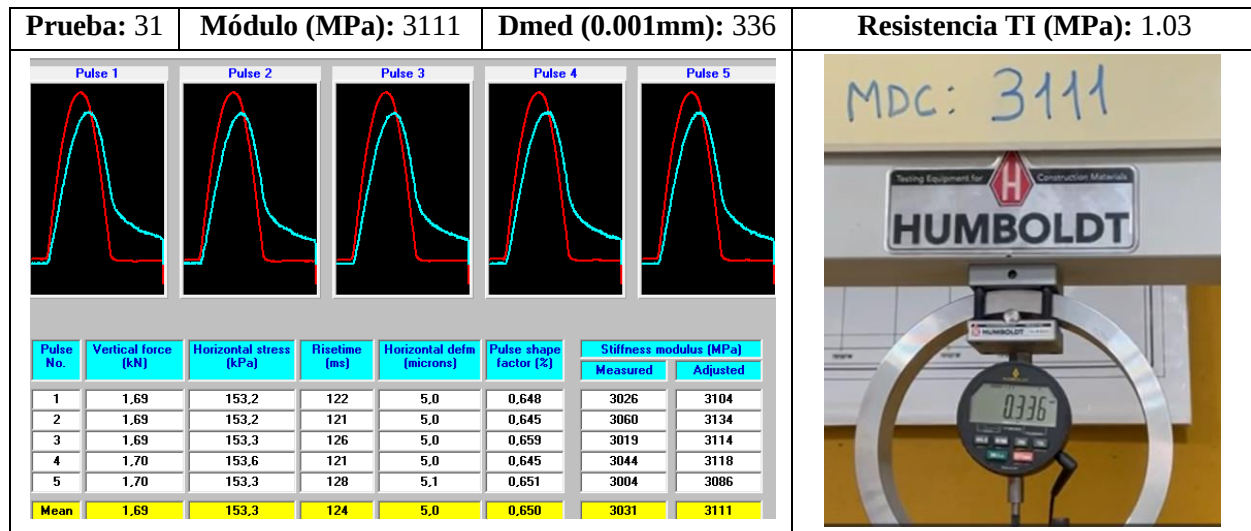


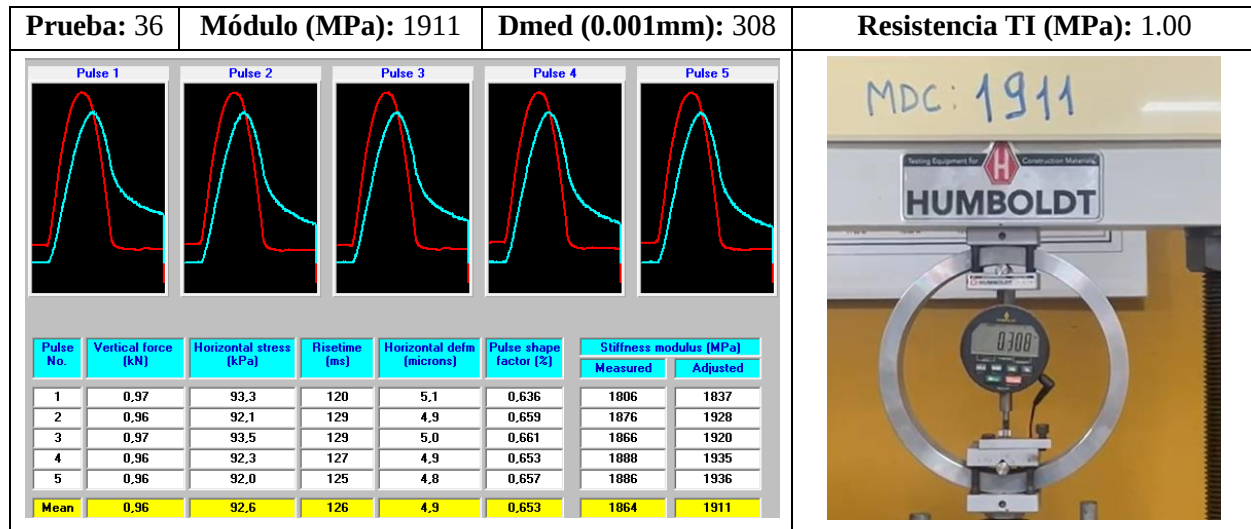
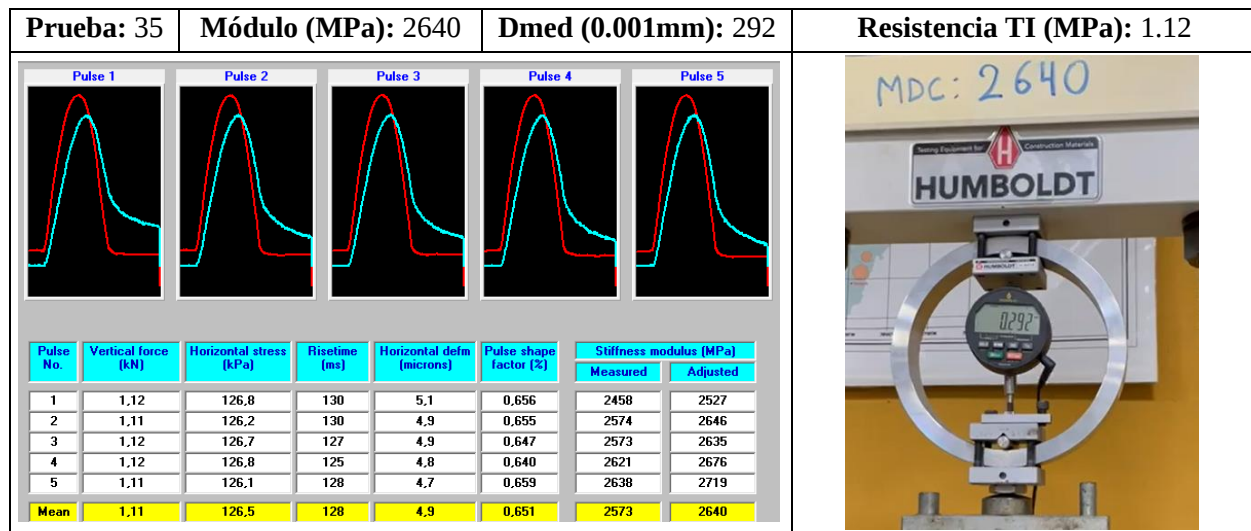
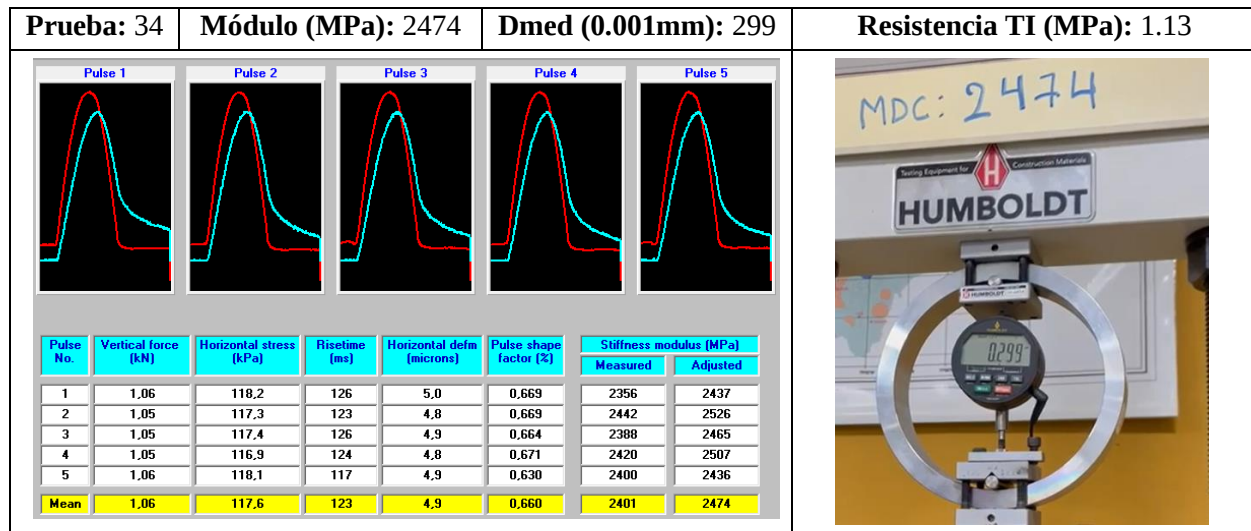


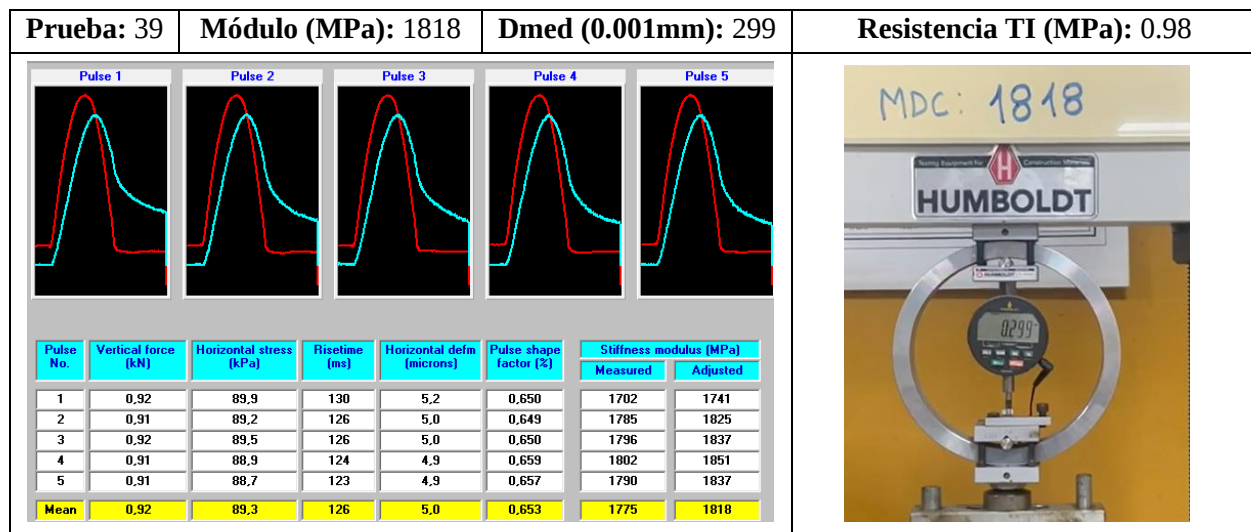
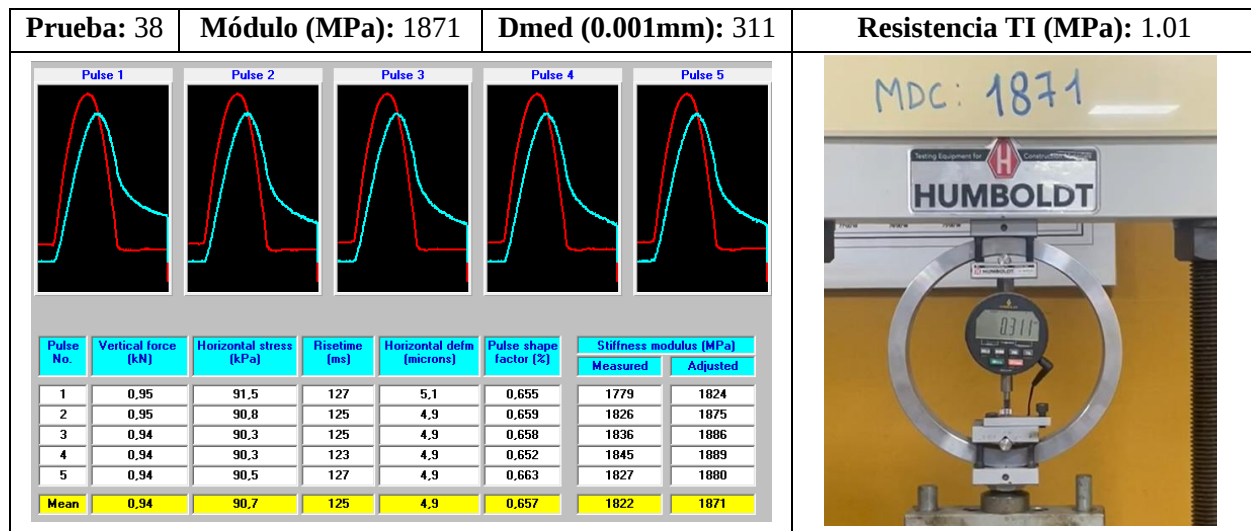
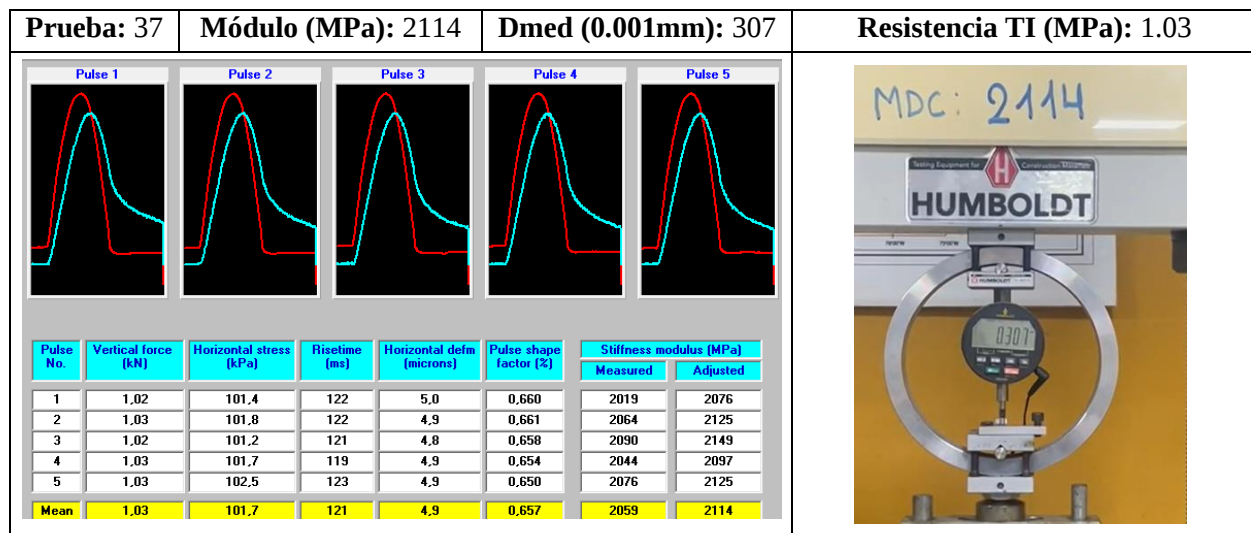


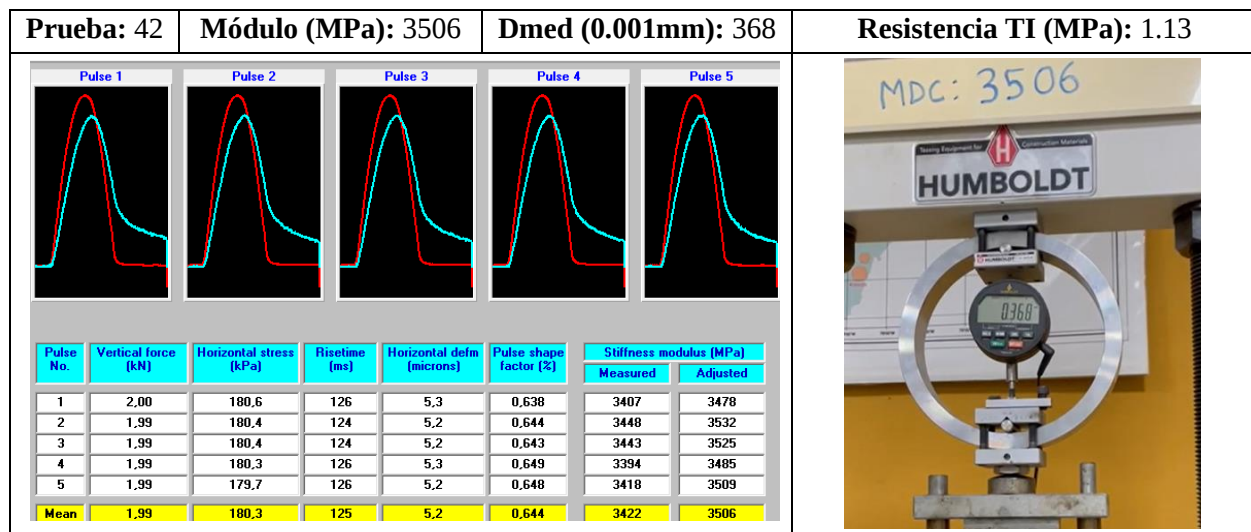
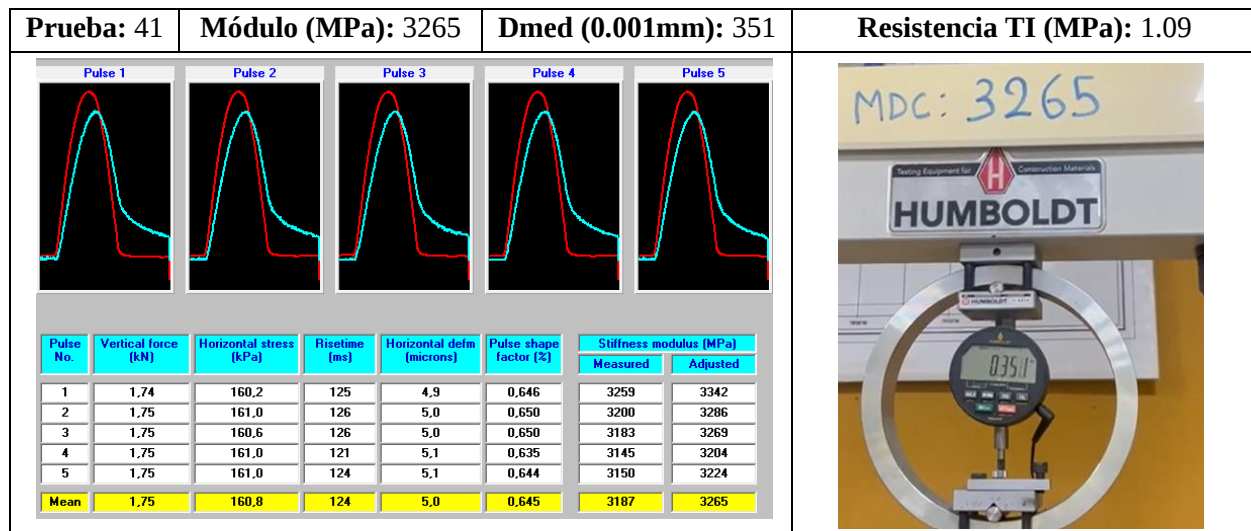
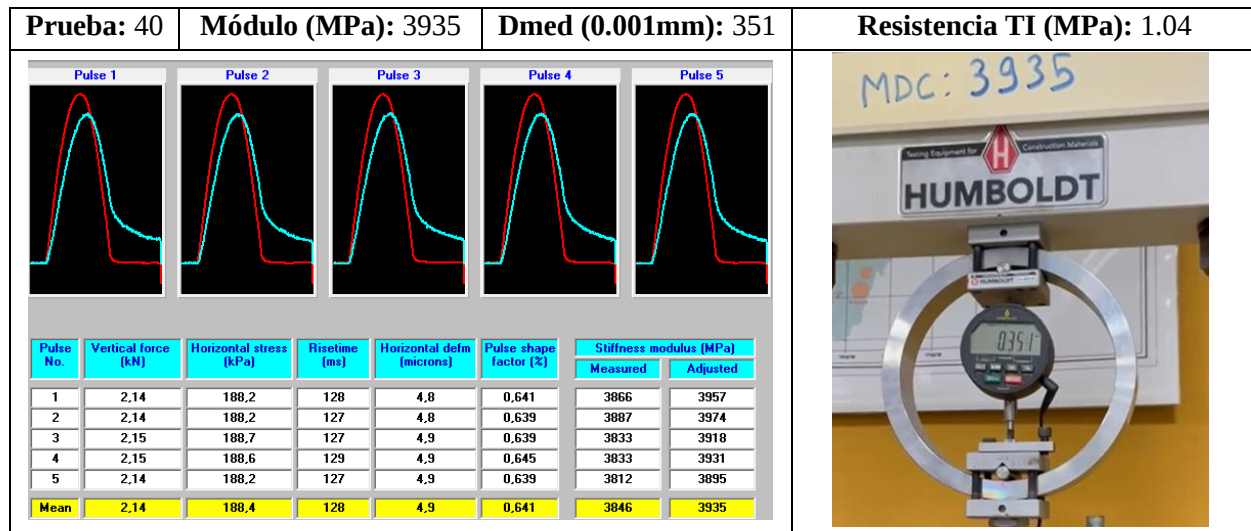


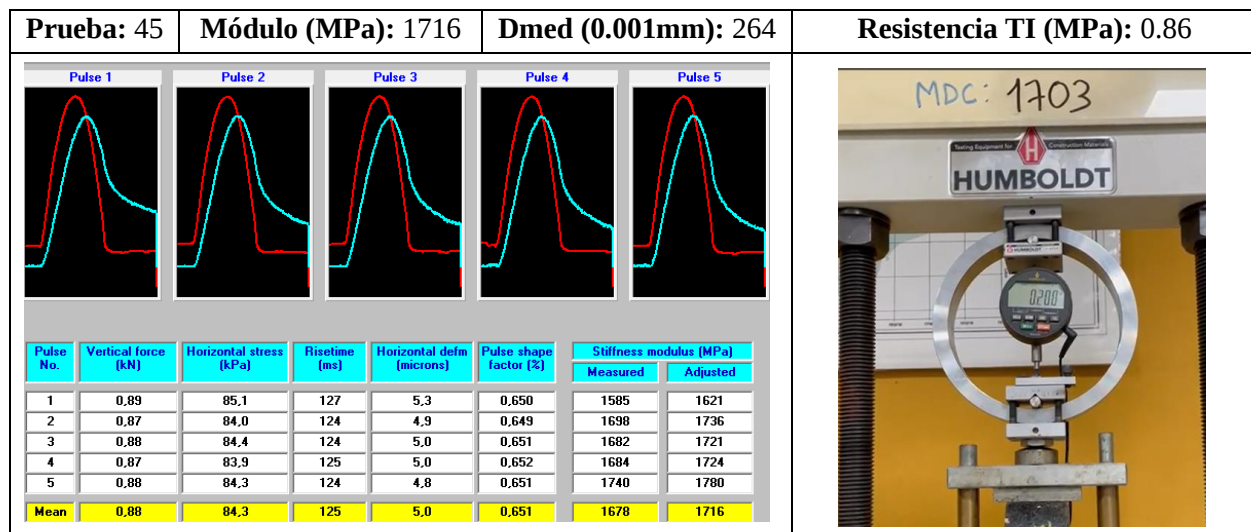
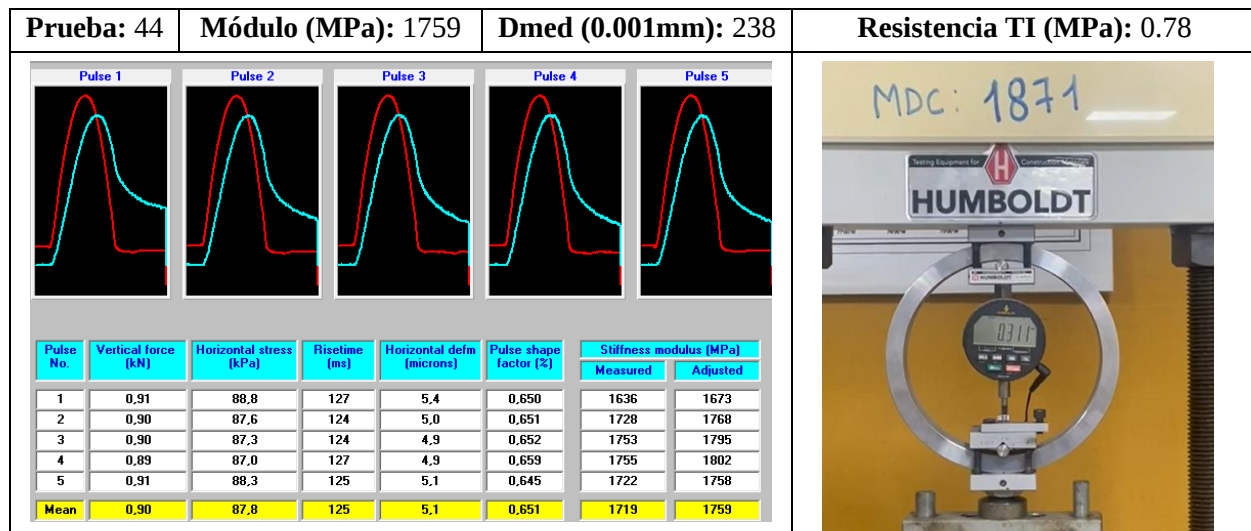
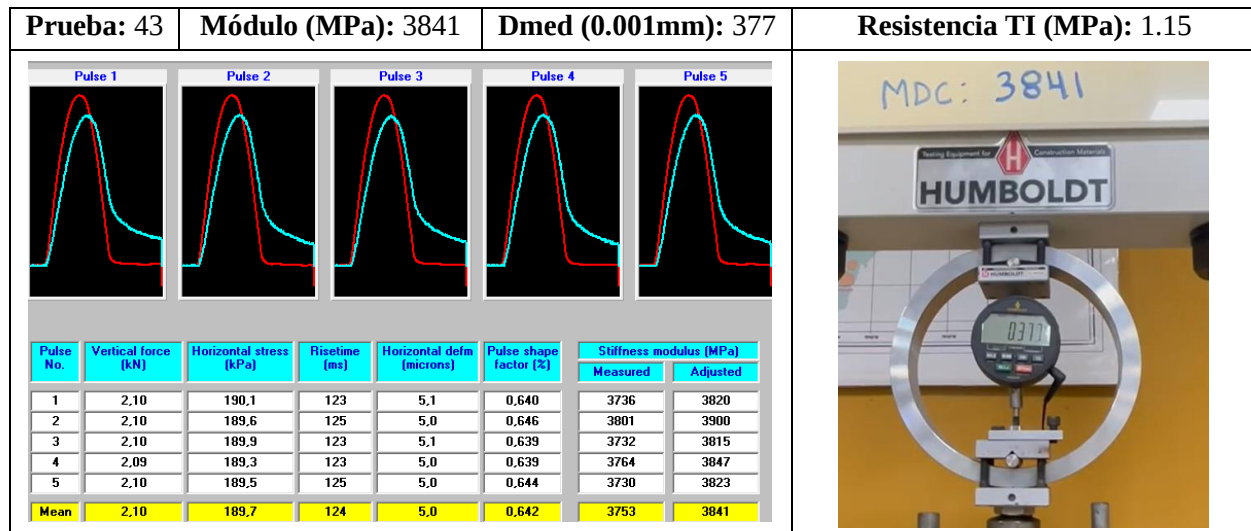


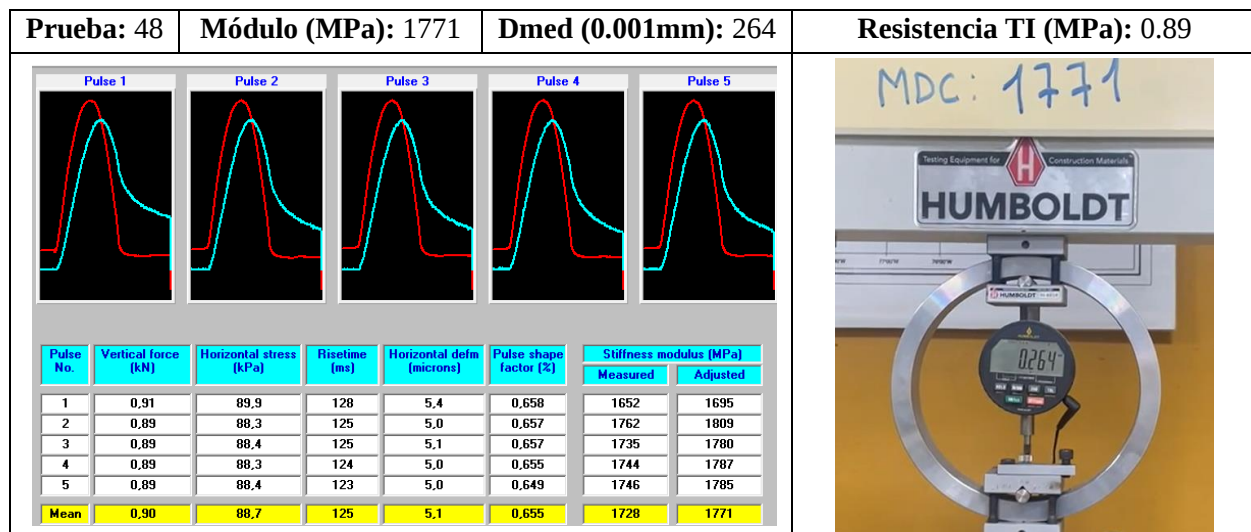
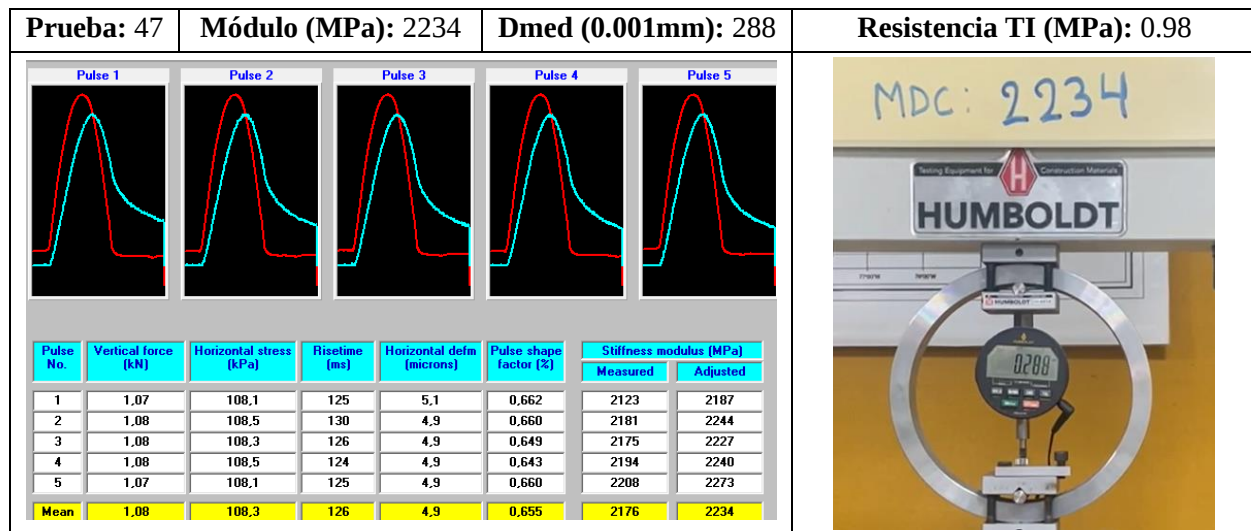
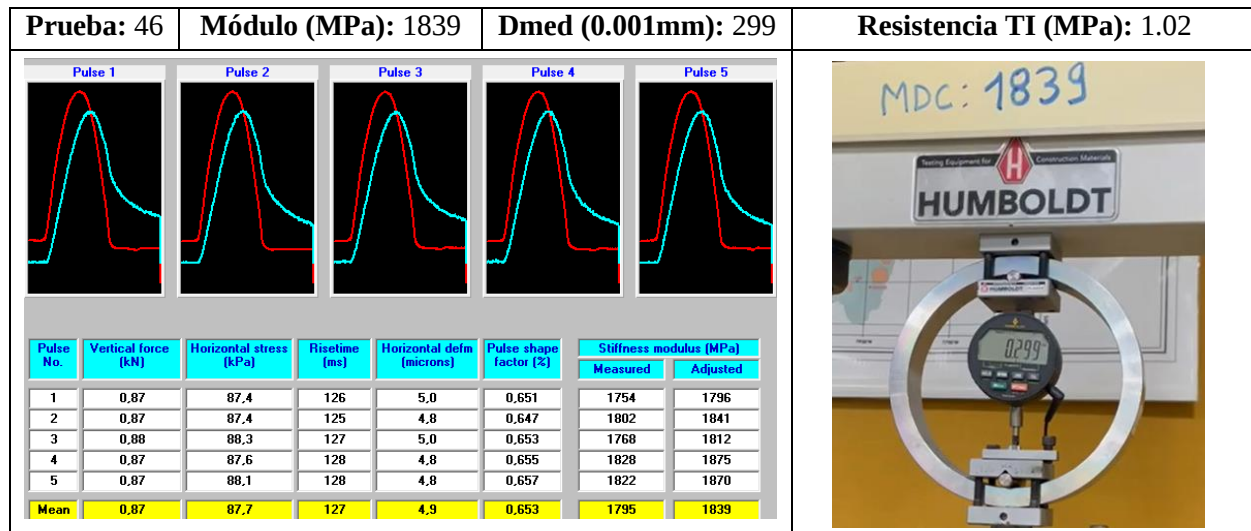


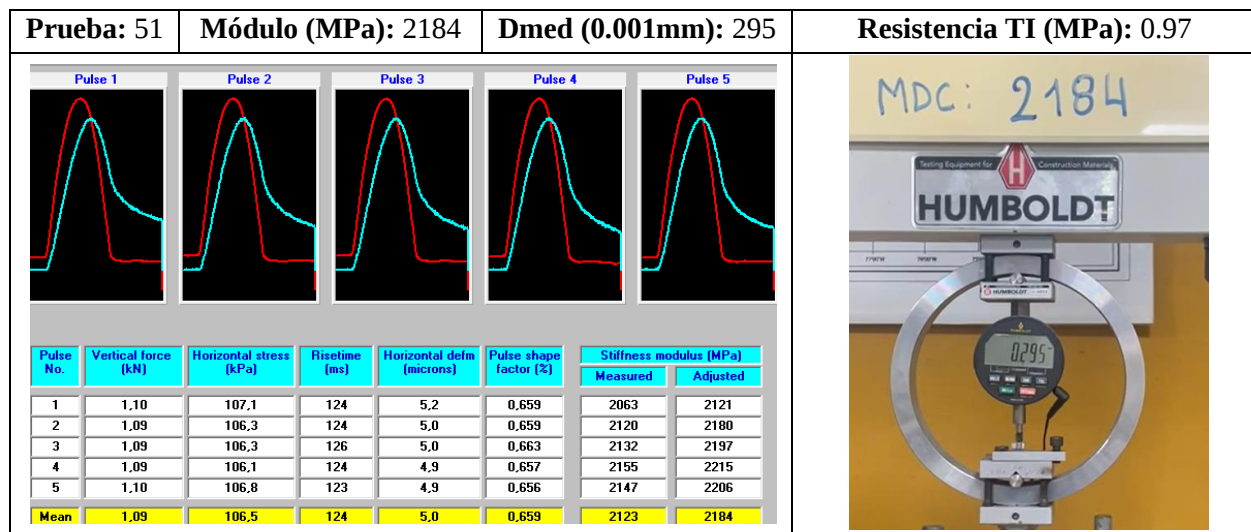
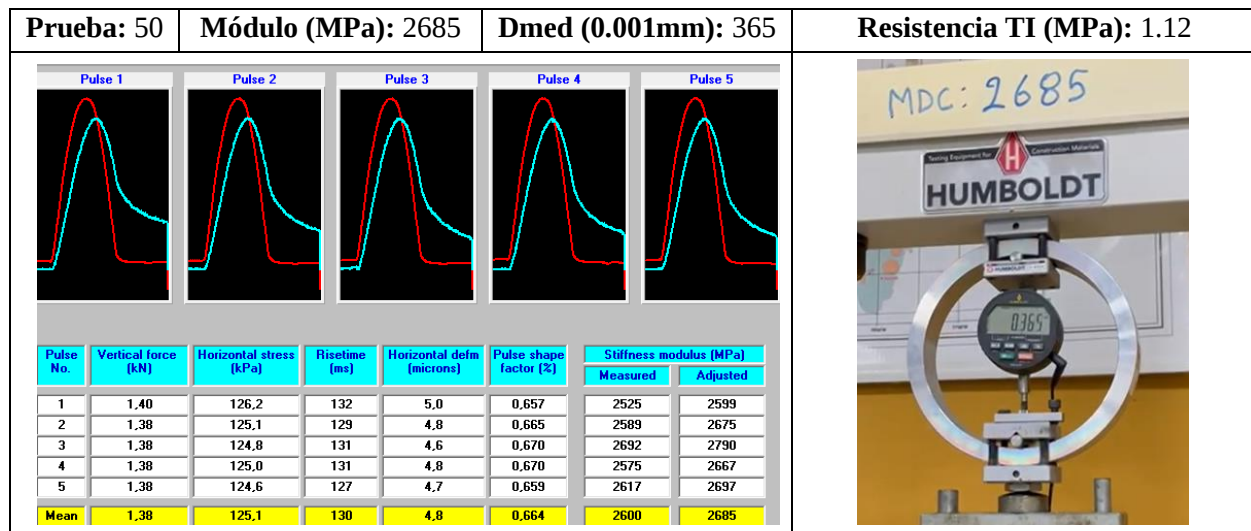
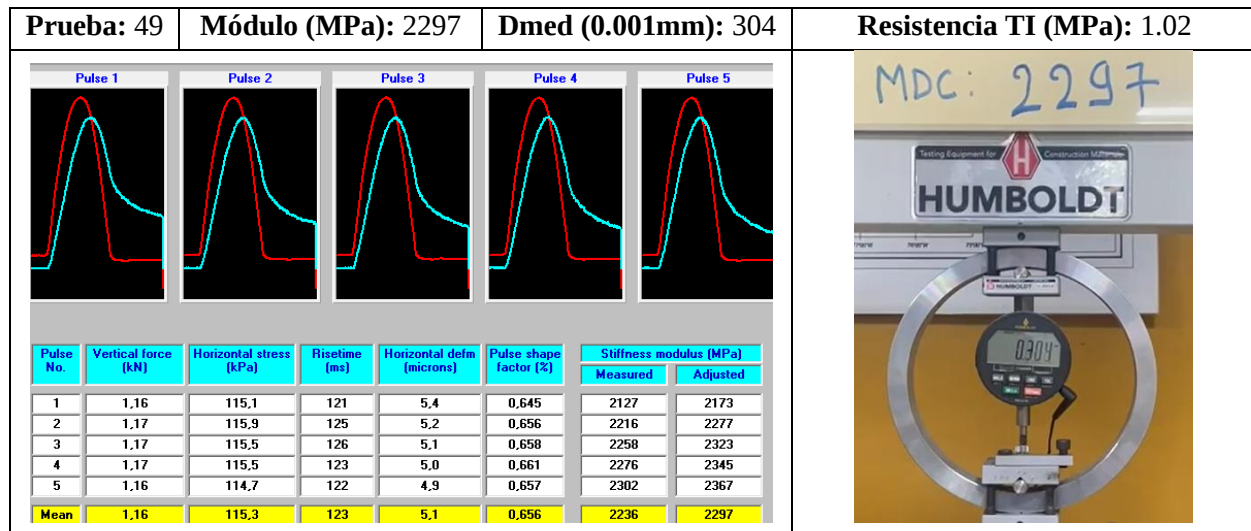








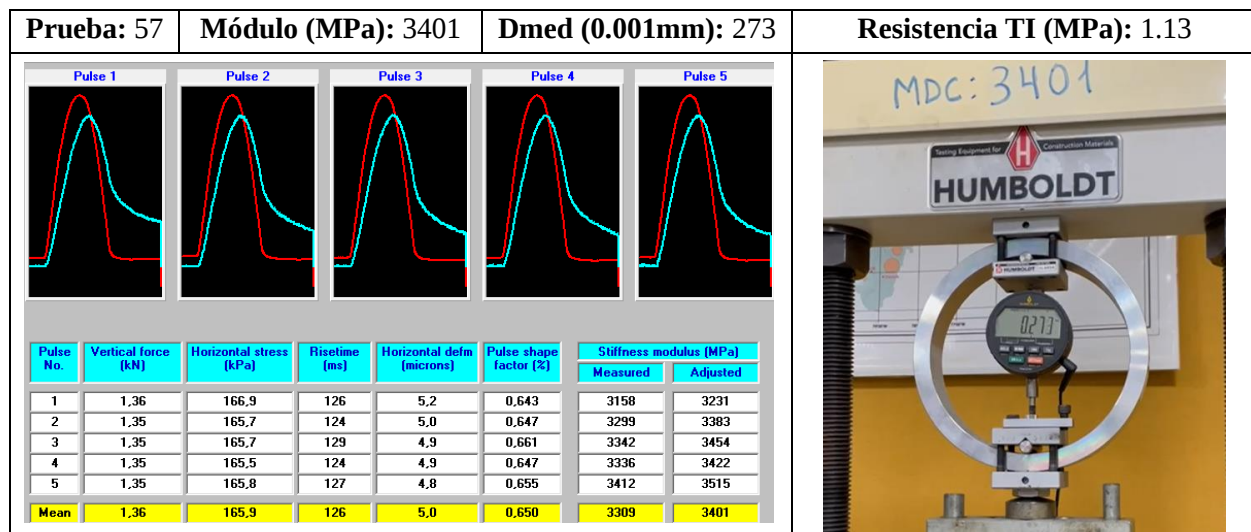
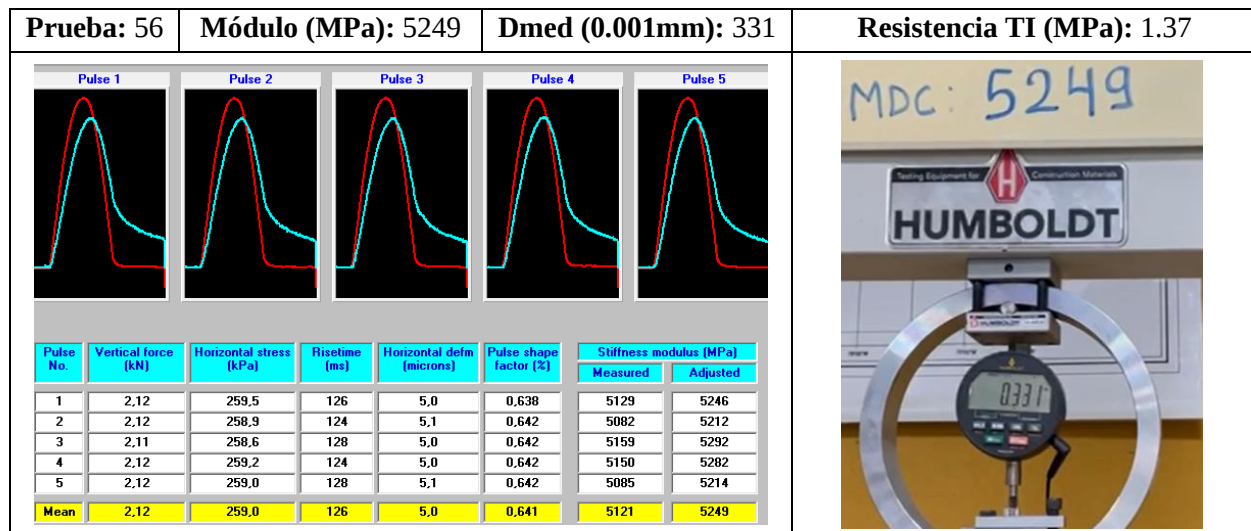
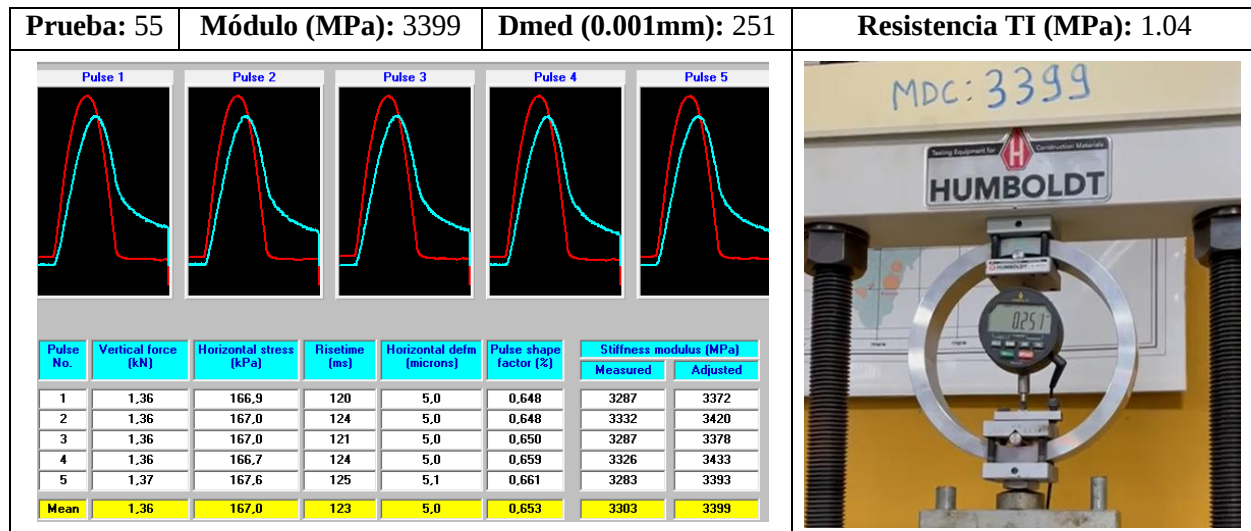


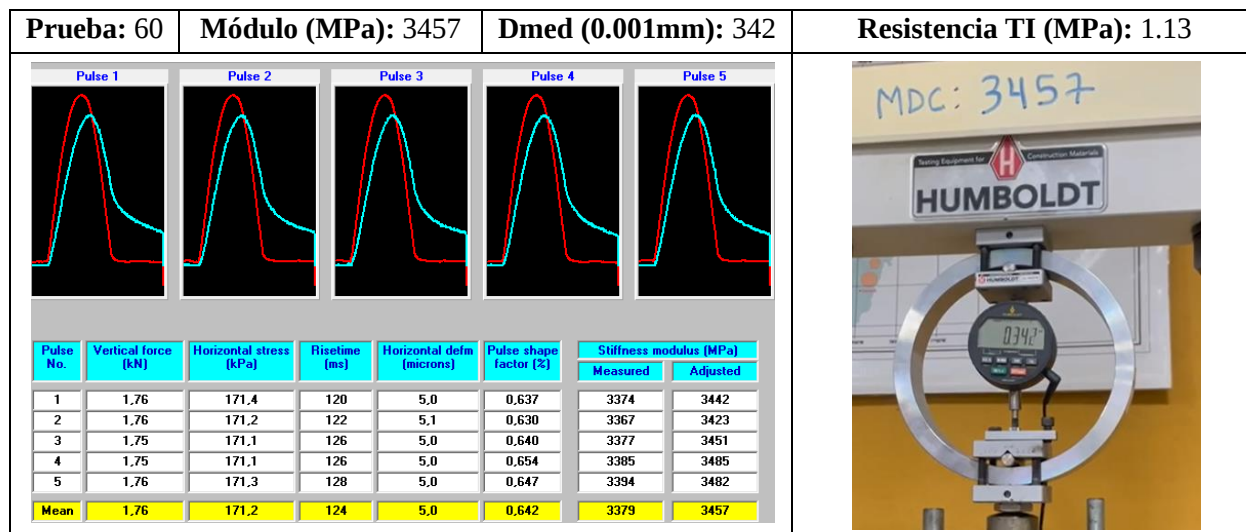
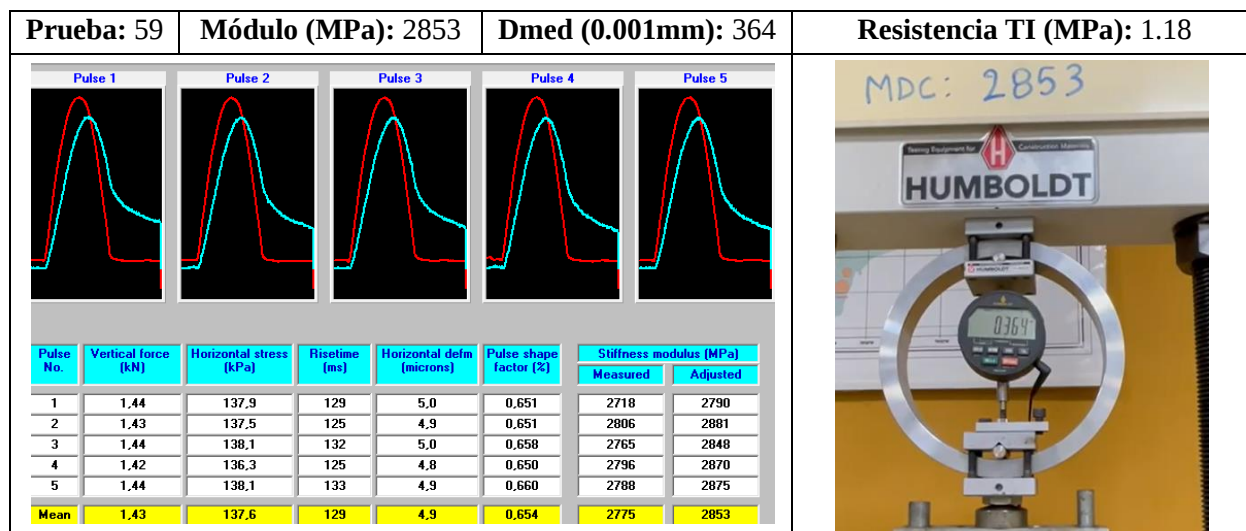
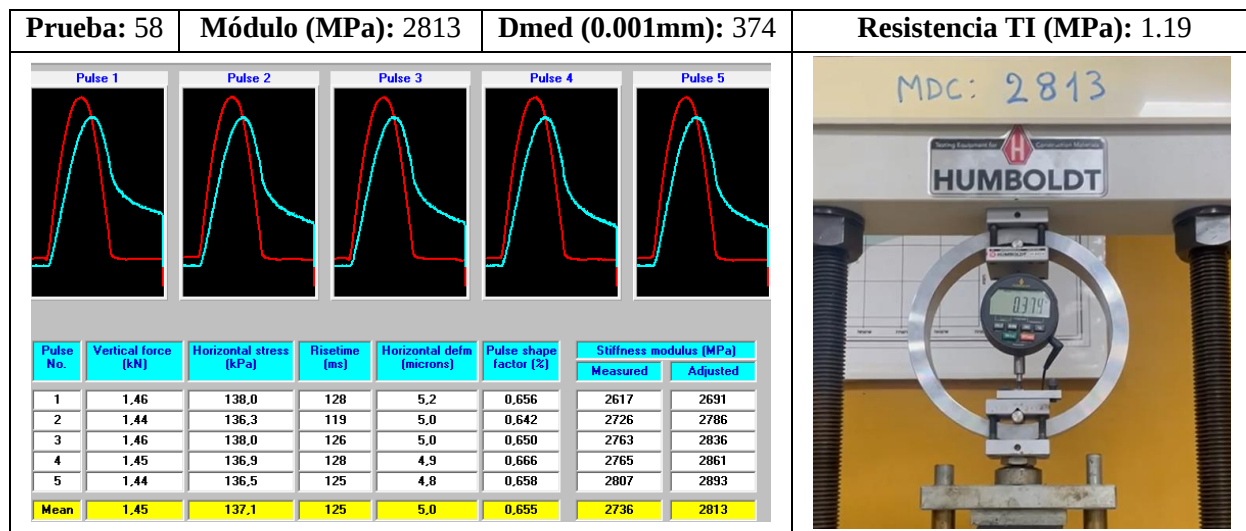


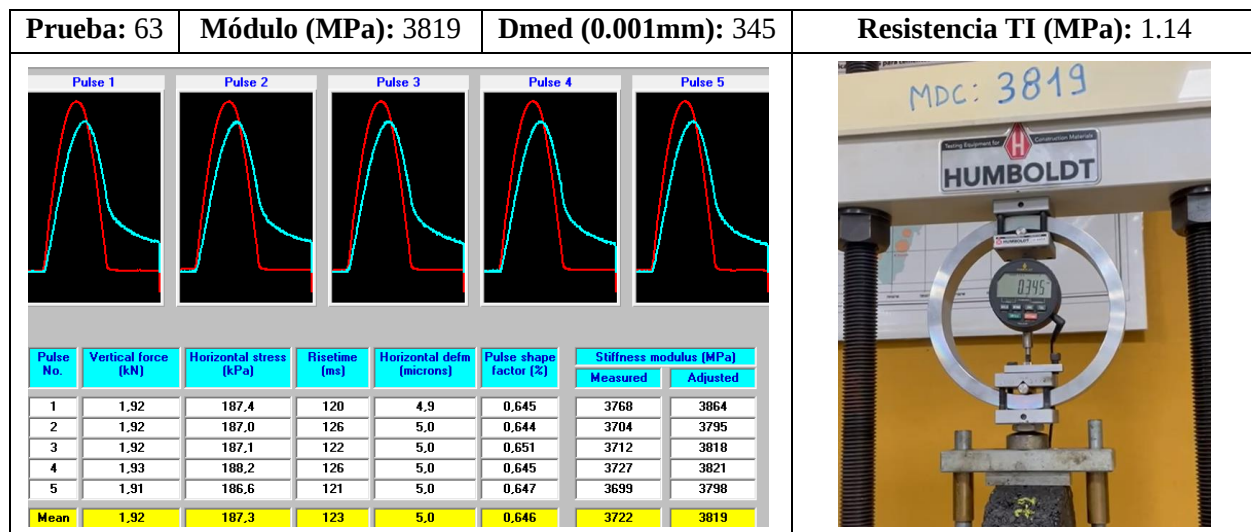
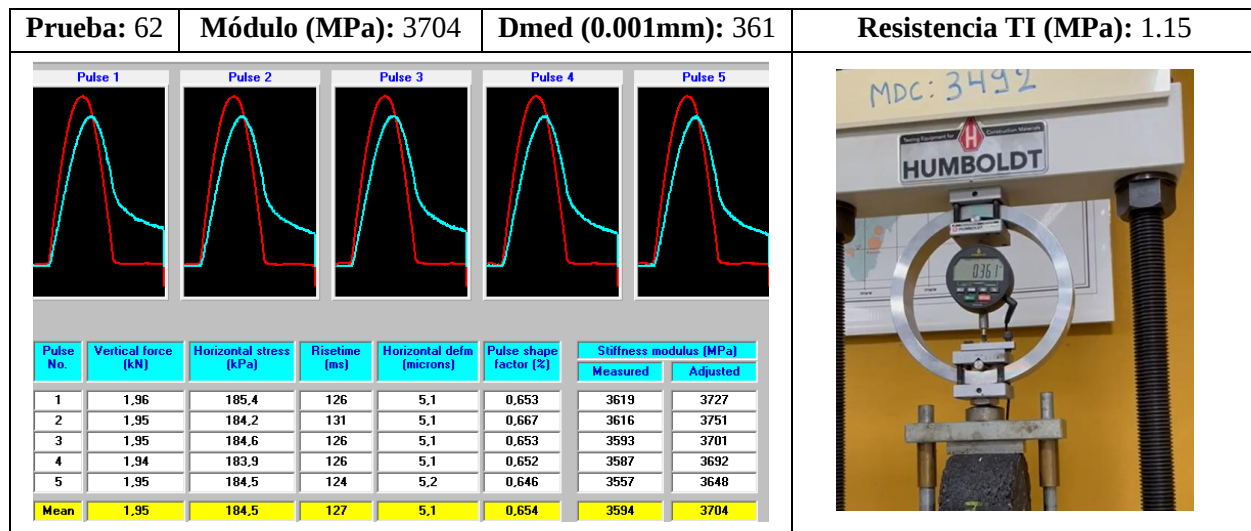
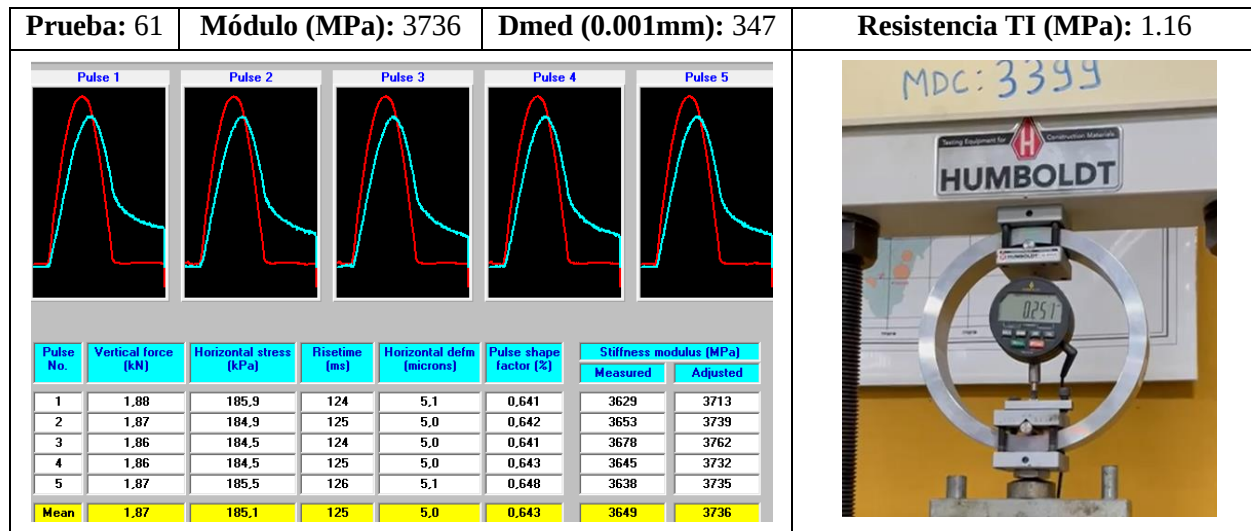
Prueba: 52	Módulo (MPa): 2471	Dmed (0.001mm): 232	Resistencia TI (MPa): 0.96																																																										
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5 <table><thead><tr><th rowspan="2">Pulse No.</th><th rowspan="2">Vertical force (kN)</th><th rowspan="2">Horizontal stress (kPa)</th><th rowspan="2">Risetime (ms)</th><th rowspan="2">Horizontal defm (microns)</th><th rowspan="2">Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>0.99</td><td>121.2</td><td>124</td><td>5.3</td><td>0.662</td><td>2294</td><td>2364</td></tr><tr><td>2</td><td>0.98</td><td>120.5</td><td>125</td><td>4.9</td><td>0.663</td><td>2430</td><td>2508</td></tr><tr><td>3</td><td>0.99</td><td>121.2</td><td>126</td><td>5.0</td><td>0.648</td><td>2417</td><td>2476</td></tr><tr><td>4</td><td>0.98</td><td>120.1</td><td>124</td><td>4.9</td><td>0.658</td><td>2421</td><td>2492</td></tr><tr><td>5</td><td>0.99</td><td>121.2</td><td>127</td><td>4.9</td><td>0.651</td><td>2452</td><td>2515</td></tr><tr><td>Mean</td><td>0.99</td><td>120.8</td><td>125</td><td>5.0</td><td>0.657</td><td>2403</td><td>2471</td></tr></tbody></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)		Measured	Adjusted	1	0.99	121.2	124	5.3	0.662	2294	2364	2	0.98	120.5	125	4.9	0.663	2430	2508	3	0.99	121.2	126	5.0	0.648	2417	2476	4	0.98	120.1	124	4.9	0.658	2421	2492	5	0.99	121.2	127	4.9	0.651	2452	2515	Mean	0.99	120.8	125	5.0	0.657	2403	2471	MDC: 2471 Spring Extension for Construction Materials HUMBOLDT 0.232
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)							Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																	
			Measured	Adjusted																																																									
1	0.99	121.2	124	5.3	0.662	2294	2364																																																						
2	0.98	120.5	125	4.9	0.663	2430	2508																																																						
3	0.99	121.2	126	5.0	0.648	2417	2476																																																						
4	0.98	120.1	124	4.9	0.658	2421	2492																																																						
5	0.99	121.2	127	4.9	0.651	2452	2515																																																						
Mean	0.99	120.8	125	5.0	0.657	2403	2471																																																						

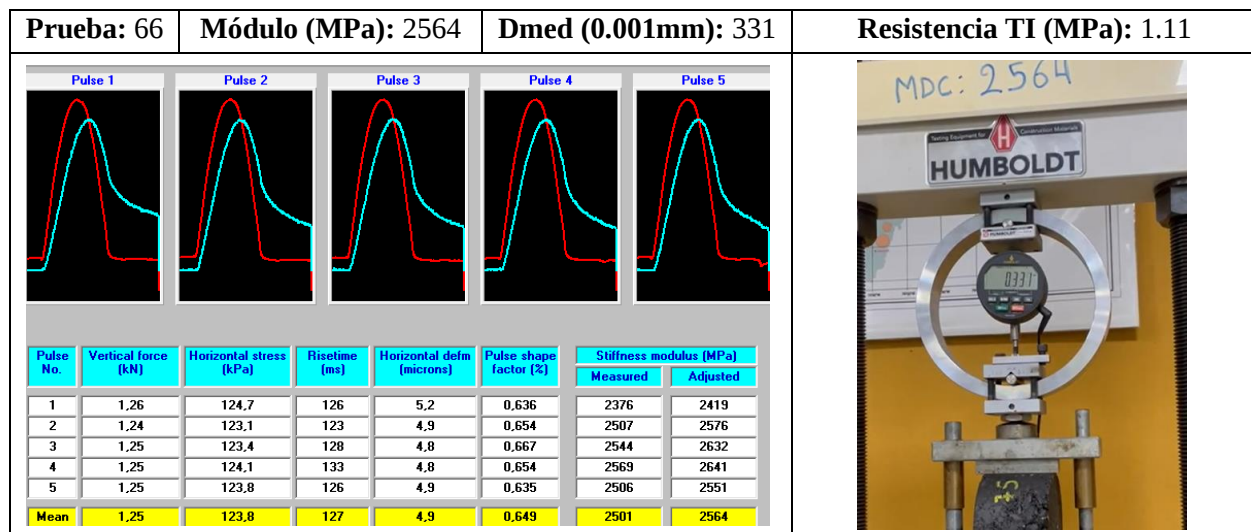
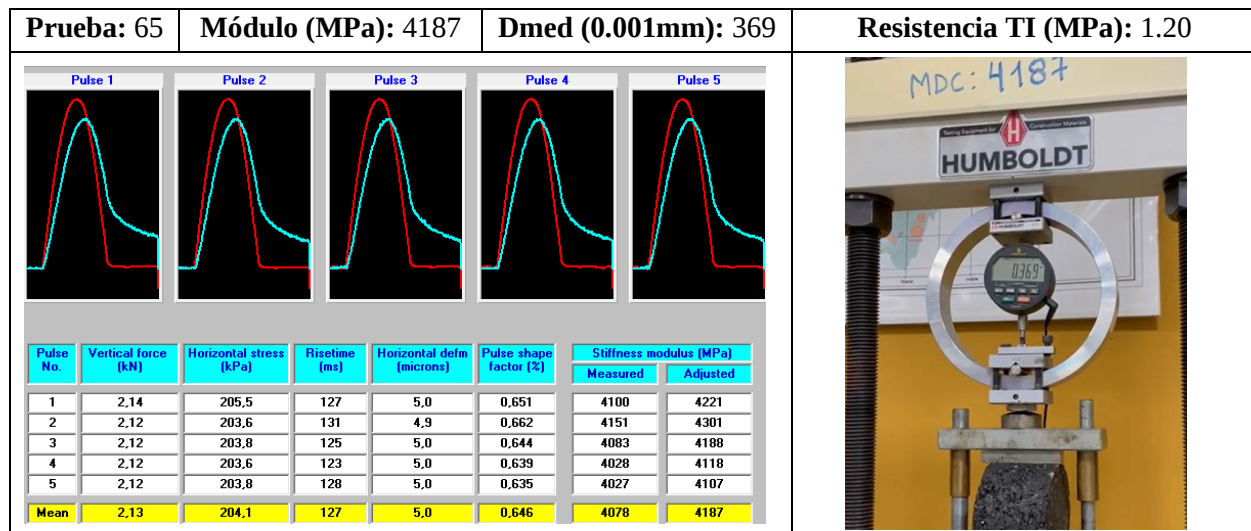
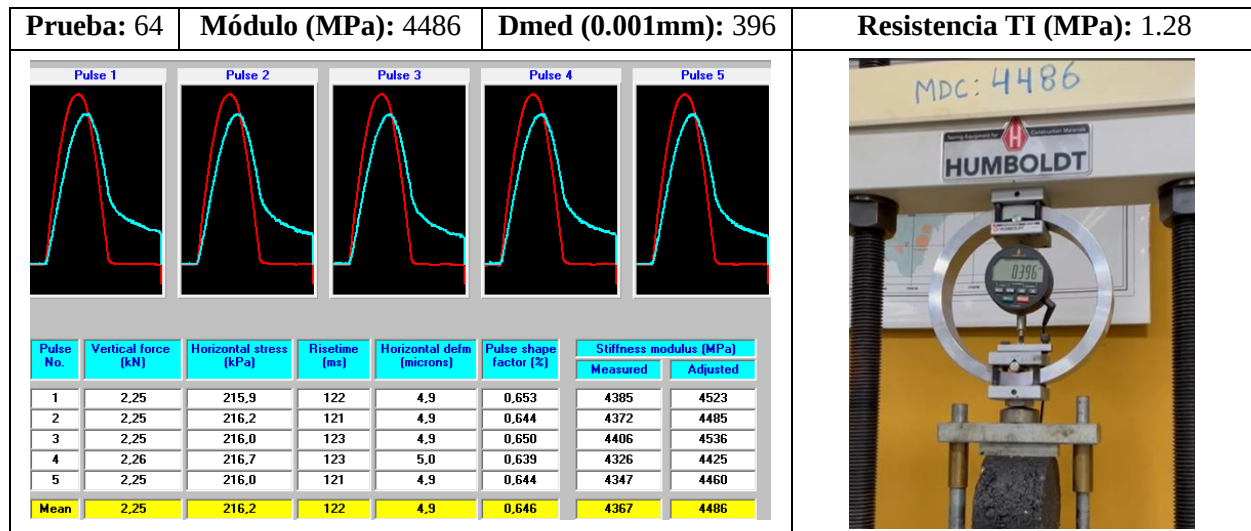
Prueba: 53	Módulo (MPa): 2389	Dmed (0.001mm): 260	Resistencia TI (MPa): 1.04																																																										
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5			MDC: 2389 Testing Equipment for Construction Materials HUMBOLDT 0.260																																																										
<table><tr><th rowspan="2">Pulse No.</th><th rowspan="2">Vertical force (kN)</th><th rowspan="2">Horizontal stress (kPa)</th><th rowspan="2">Risetime (ms)</th><th rowspan="2">Horizontal defm (microns)</th><th rowspan="2">Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr><tr><td>1</td><td>1.01</td><td>119.0</td><td>121</td><td>5.3</td><td>0.650</td><td>2251</td><td>2307</td></tr><tr><td>2</td><td>1.01</td><td>118.6</td><td>127</td><td>5.1</td><td>0.664</td><td>2318</td><td>2392</td></tr><tr><td>3</td><td>1.00</td><td>118.3</td><td>122</td><td>5.0</td><td>0.650</td><td>2359</td><td>2418</td></tr><tr><td>4</td><td>1.00</td><td>117.9</td><td>123</td><td>5.0</td><td>0.652</td><td>2355</td><td>2416</td></tr><tr><td>5</td><td>1.00</td><td>117.7</td><td>124</td><td>5.0</td><td>0.655</td><td>2349</td><td>2414</td></tr><tr><td>Mean</td><td>1.00</td><td>118.3</td><td>123</td><td>5.1</td><td>0.654</td><td>2326</td><td>2389</td></tr></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)		Measured	Adjusted	1	1.01	119.0	121	5.3	0.650	2251	2307	2	1.01	118.6	127	5.1	0.664	2318	2392	3	1.00	118.3	122	5.0	0.650	2359	2418	4	1.00	117.9	123	5.0	0.652	2355	2416	5	1.00	117.7	124	5.0	0.655	2349	2414	Mean	1.00	118.3	123	5.1	0.654	2326	2389	
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)							Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																	
			Measured	Adjusted																																																									
1	1.01	119.0	121	5.3	0.650	2251	2307																																																						
2	1.01	118.6	127	5.1	0.664	2318	2392																																																						
3	1.00	118.3	122	5.0	0.650	2359	2418																																																						
4	1.00	117.9	123	5.0	0.652	2355	2416																																																						
5	1.00	117.7	124	5.0	0.655	2349	2414																																																						
Mean	1.00	118.3	123	5.1	0.654	2326	2389																																																						

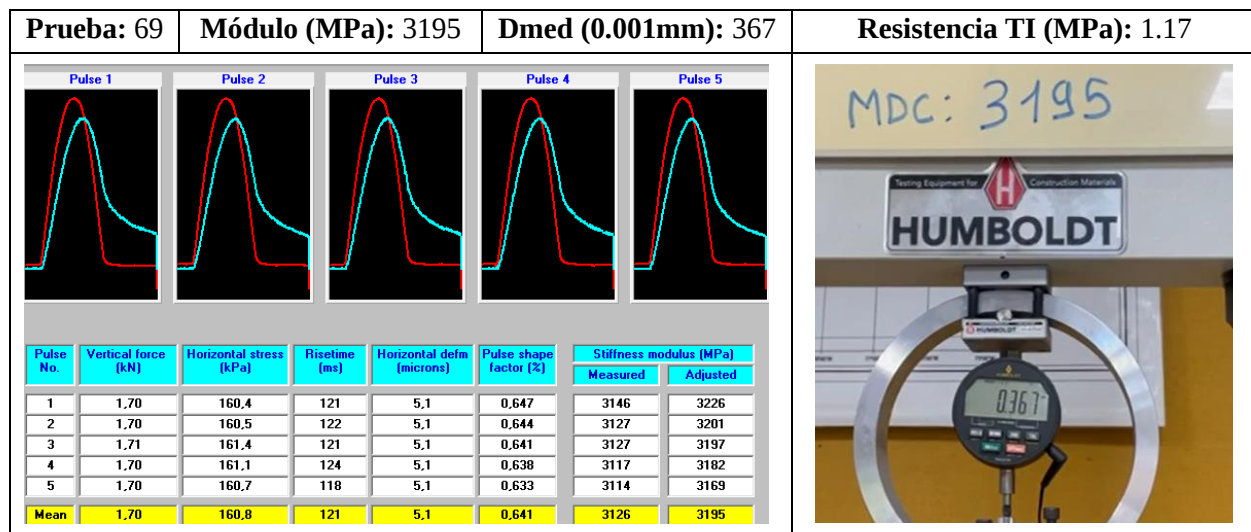
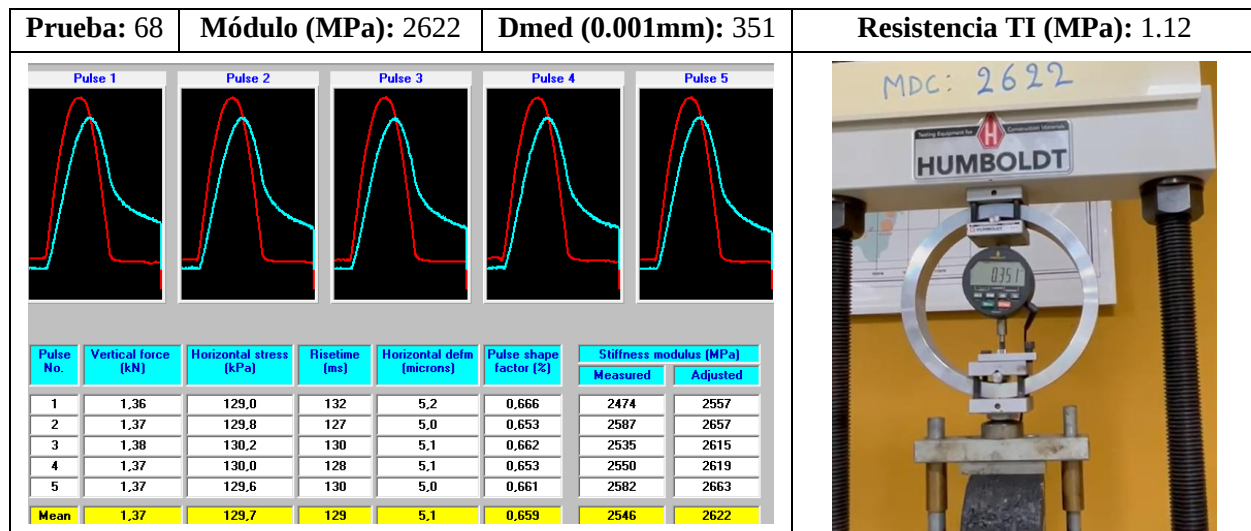
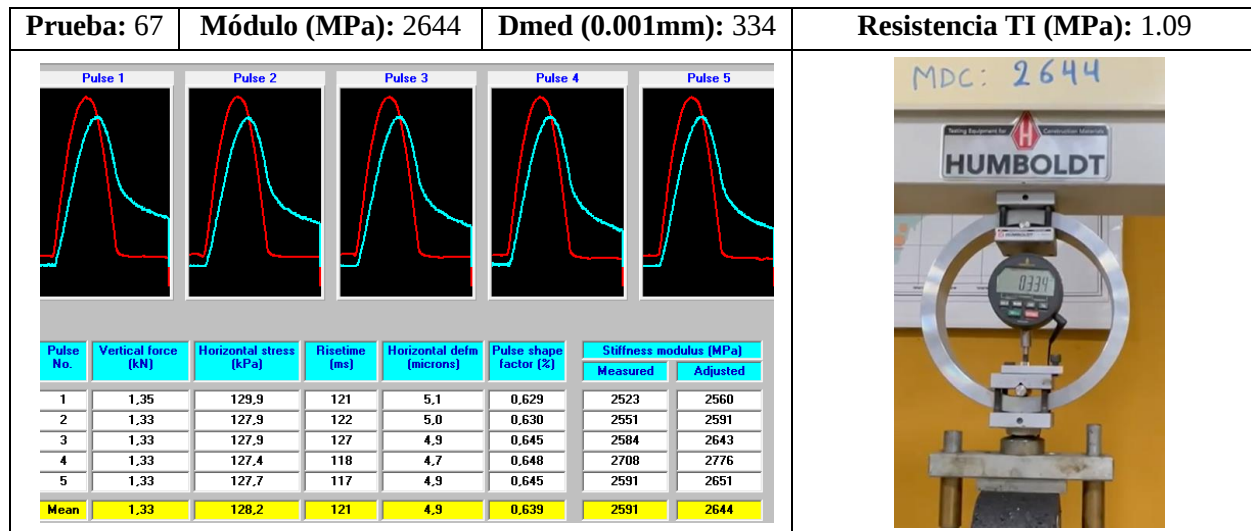
Prueba: 54	Módulo (MPa): 3099	Dmed (0.001mm): 234	Resistencia TI (MPa): 0.97																																																										
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5 <table><thead><tr><th rowspan="2">Pulse No.</th><th rowspan="2">Vertical force (kN)</th><th rowspan="2">Horizontal stress (kPa)</th><th rowspan="2">Risetime (ms)</th><th rowspan="2">Horizontal defm (microns)</th><th rowspan="2">Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>1.24</td><td>151.9</td><td>125</td><td>5.0</td><td>0.668</td><td>2989</td><td>3099</td></tr><tr><td>2</td><td>1.25</td><td>153.5</td><td>128</td><td>5.1</td><td>0.651</td><td>2994</td><td>3076</td></tr><tr><td>3</td><td>1.25</td><td>152.7</td><td>122</td><td>5.1</td><td>0.661</td><td>2993</td><td>3091</td></tr><tr><td>4</td><td>1.24</td><td>151.8</td><td>120</td><td>5.0</td><td>0.655</td><td>3019</td><td>3107</td></tr><tr><td>5</td><td>1.25</td><td>152.5</td><td>124</td><td>5.0</td><td>0.666</td><td>3016</td><td>3122</td></tr><tr><td>Mean</td><td>1.25</td><td>152.5</td><td>124</td><td>5.0</td><td>0.660</td><td>3002</td><td>3099</td></tr></tbody></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)		Measured	Adjusted	1	1.24	151.9	125	5.0	0.668	2989	3099	2	1.25	153.5	128	5.1	0.651	2994	3076	3	1.25	152.7	122	5.1	0.661	2993	3091	4	1.24	151.8	120	5.0	0.655	3019	3107	5	1.25	152.5	124	5.0	0.666	3016	3122	Mean	1.25	152.5	124	5.0	0.660	3002	3099	MDC: 3099 Testing Equipment for Construction Materials HUMBOLDT 0.234
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)							Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																	
			Measured	Adjusted																																																									
1	1.24	151.9	125	5.0	0.668	2989	3099																																																						
2	1.25	153.5	128	5.1	0.651	2994	3076																																																						
3	1.25	152.7	122	5.1	0.661	2993	3091																																																						
4	1.24	151.8	120	5.0	0.655	3019	3107																																																						
5	1.25	152.5	124	5.0	0.666	3016	3122																																																						
Mean	1.25	152.5	124	5.0	0.660	3002	3099																																																						

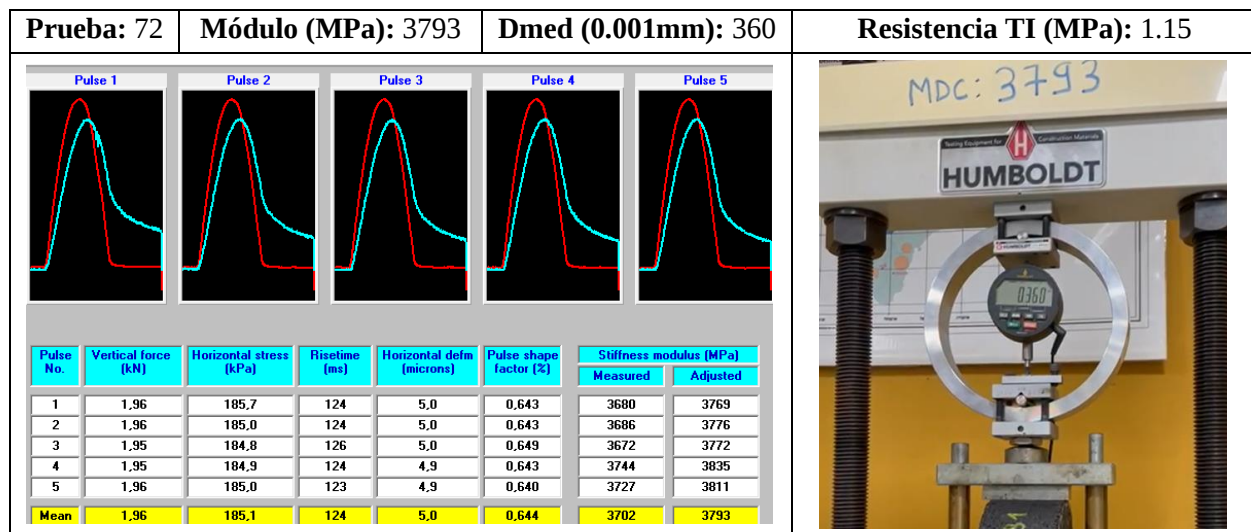
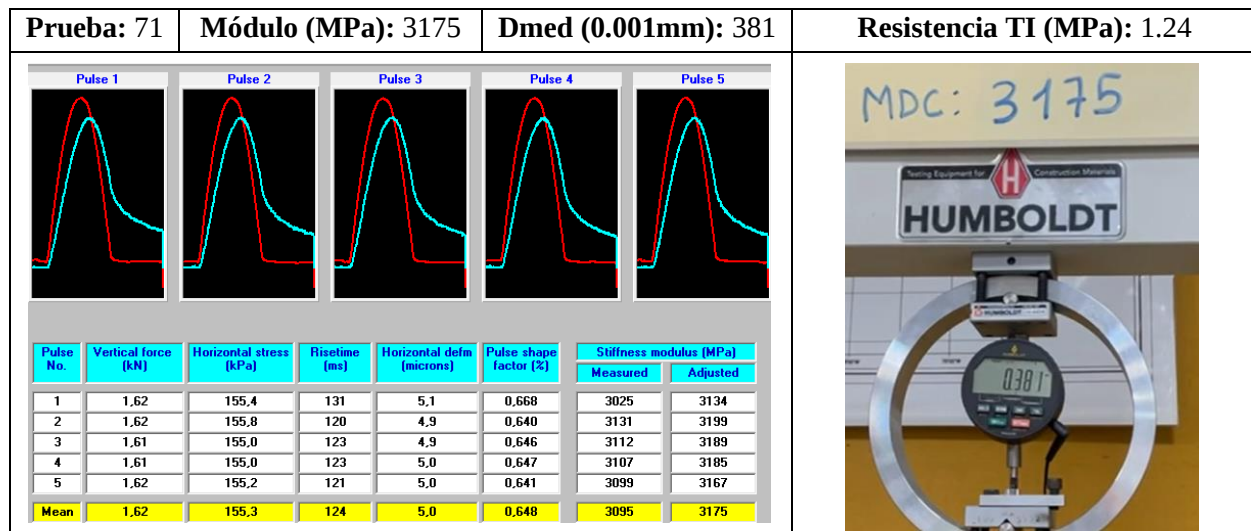
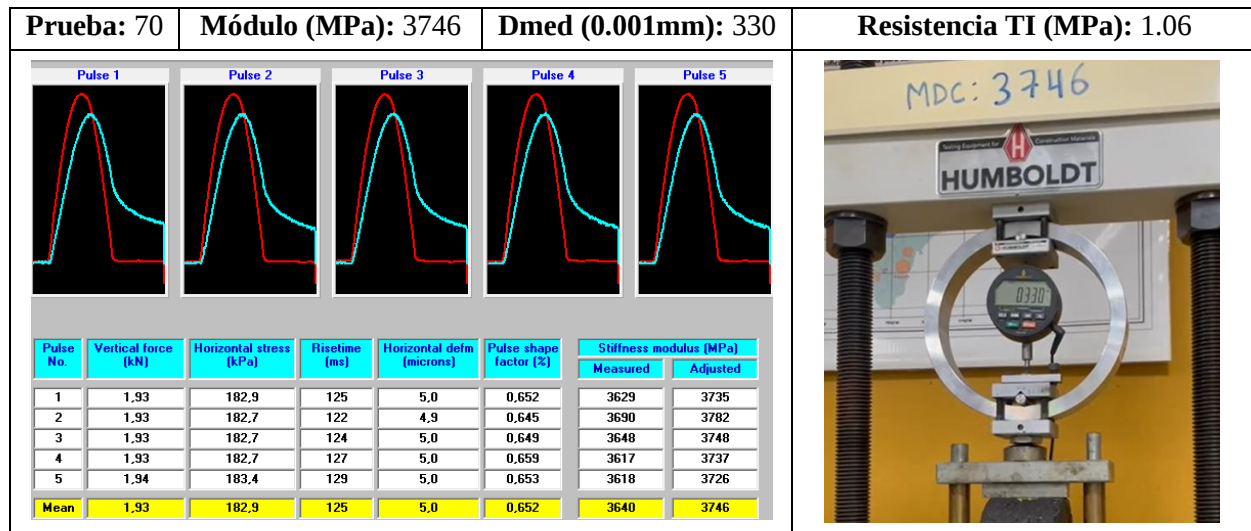


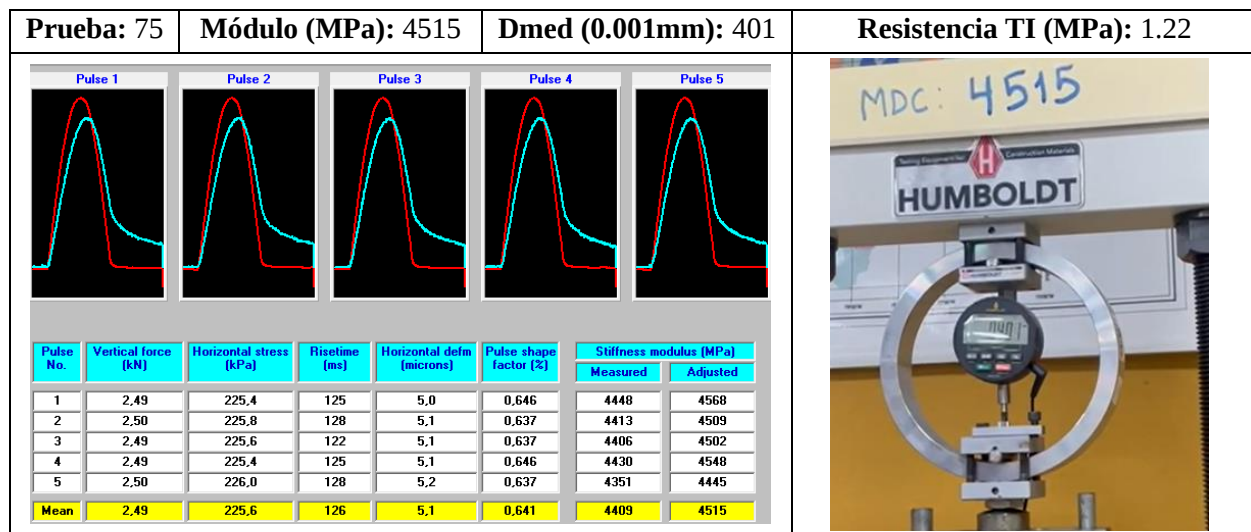
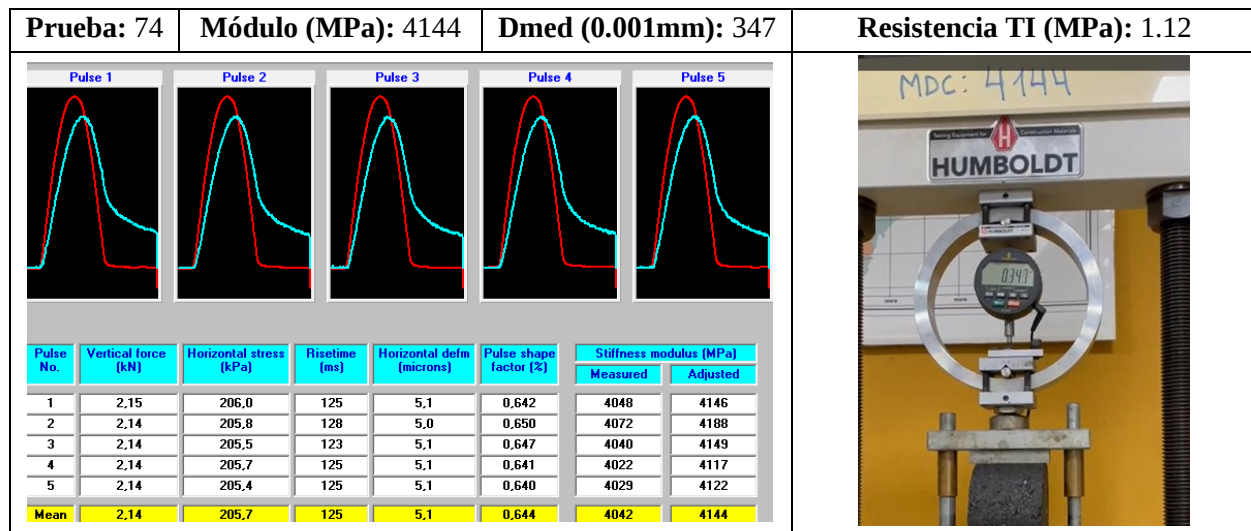
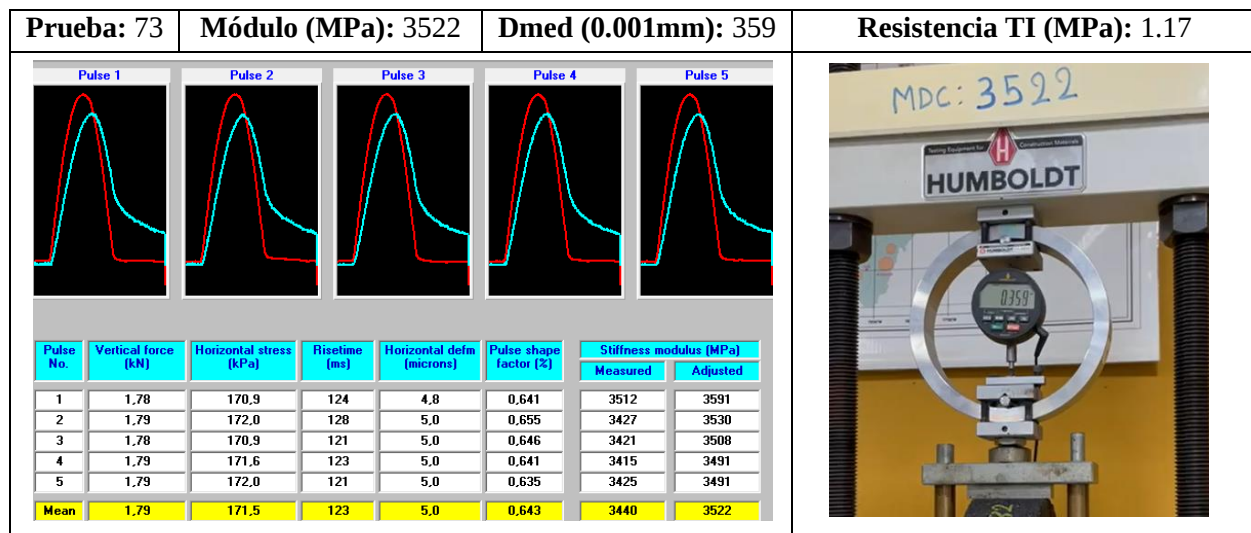


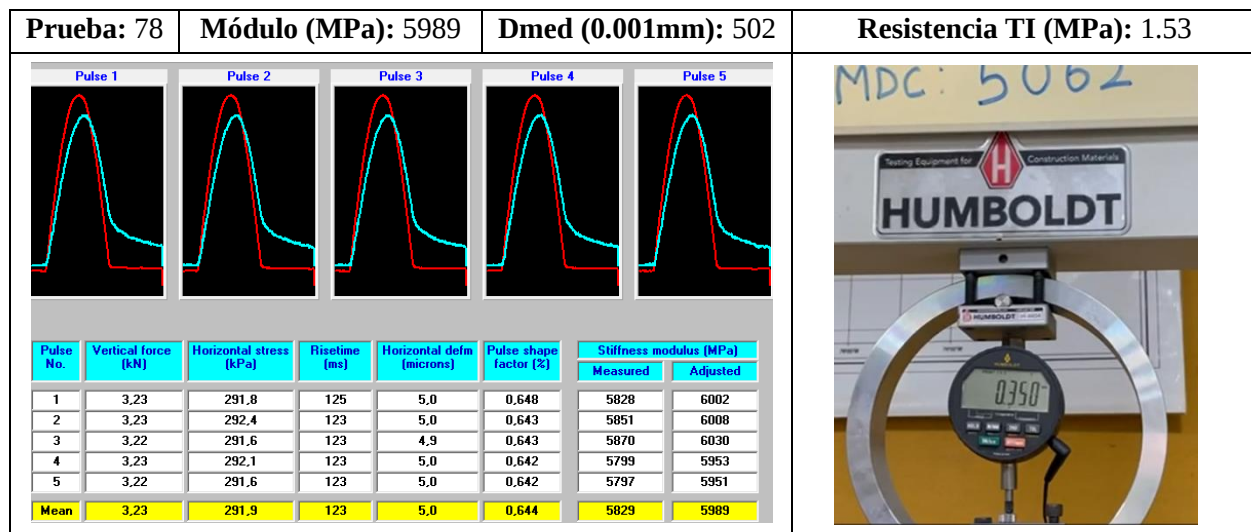
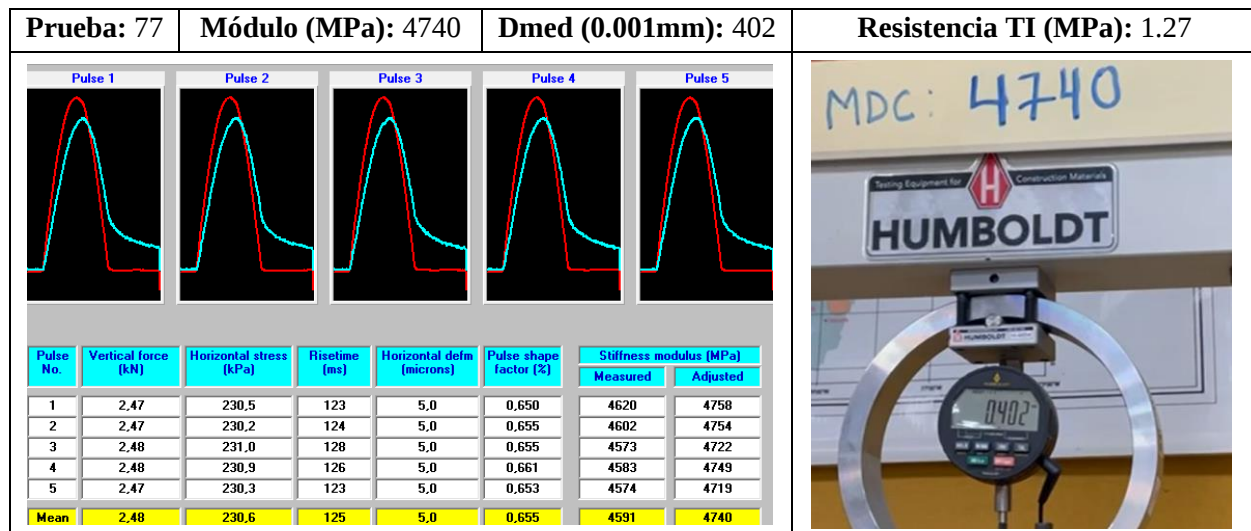
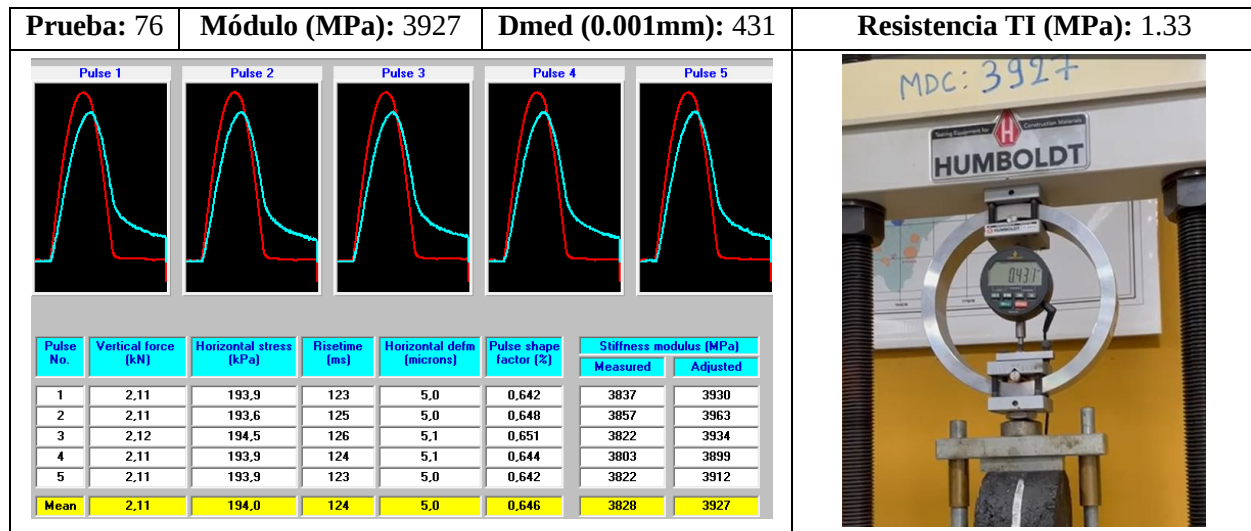


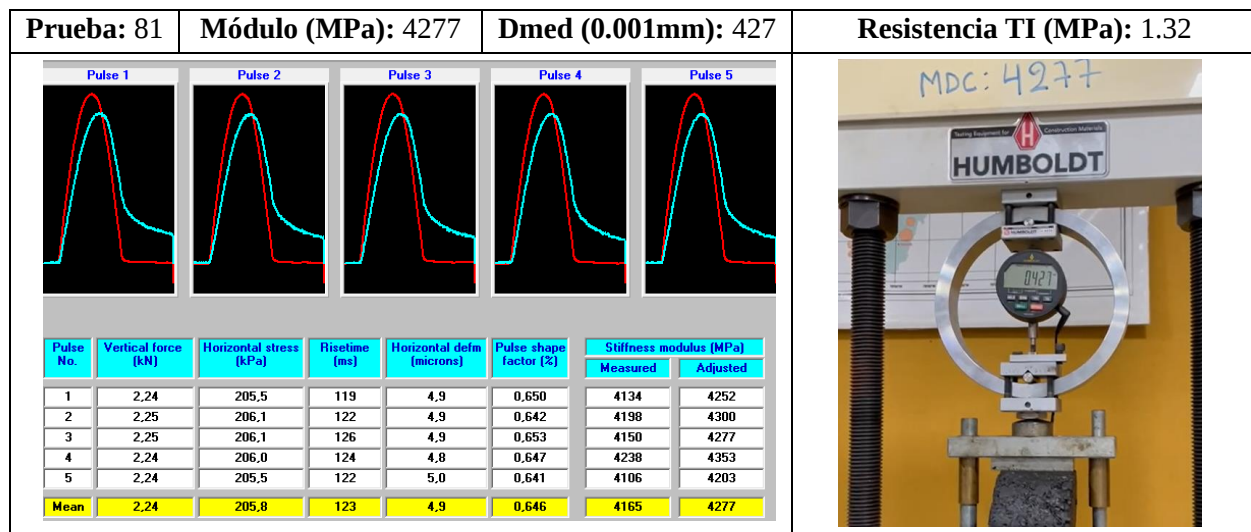
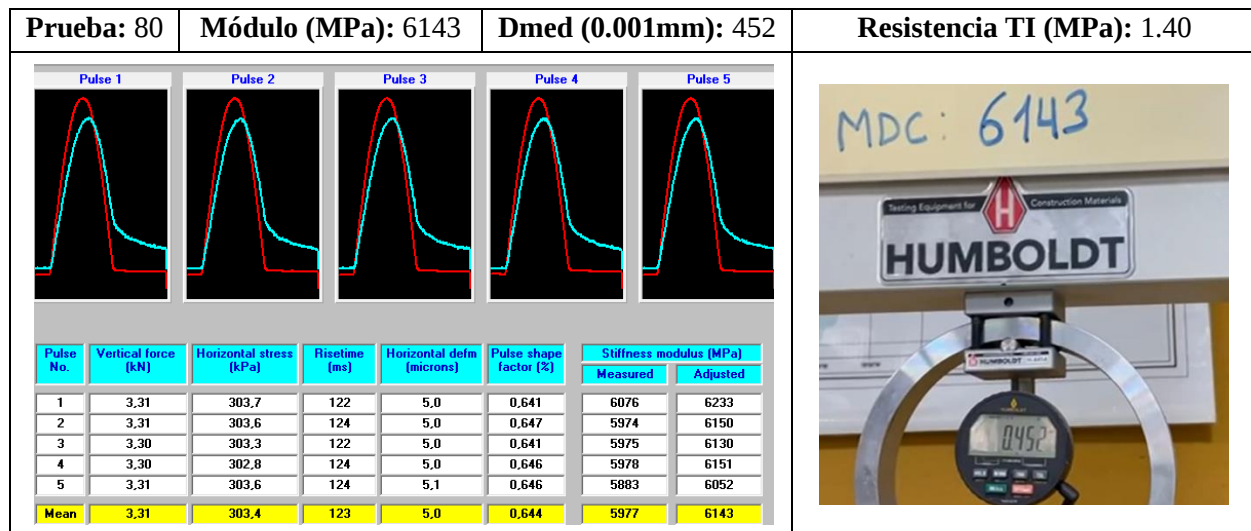
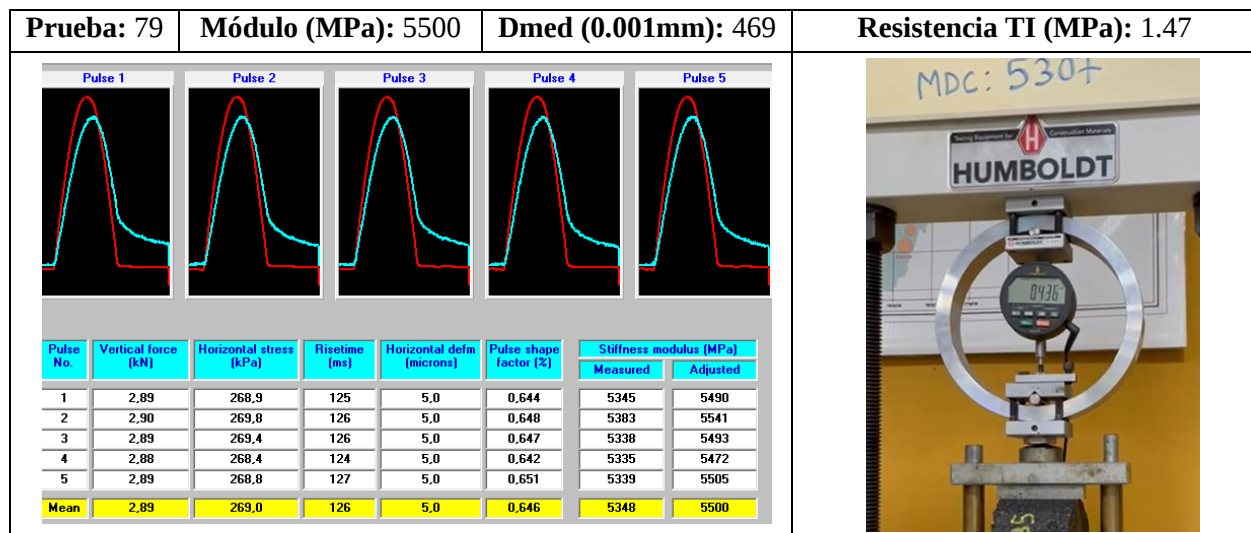


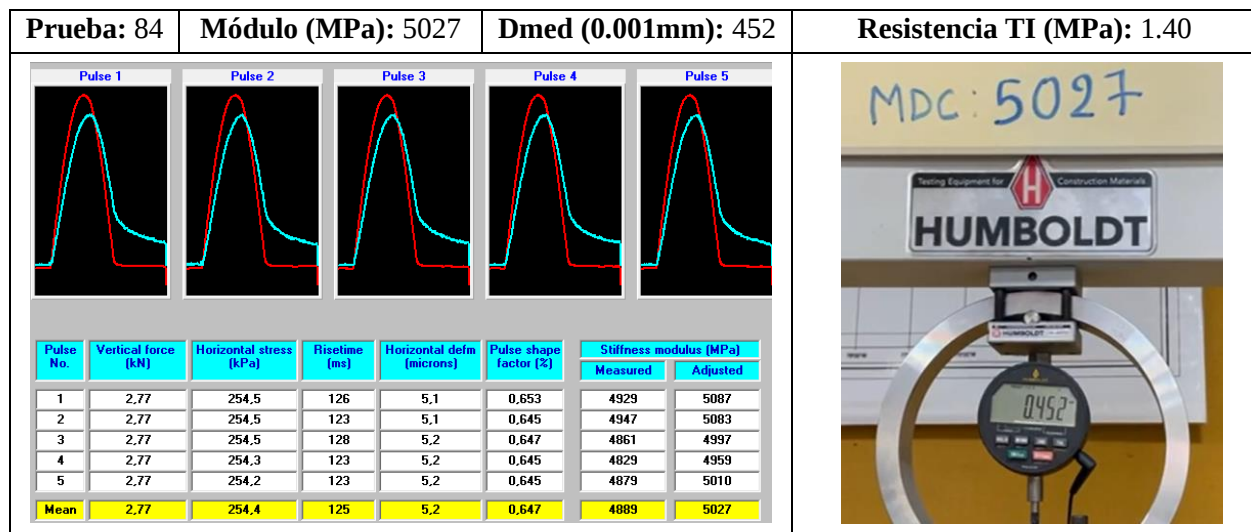
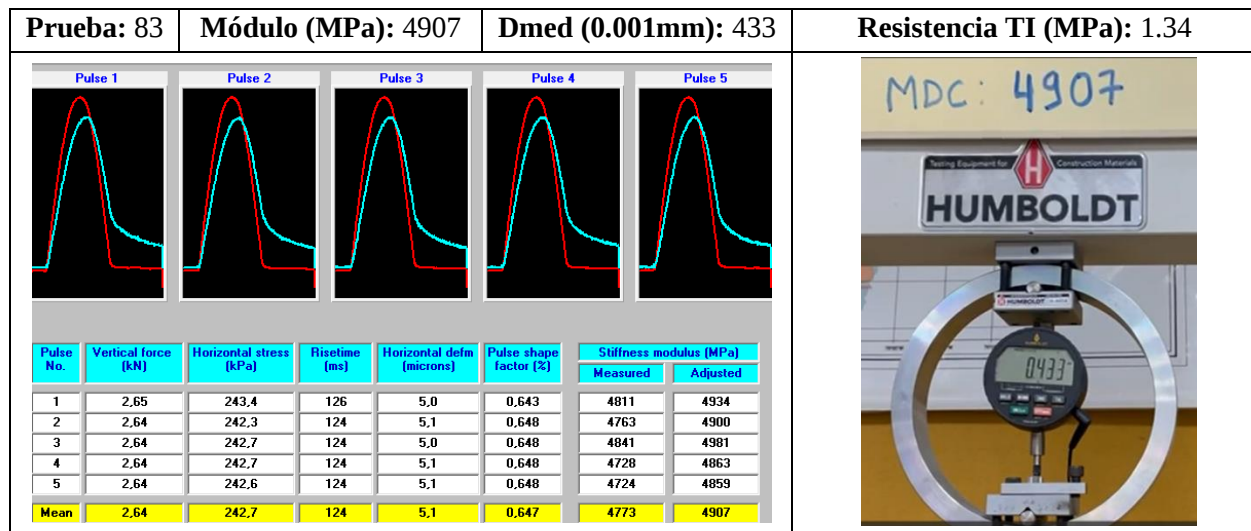
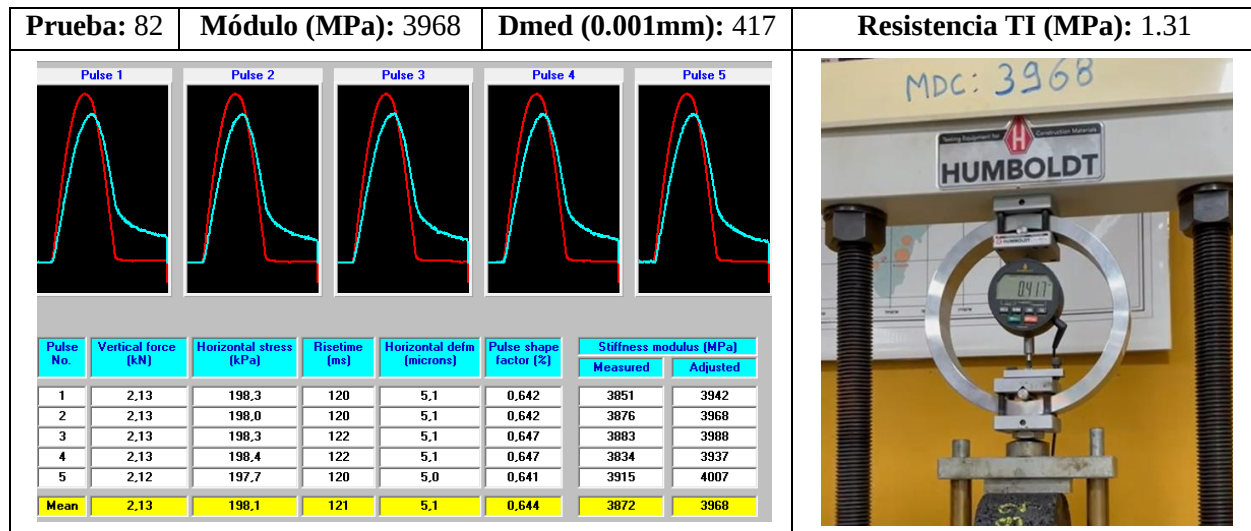


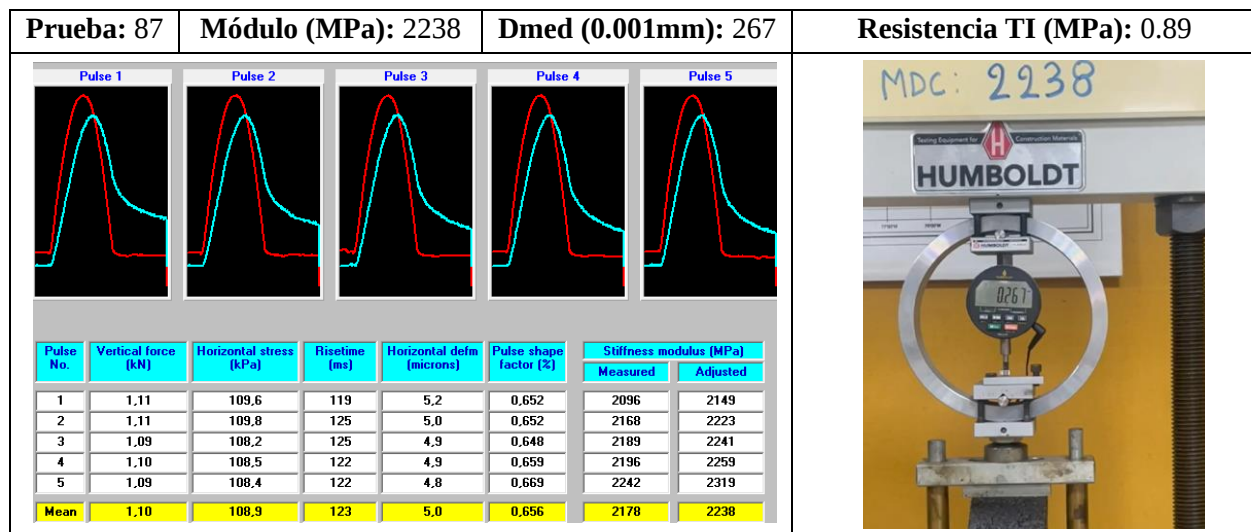
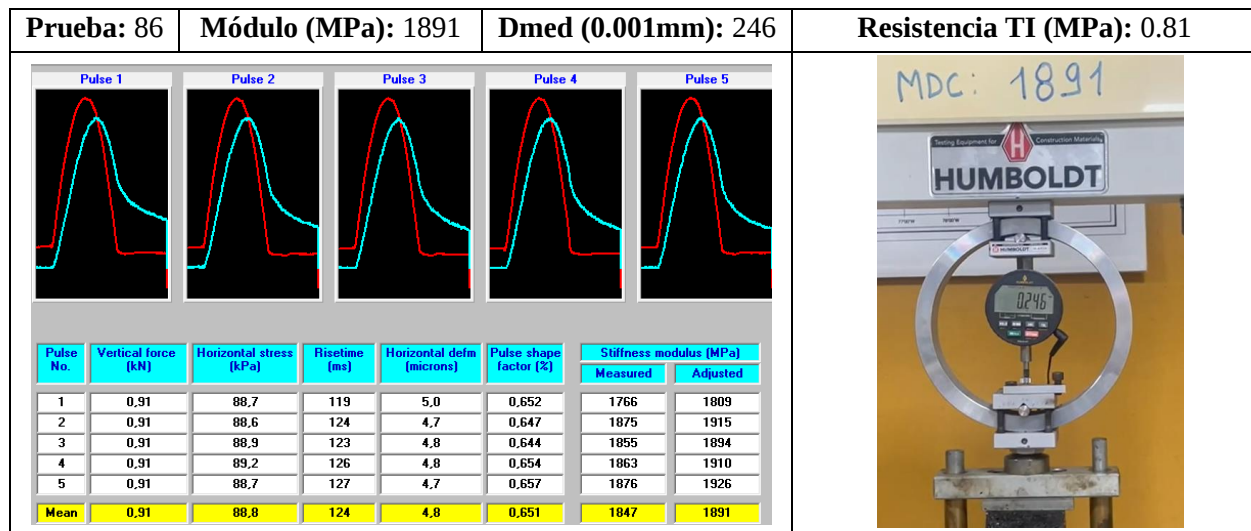
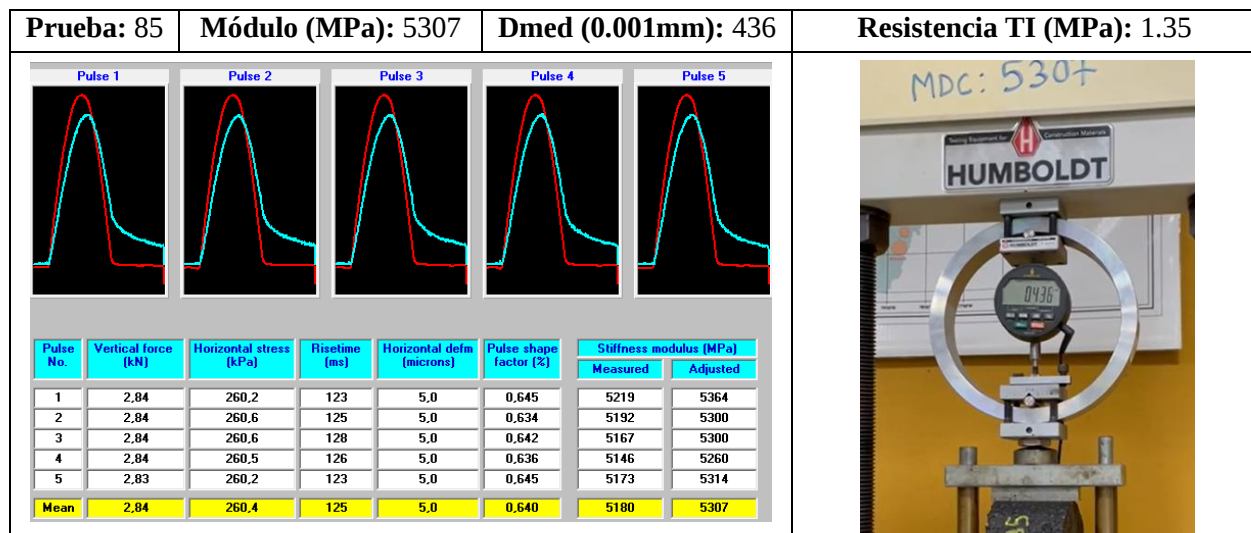


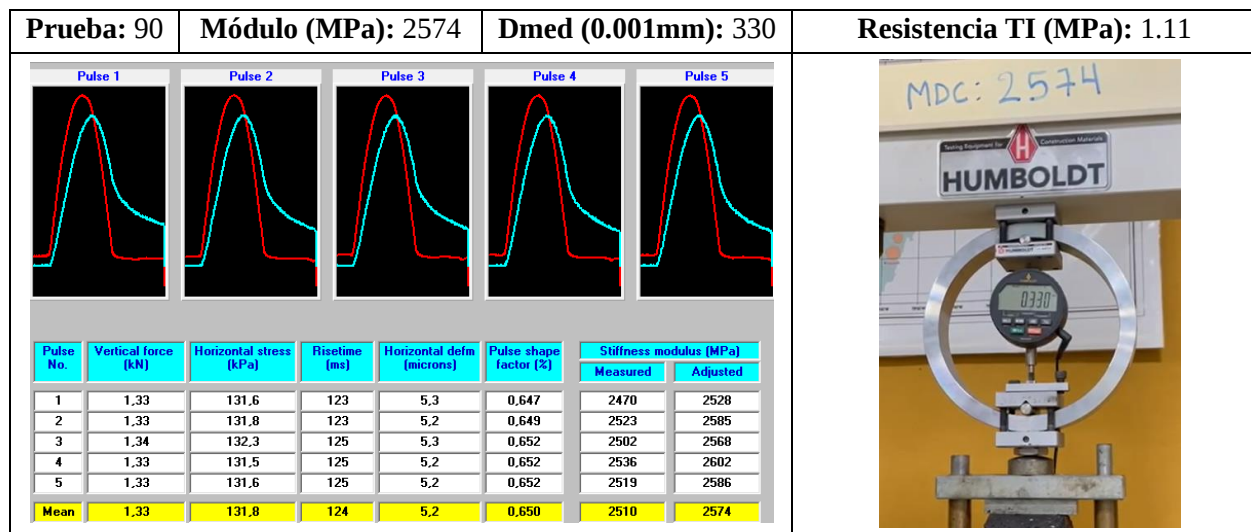
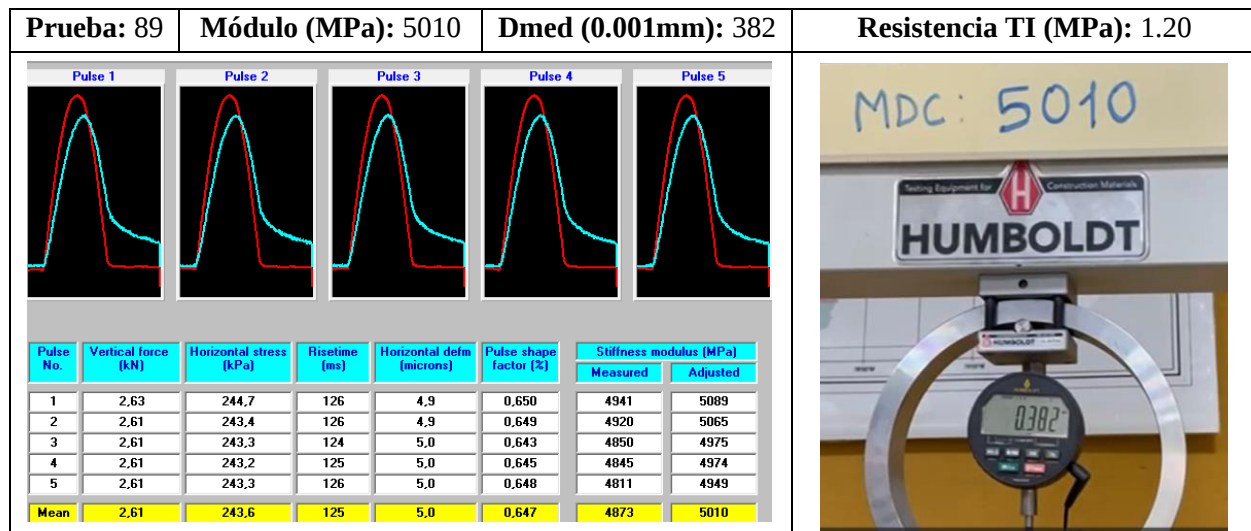
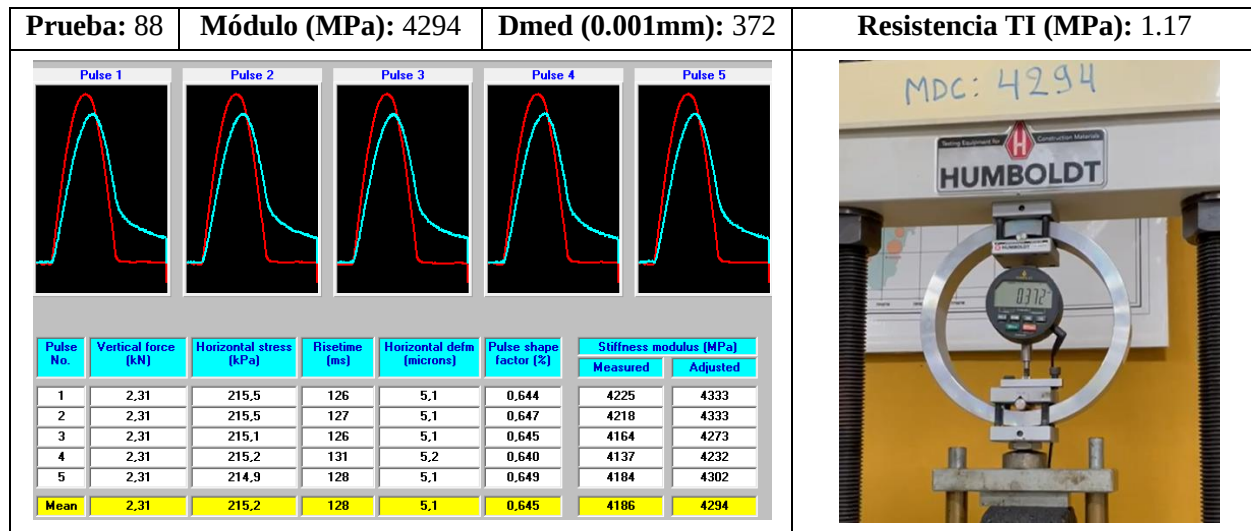


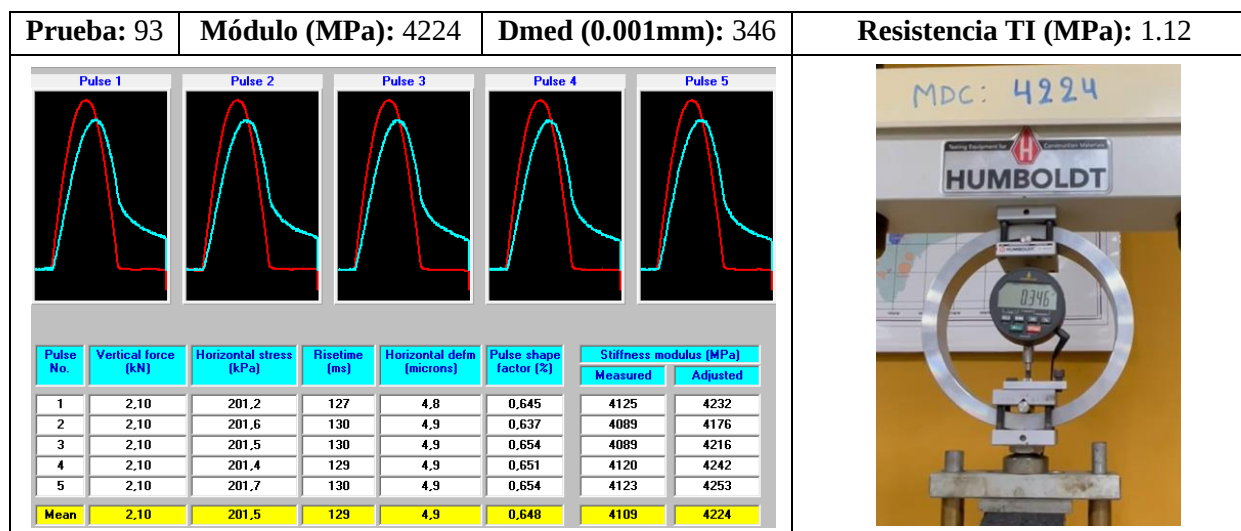
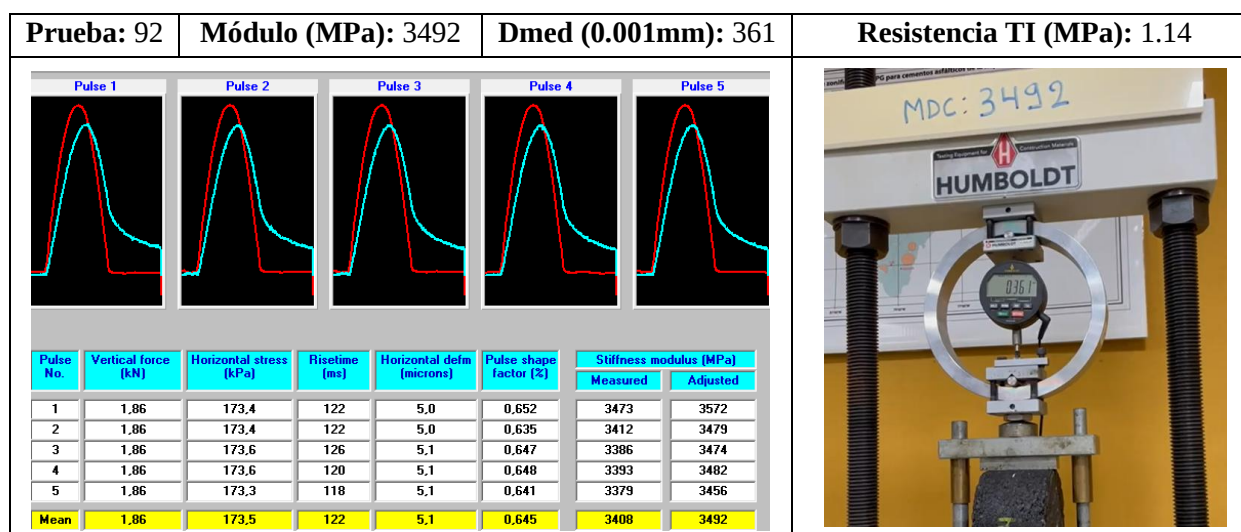
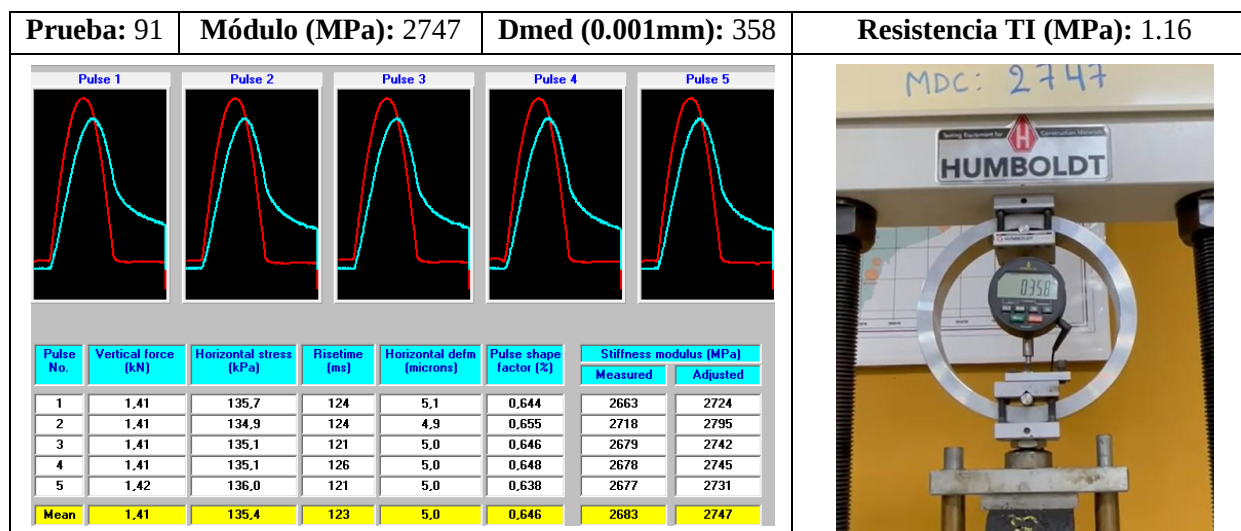


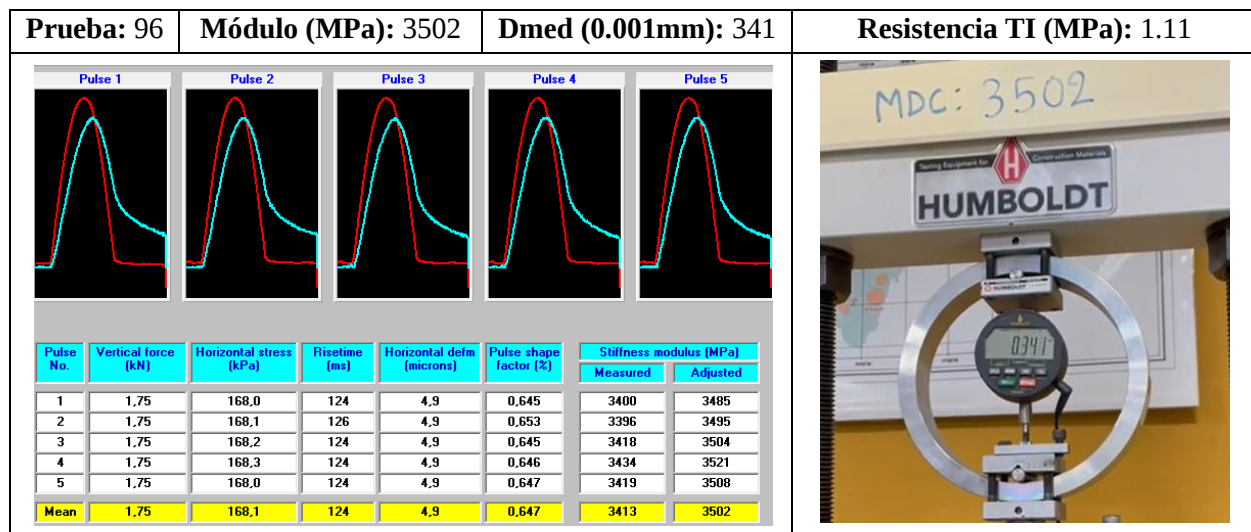
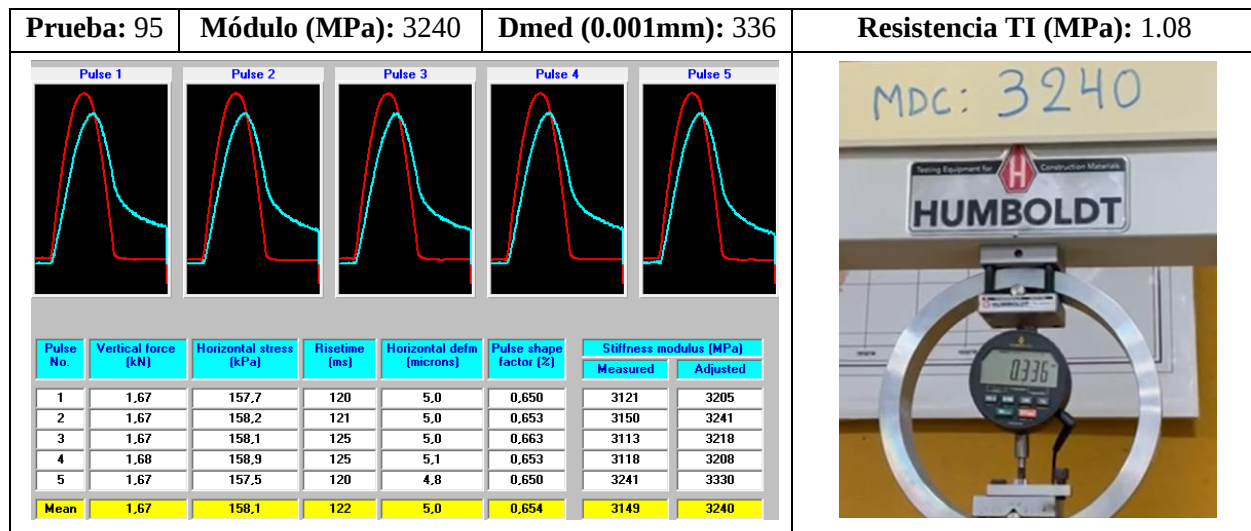
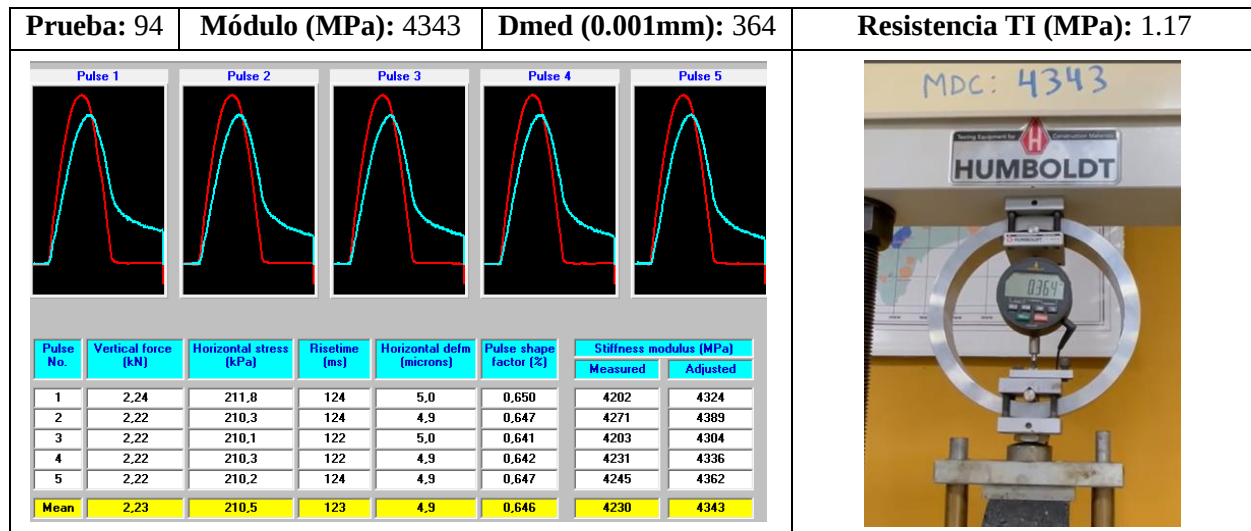


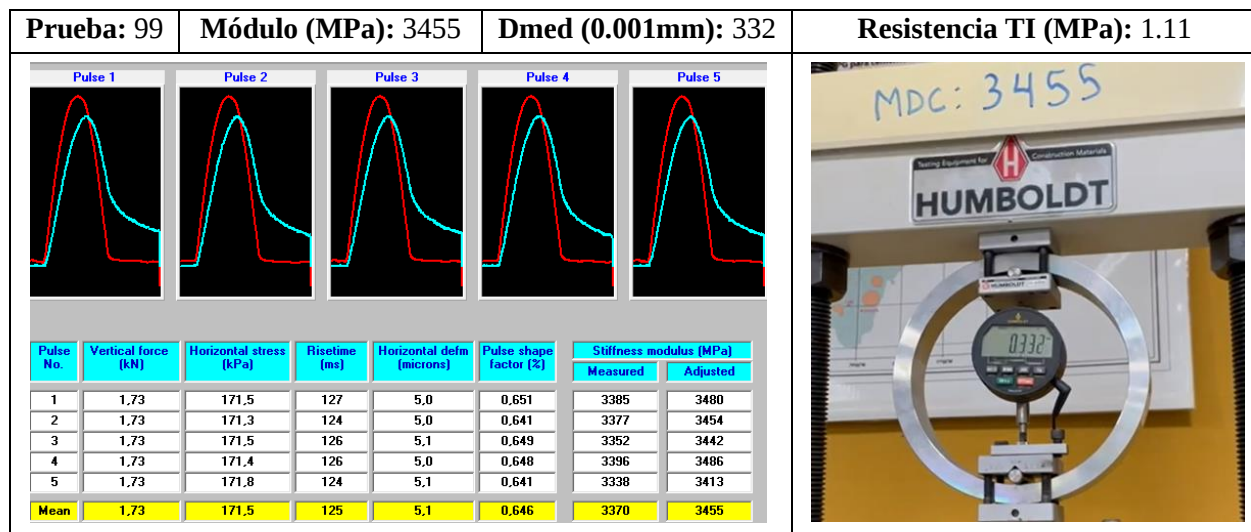
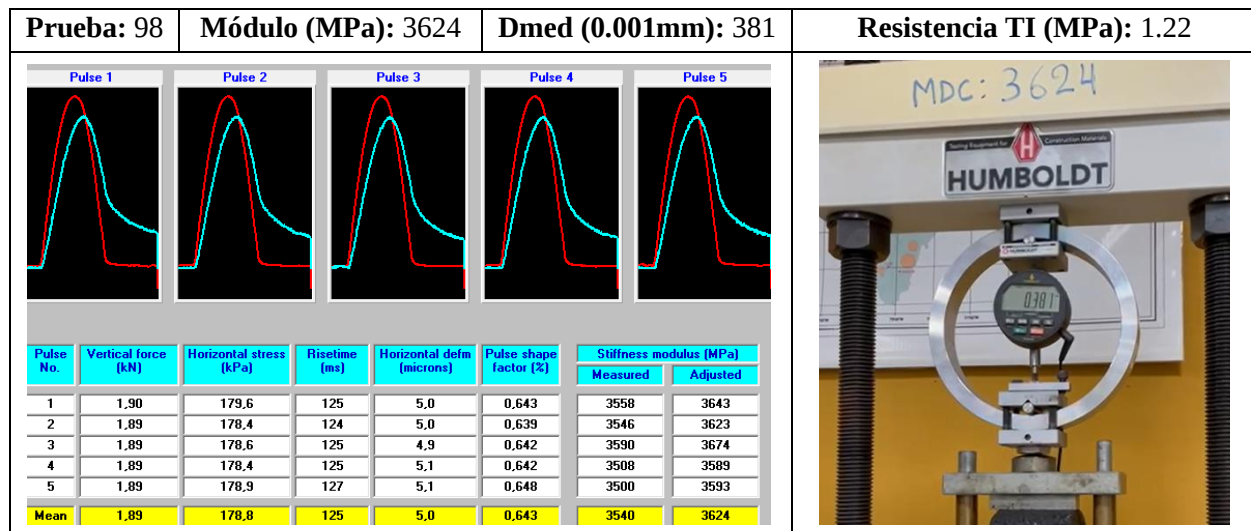
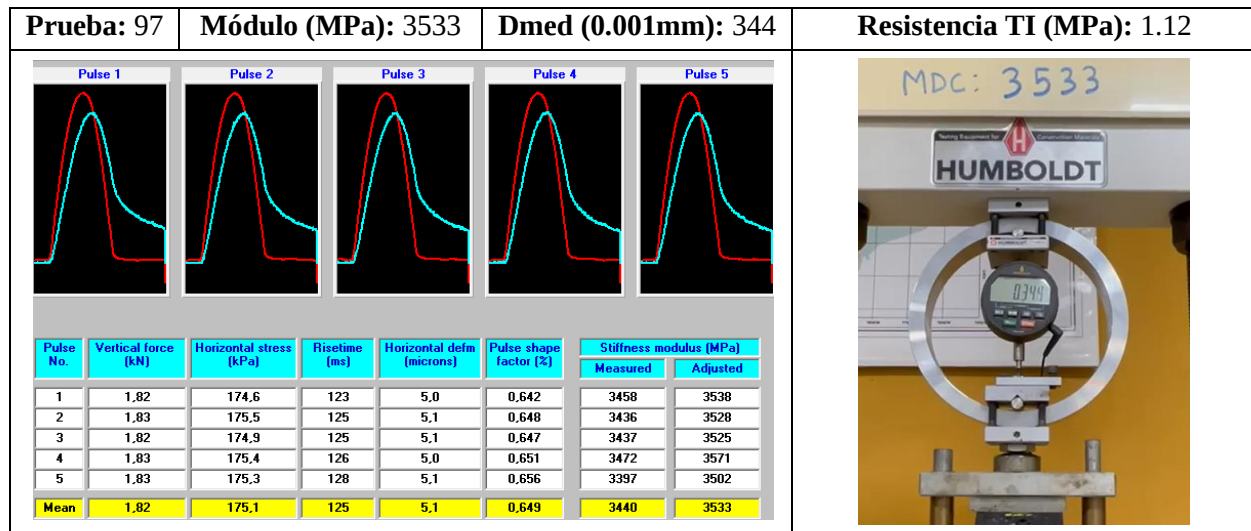


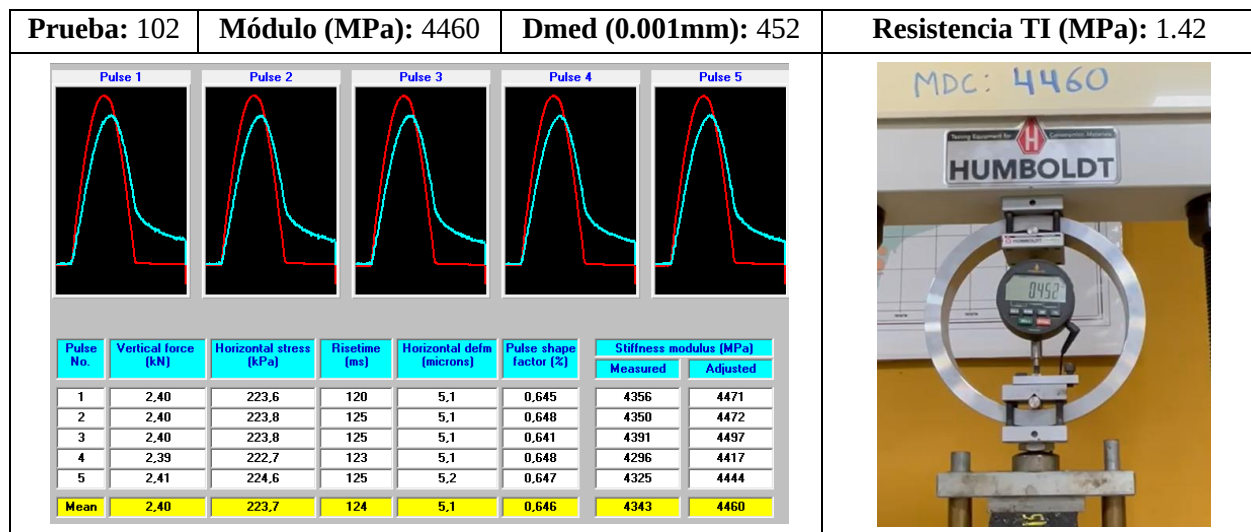
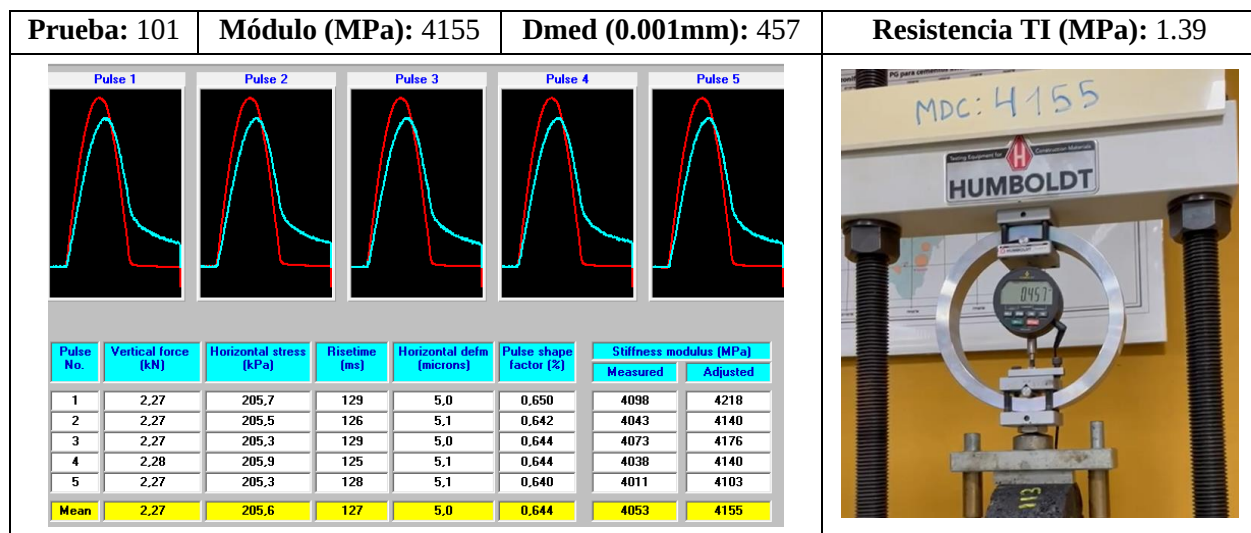
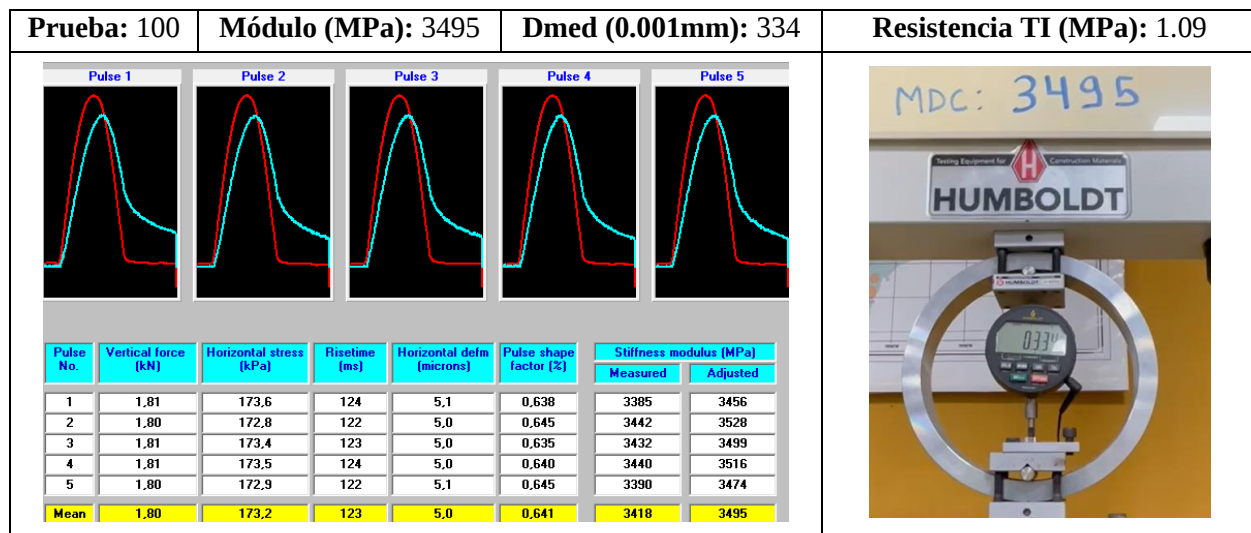


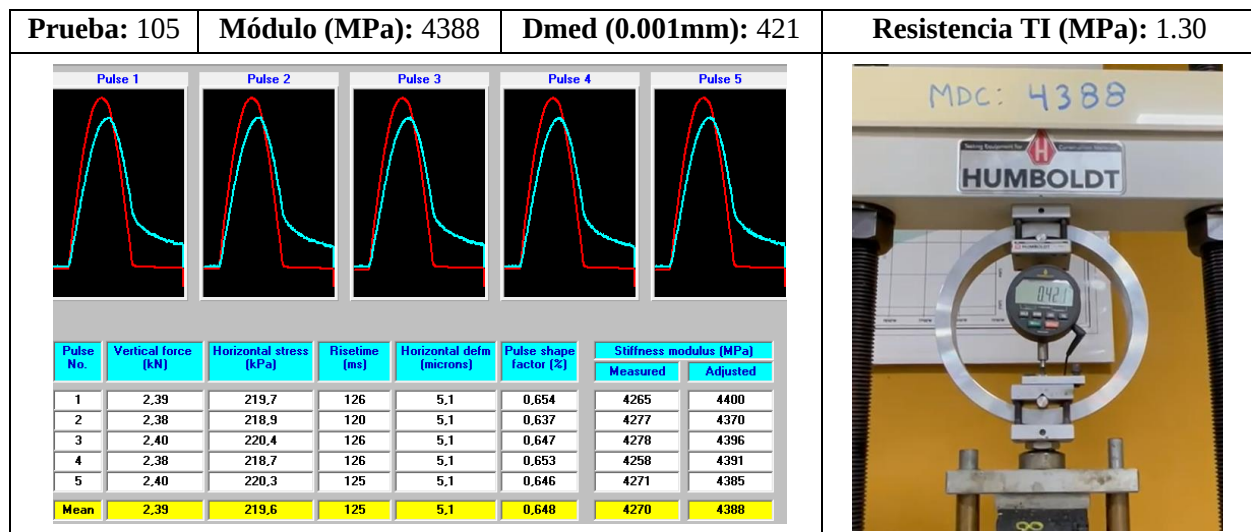
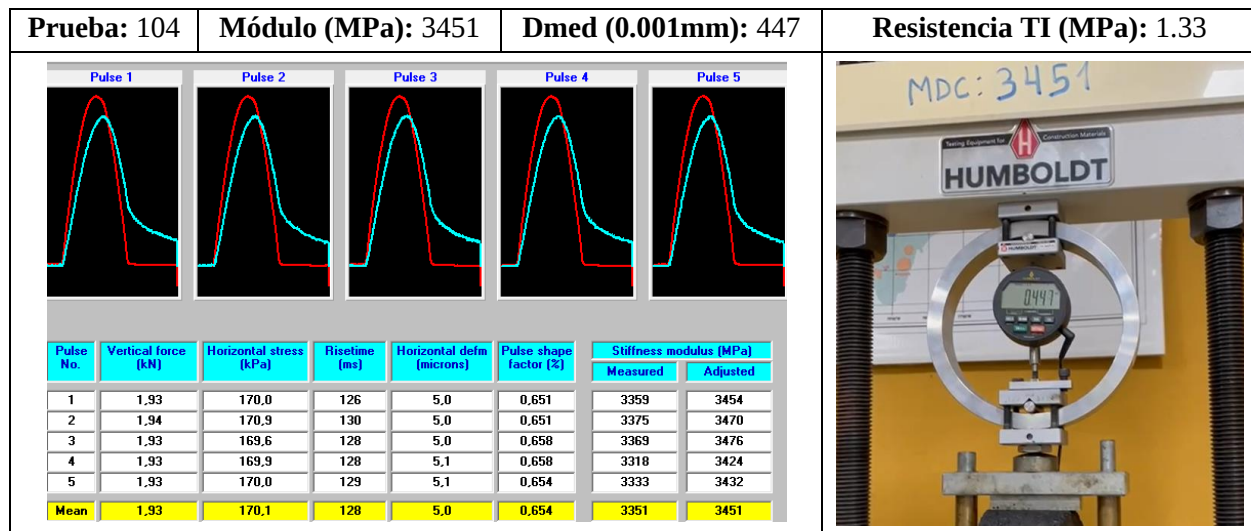
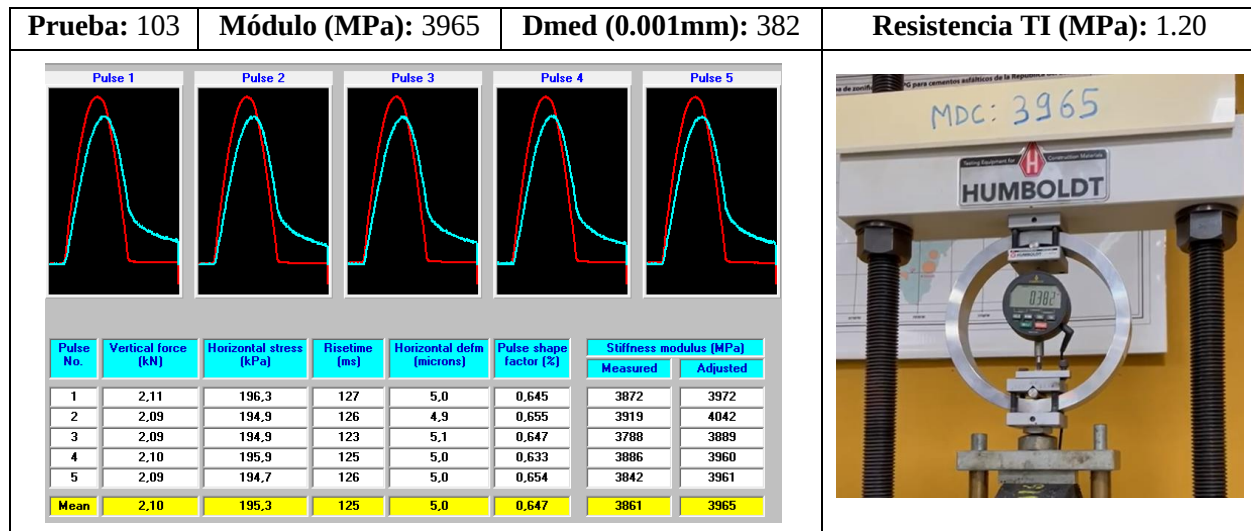


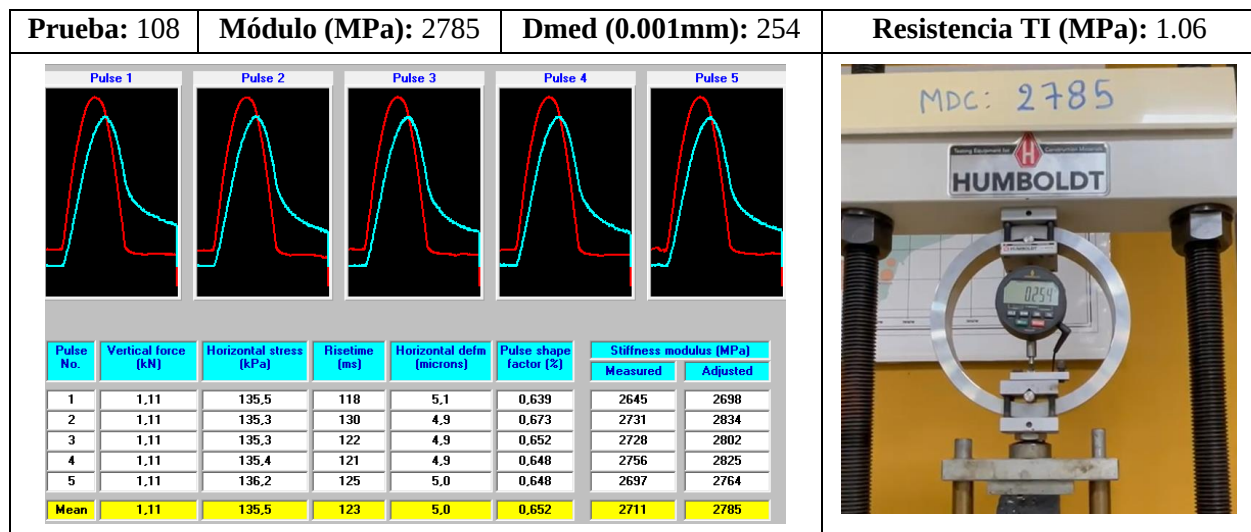
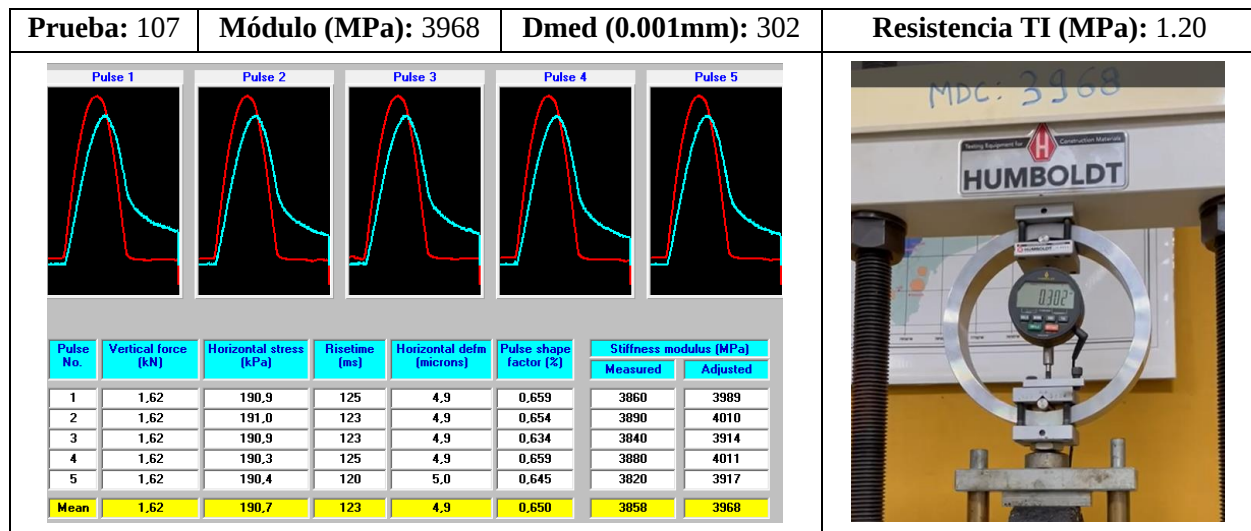
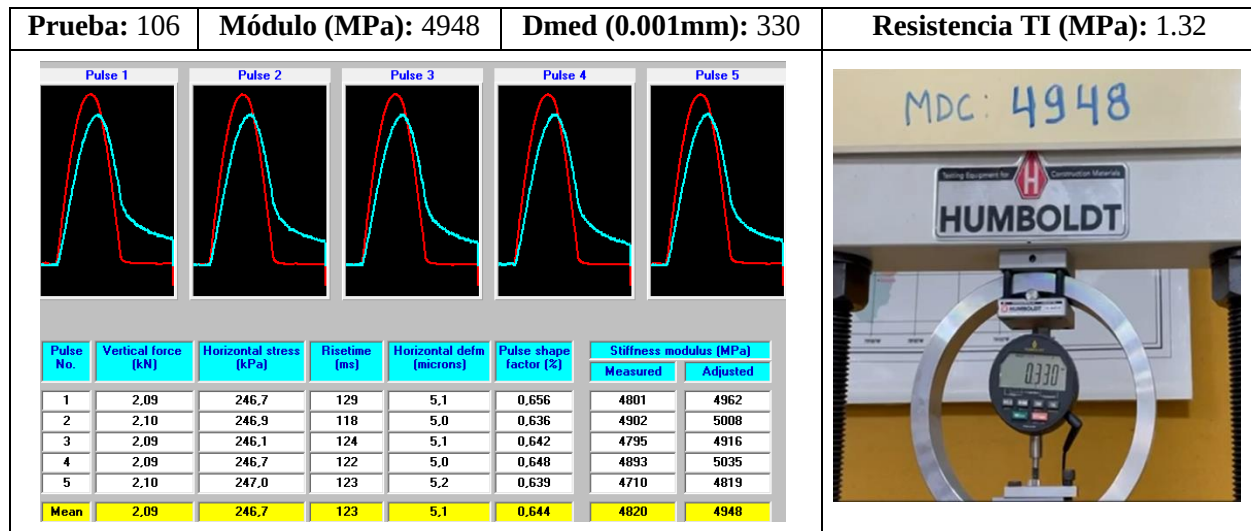


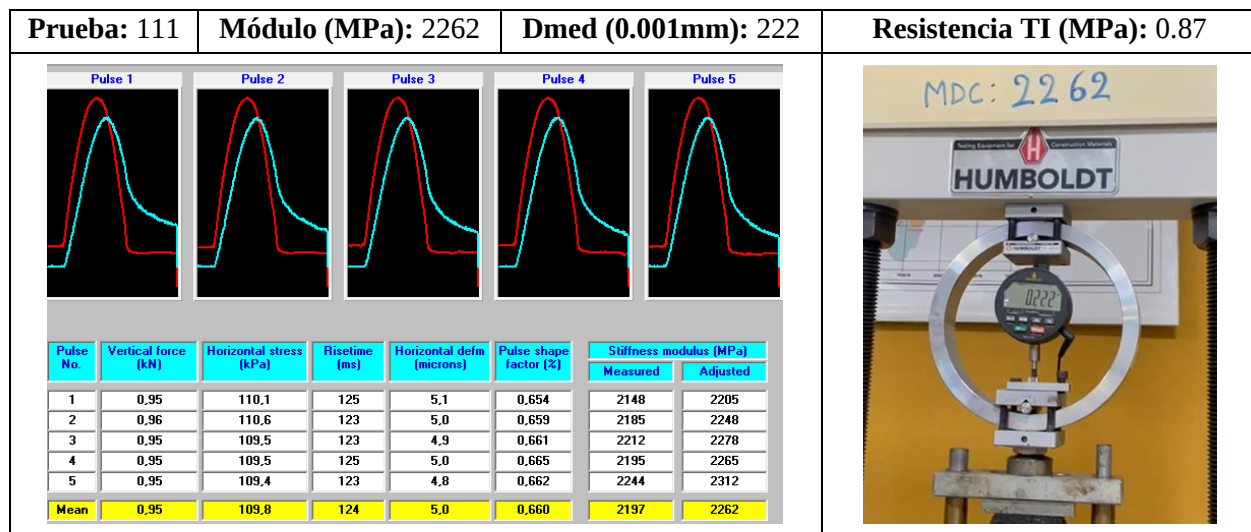
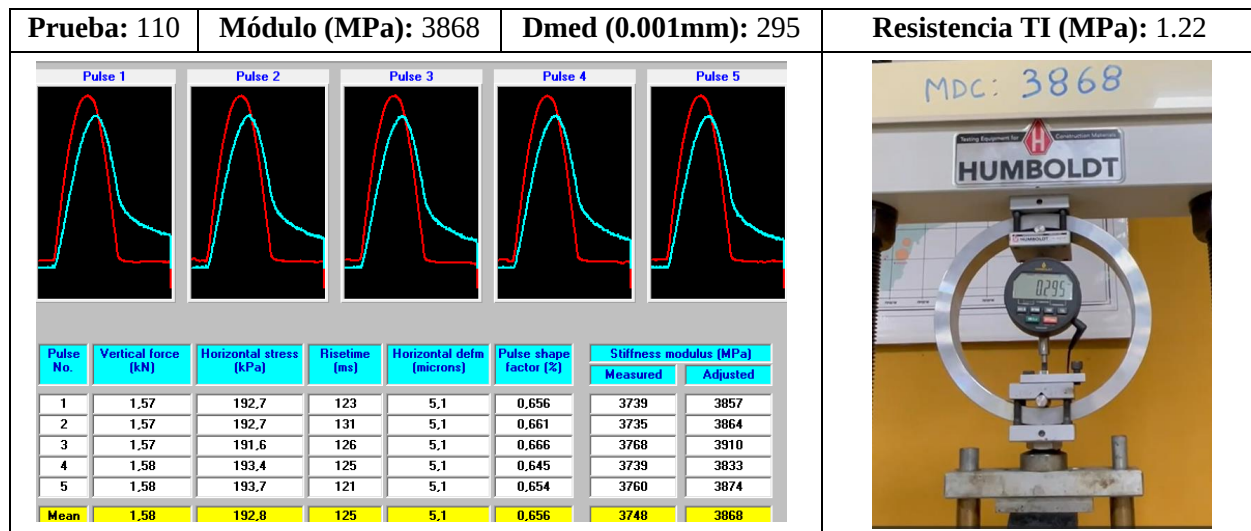
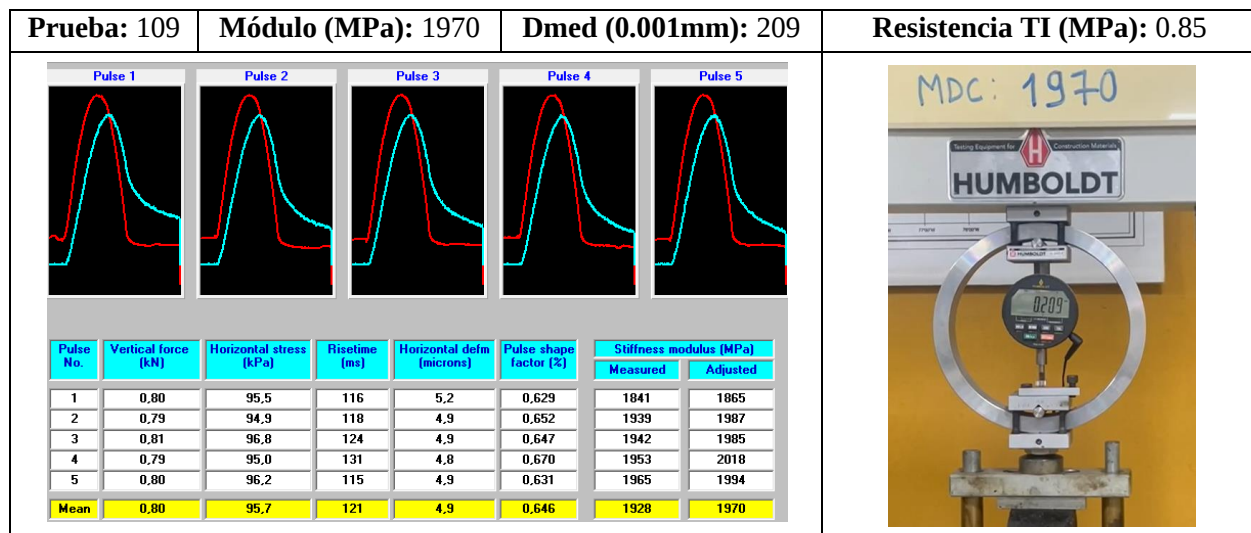


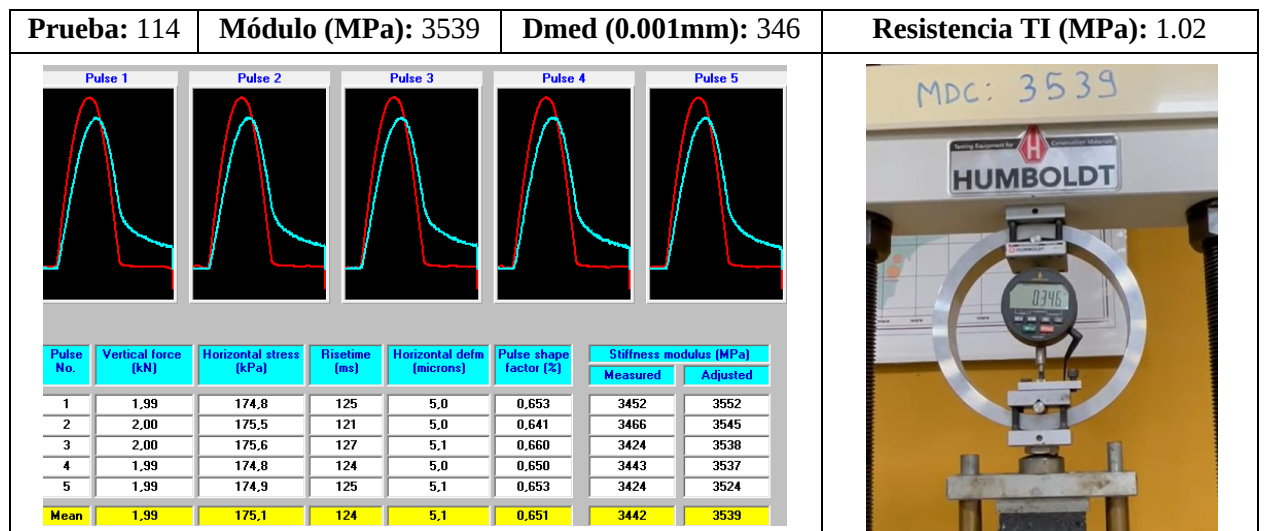
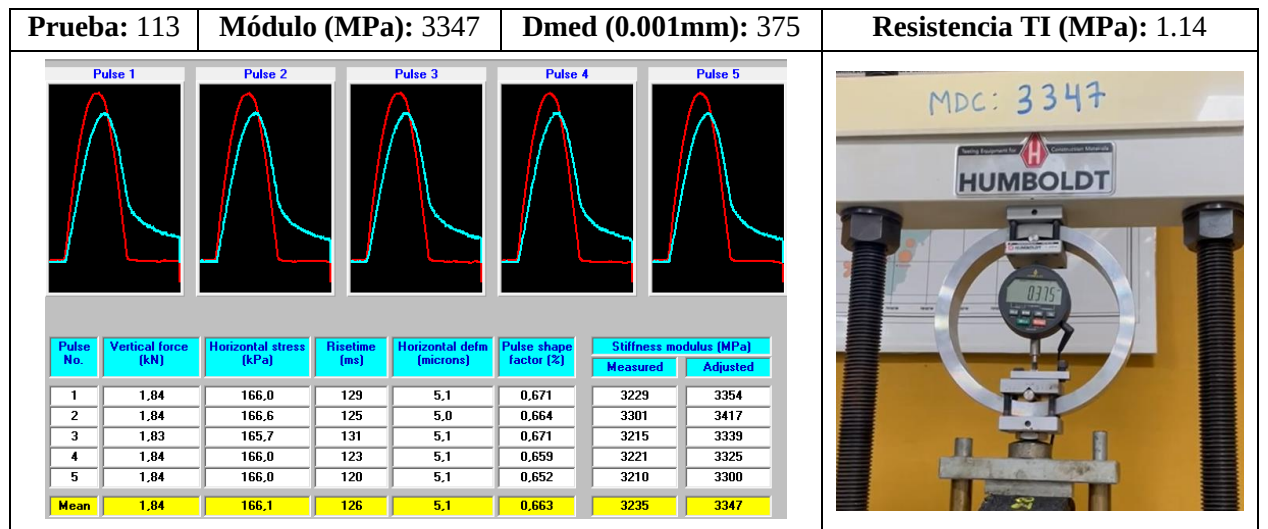
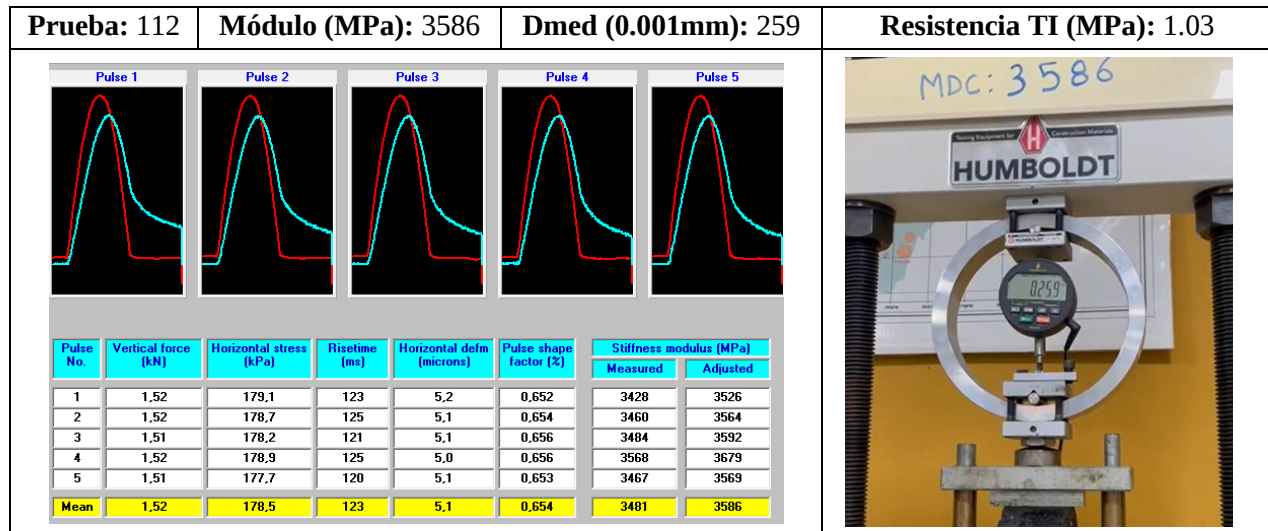


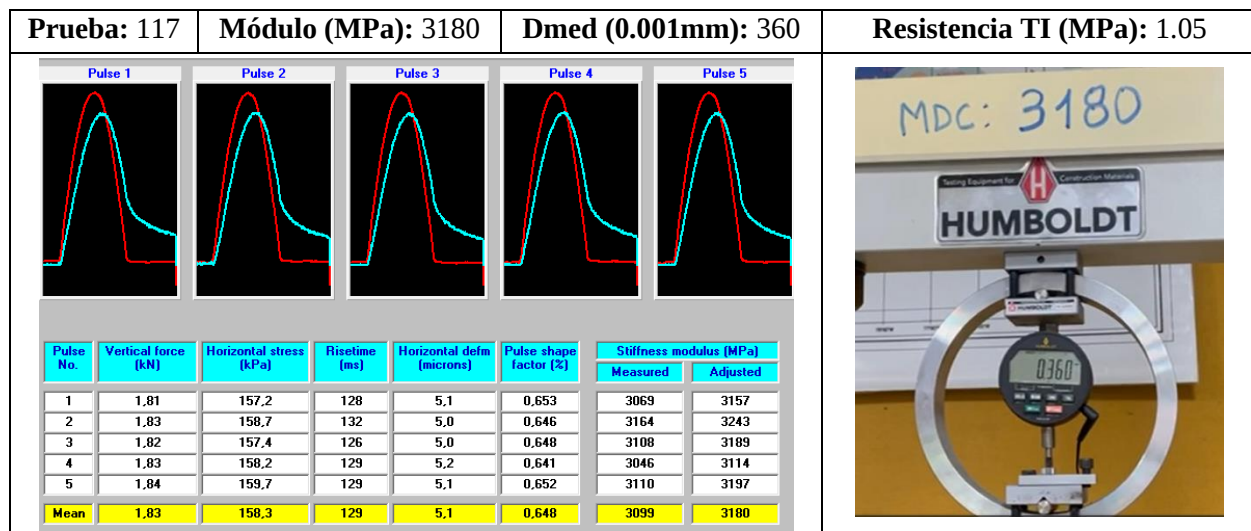
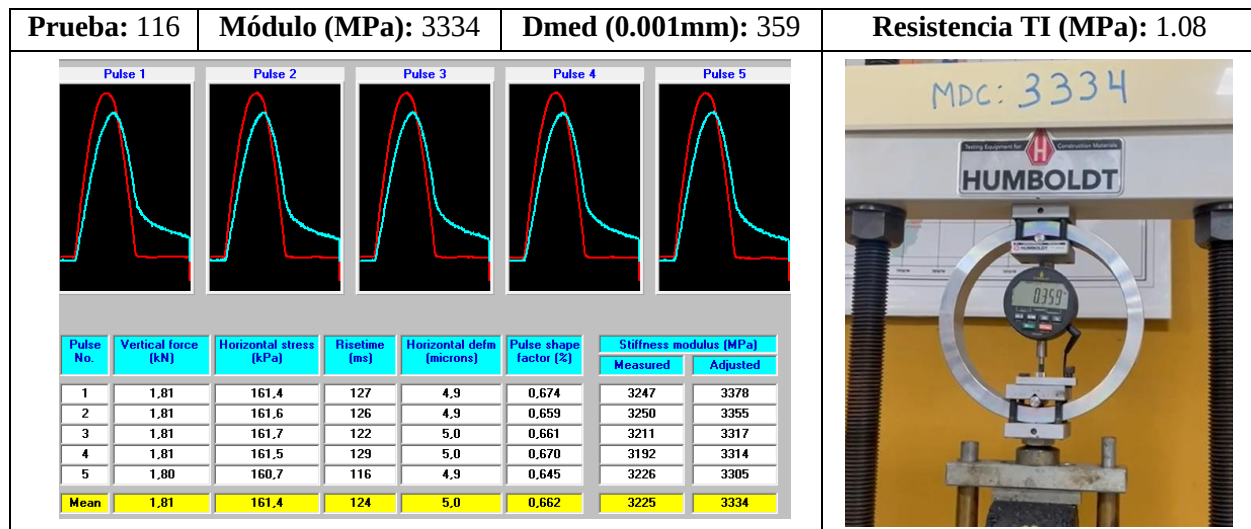
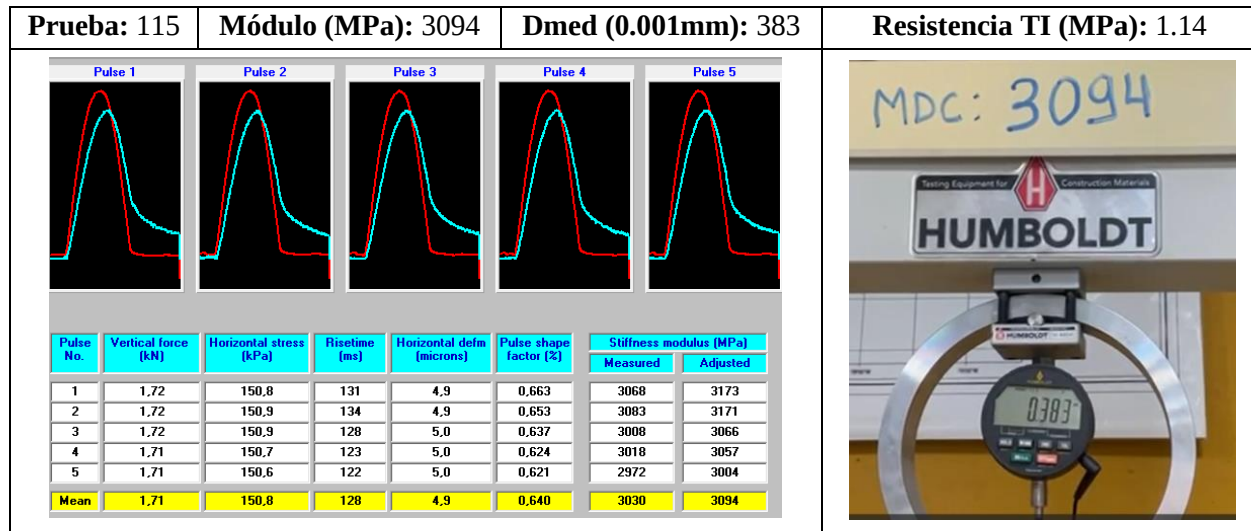


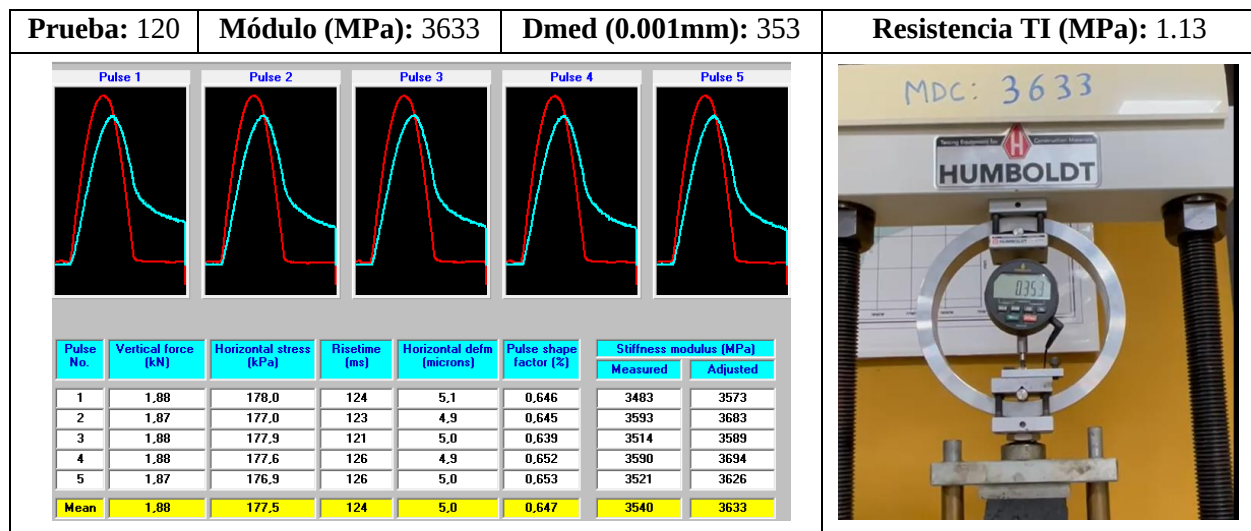
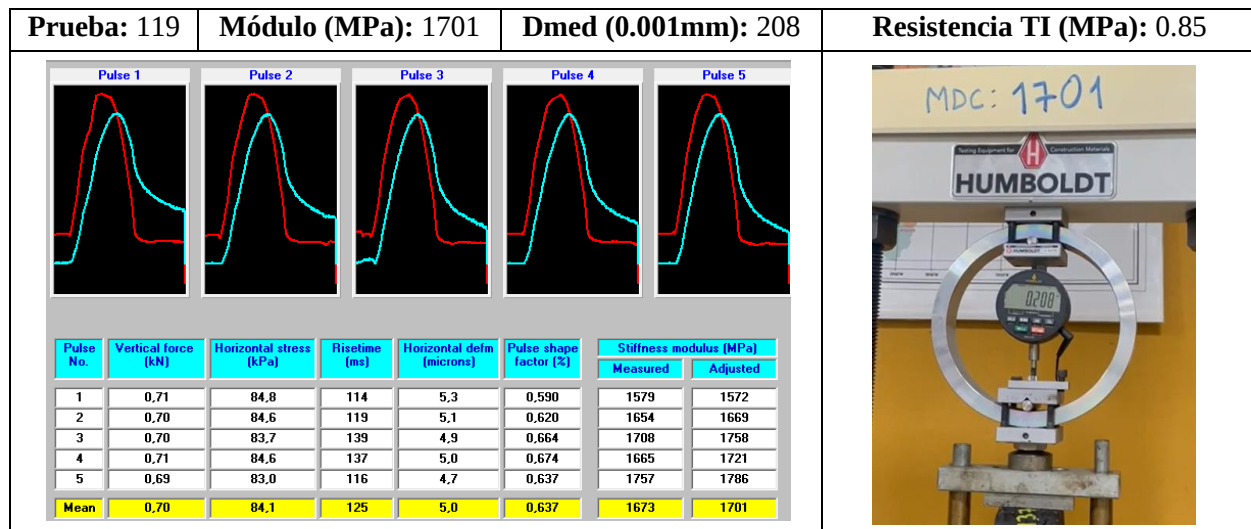
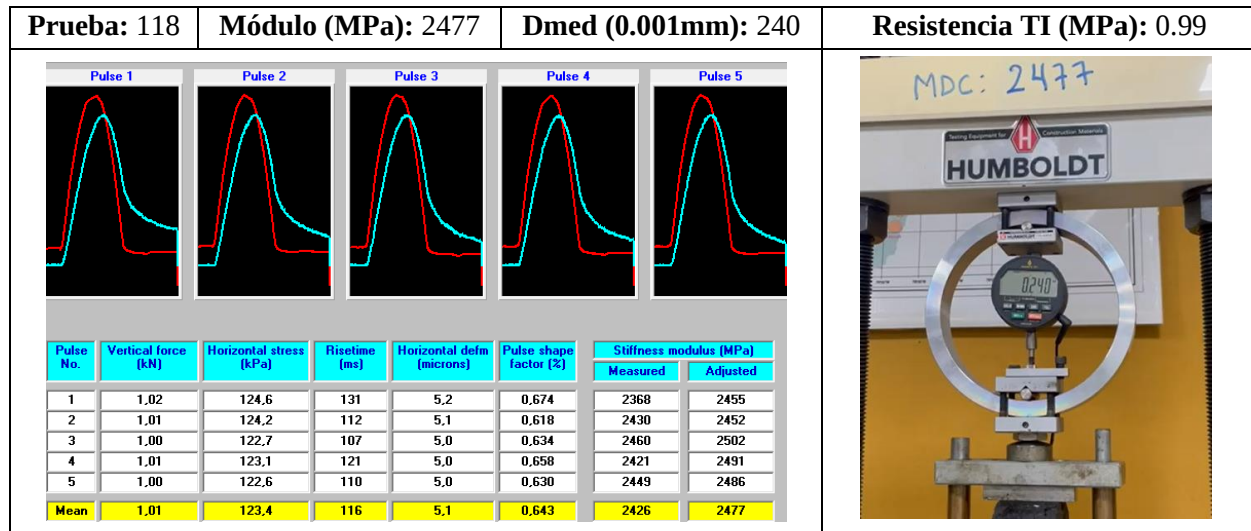








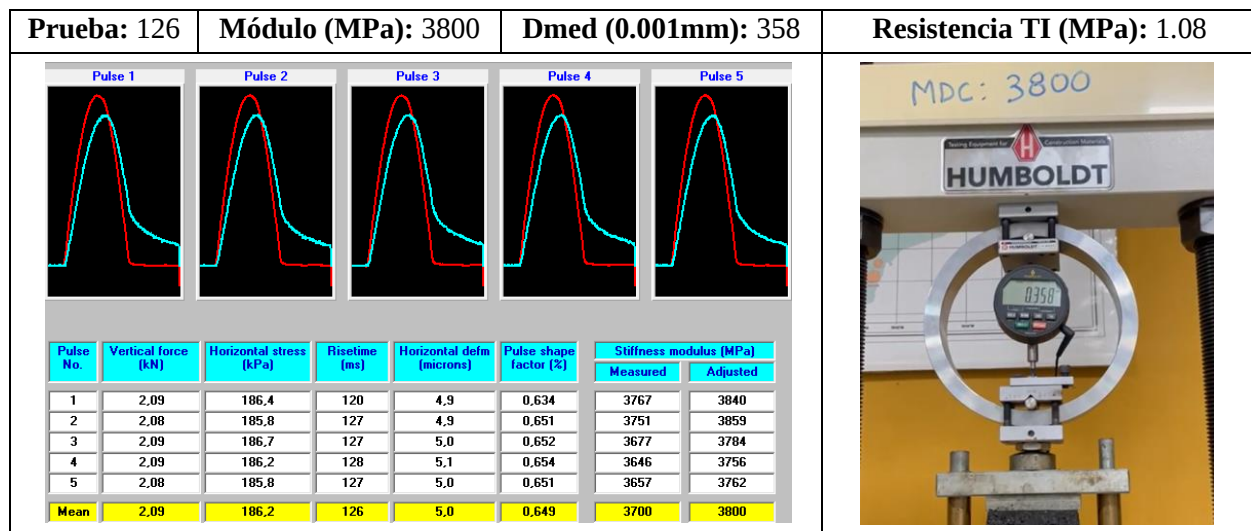
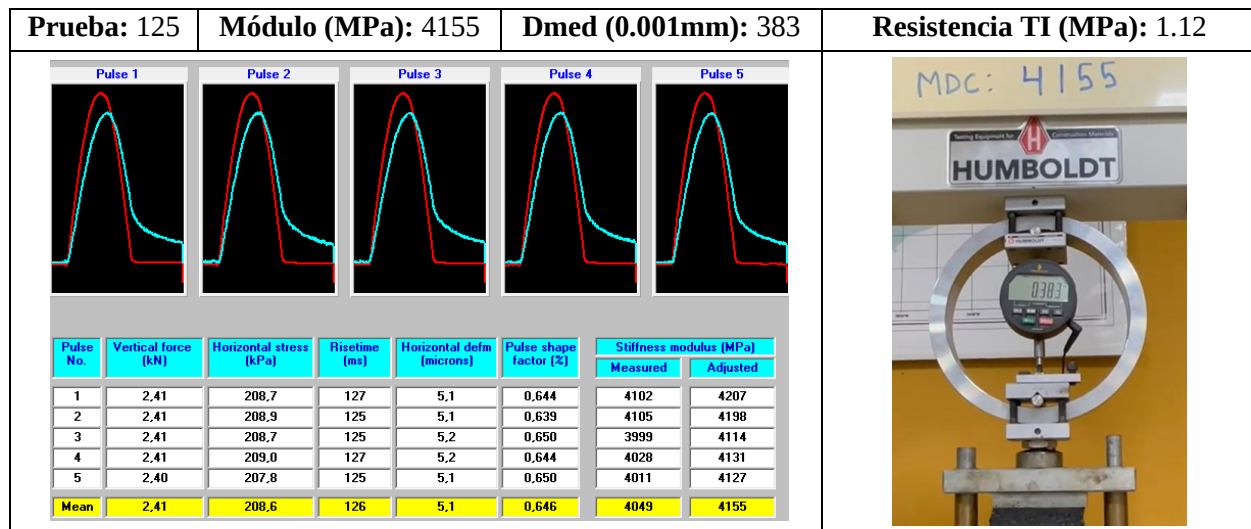
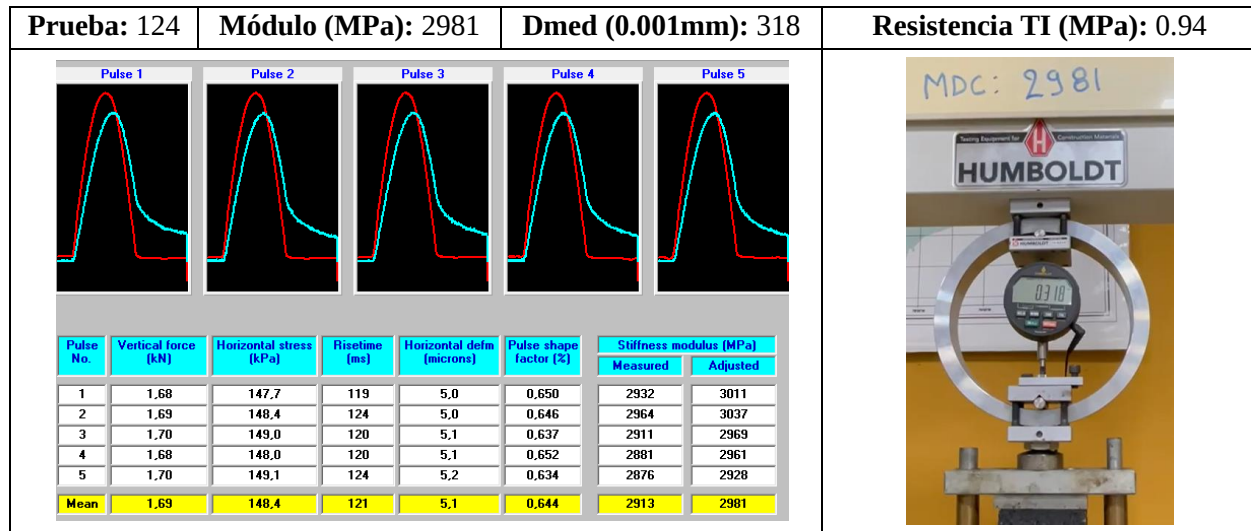


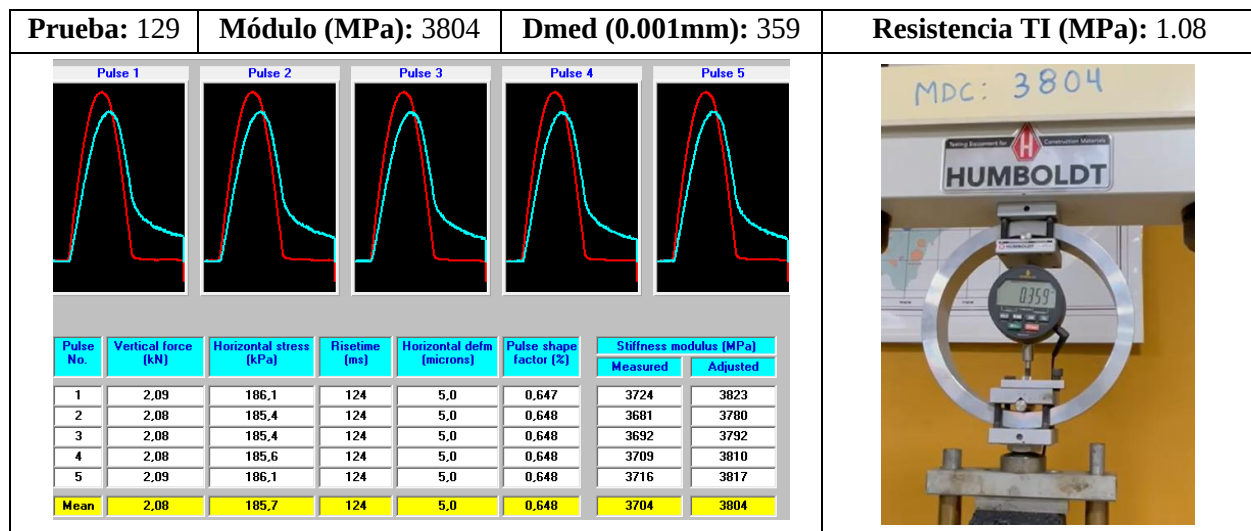
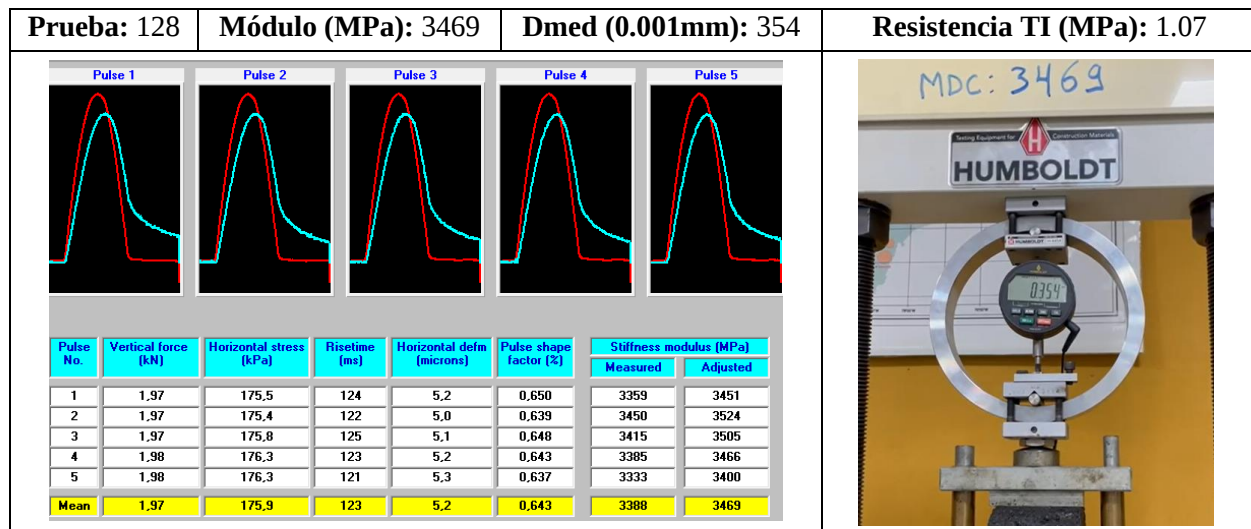
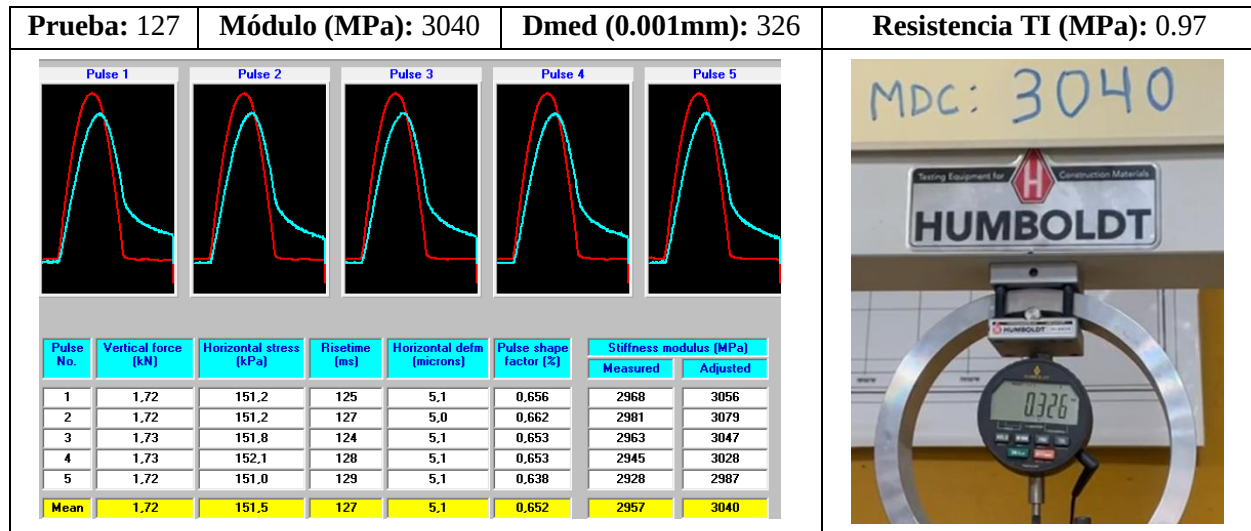


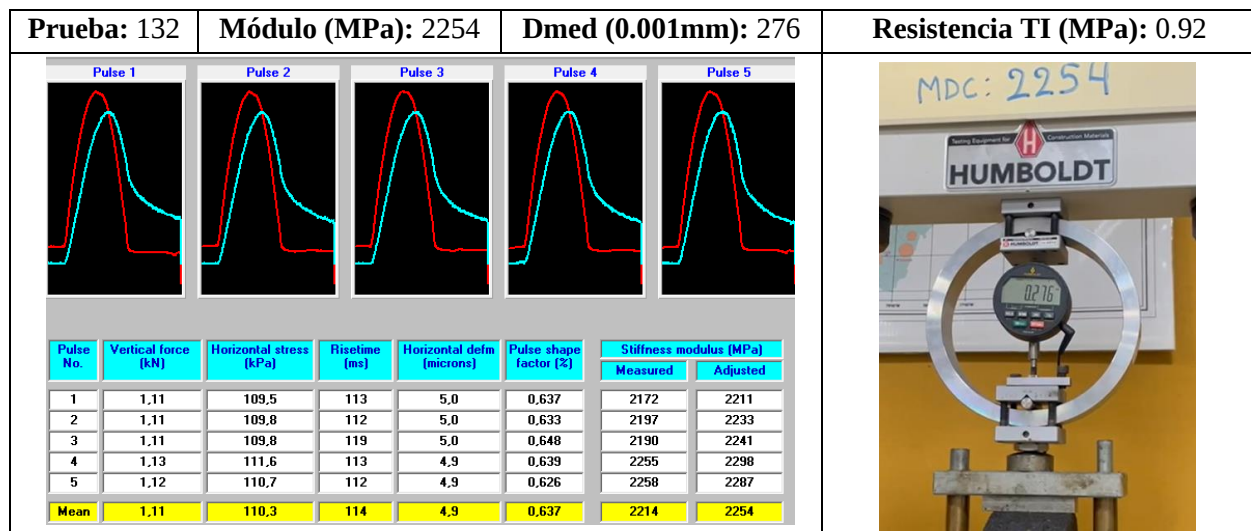
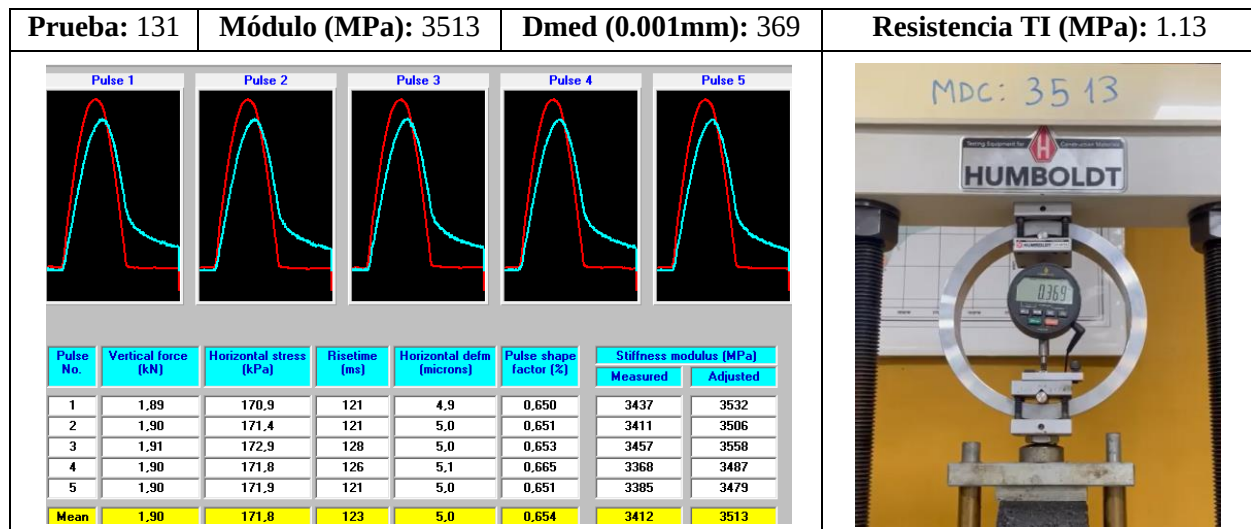
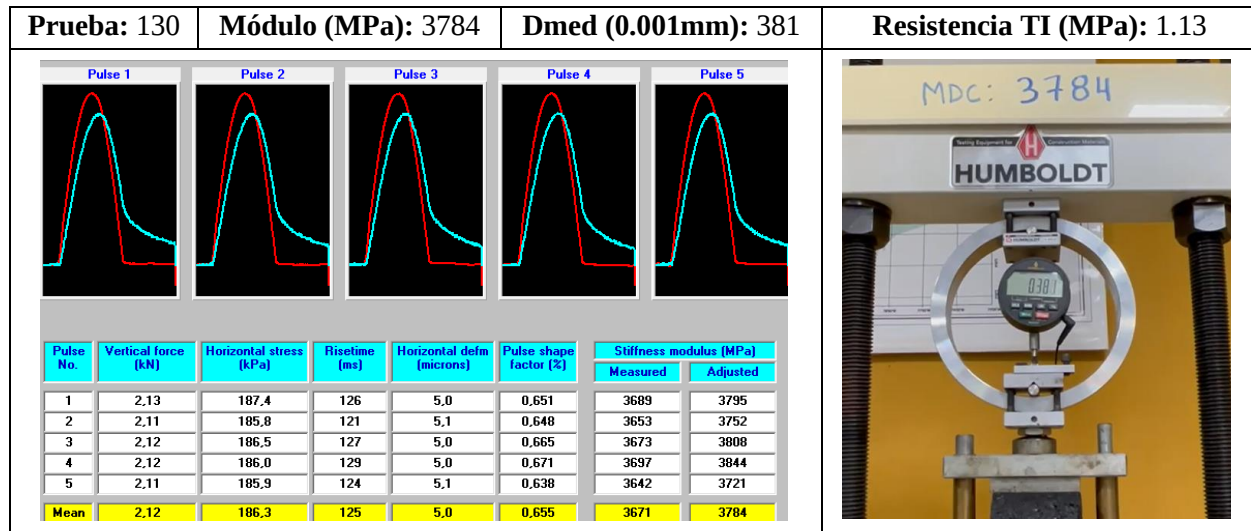
Prueba: 121	Módulo (MPa): 3923	Dmed (0.001mm): 345	Resistencia TI (MPa): 1.09																																																																
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5			MDC: 3923 Testing Equipment for Construction Materials HUMBOLDT 0.345																																																																
<table><tr><th>Pulse No.</th><th>Vertical force (kN)</th><th>Horizontal stress (kPa)</th><th>Risetime (ms)</th><th>Horizontal defm (microns)</th><th>Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr><tr><td>1</td><td>2.07</td><td>193,0</td><td>124</td><td>5,0</td><td>0.643</td><td>3813</td><td>3906</td></tr><tr><td>2</td><td>2.07</td><td>193,1</td><td>125</td><td>5,0</td><td>0.647</td><td>3860</td><td>3963</td></tr><tr><td>3</td><td>2.08</td><td>193,3</td><td>123</td><td>5,0</td><td>0.642</td><td>3821</td><td>3912</td></tr><tr><td>4</td><td>2.07</td><td>193,1</td><td>122</td><td>5,0</td><td>0.638</td><td>3817</td><td>3899</td></tr><tr><td>5</td><td>2.09</td><td>194,4</td><td>124</td><td>5,0</td><td>0.645</td><td>3835</td><td>3932</td></tr><tr><td>Mean</td><td>2.08</td><td>193,4</td><td>124</td><td>5,0</td><td>0.643</td><td>3829</td><td>3923</td></tr></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)								Measured	Adjusted	1	2.07	193,0	124	5,0	0.643	3813	3906	2	2.07	193,1	125	5,0	0.647	3860	3963	3	2.08	193,3	123	5,0	0.642	3821	3912	4	2.07	193,1	122	5,0	0.638	3817	3899	5	2.09	194,4	124	5,0	0.645	3835	3932	Mean	2.08	193,4	124	5,0	0.643	3829	3923	
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																													
						Measured	Adjusted																																																												
1	2.07	193,0	124	5,0	0.643	3813	3906																																																												
2	2.07	193,1	125	5,0	0.647	3860	3963																																																												
3	2.08	193,3	123	5,0	0.642	3821	3912																																																												
4	2.07	193,1	122	5,0	0.638	3817	3899																																																												
5	2.09	194,4	124	5,0	0.645	3835	3932																																																												
Mean	2.08	193,4	124	5,0	0.643	3829	3923																																																												

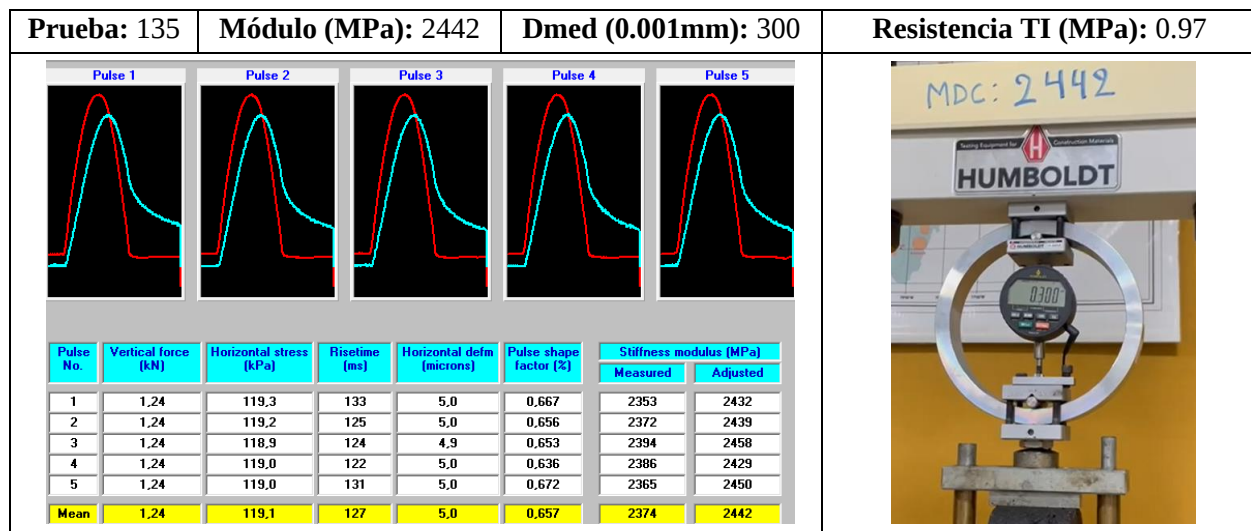
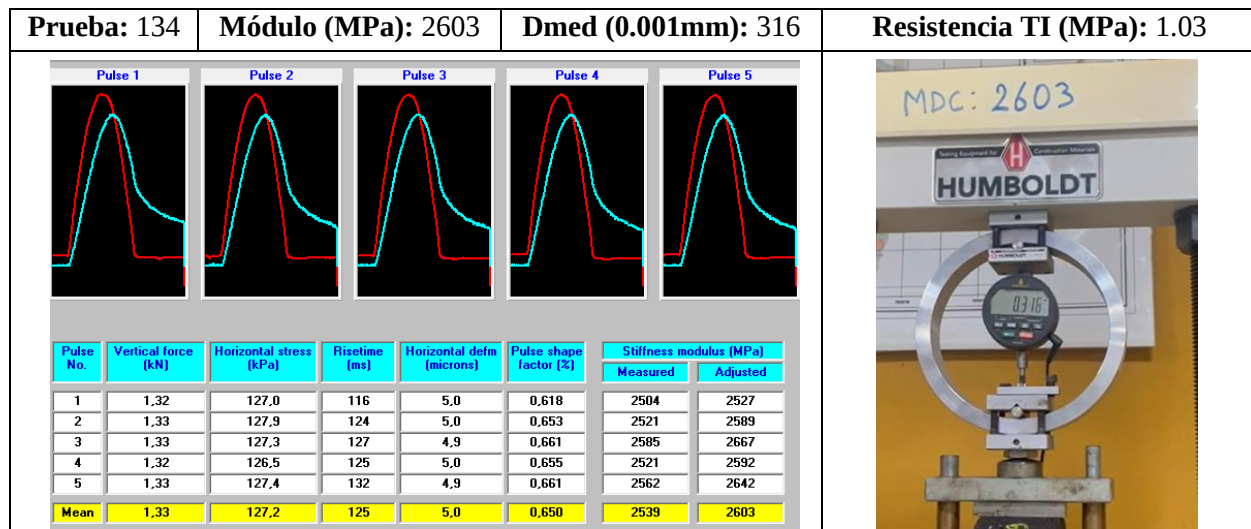
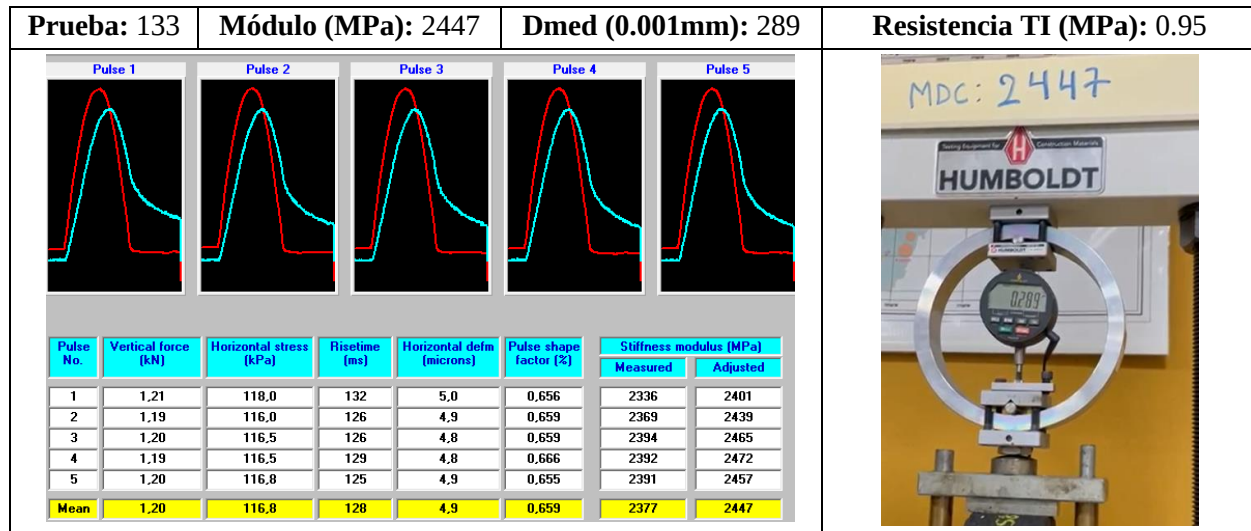
Prueba: 122	Módulo (MPa): 4078	Dmed (0.001mm): 318	Resistencia TI (MPa): 1.05																																																																
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5 <table><thead><tr><th>Pulse No.</th><th>Vertical force (kN)</th><th>Horizontal stress (kPa)</th><th>Risetime (ms)</th><th>Horizontal defm (microns)</th><th>Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>2.06</td><td>201.2</td><td>125</td><td>5.1</td><td>0.646</td><td>3912</td><td>4014</td></tr><tr><td>2</td><td>2.06</td><td>200.6</td><td>128</td><td>5.1</td><td>0.654</td><td>3936</td><td>4057</td></tr><tr><td>3</td><td>2.05</td><td>200.0</td><td>128</td><td>5.0</td><td>0.653</td><td>3938</td><td>4057</td></tr><tr><td>4</td><td>2.05</td><td>199.9</td><td>125</td><td>4.9</td><td>0.644</td><td>4022</td><td>4124</td></tr><tr><td>5</td><td>2.06</td><td>200.7</td><td>130</td><td>5.0</td><td>0.659</td><td>4002</td><td>4138</td></tr><tr><td>Mean</td><td>2.06</td><td>200.5</td><td>127</td><td>5.0</td><td>0.651</td><td>3962</td><td>4078</td></tr></tbody></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)								Measured	Adjusted	1	2.06	201.2	125	5.1	0.646	3912	4014	2	2.06	200.6	128	5.1	0.654	3936	4057	3	2.05	200.0	128	5.0	0.653	3938	4057	4	2.05	199.9	125	4.9	0.644	4022	4124	5	2.06	200.7	130	5.0	0.659	4002	4138	Mean	2.06	200.5	127	5.0	0.651	3962	4078	MDC: 4078
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																													
						Measured	Adjusted																																																												
1	2.06	201.2	125	5.1	0.646	3912	4014																																																												
2	2.06	200.6	128	5.1	0.654	3936	4057																																																												
3	2.05	200.0	128	5.0	0.653	3938	4057																																																												
4	2.05	199.9	125	4.9	0.644	4022	4124																																																												
5	2.06	200.7	130	5.0	0.659	4002	4138																																																												
Mean	2.06	200.5	127	5.0	0.651	3962	4078																																																												

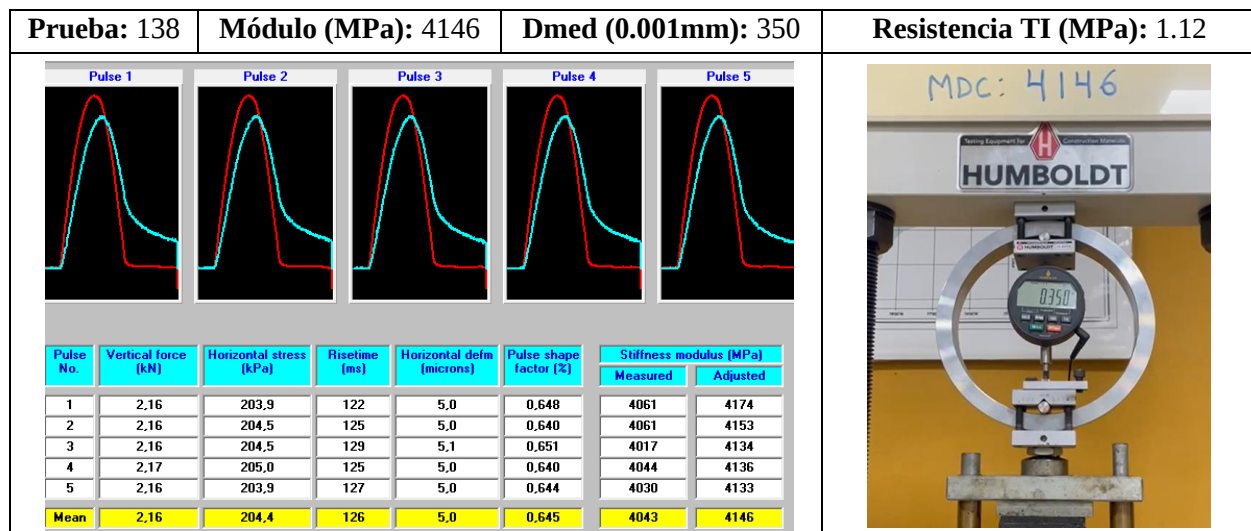
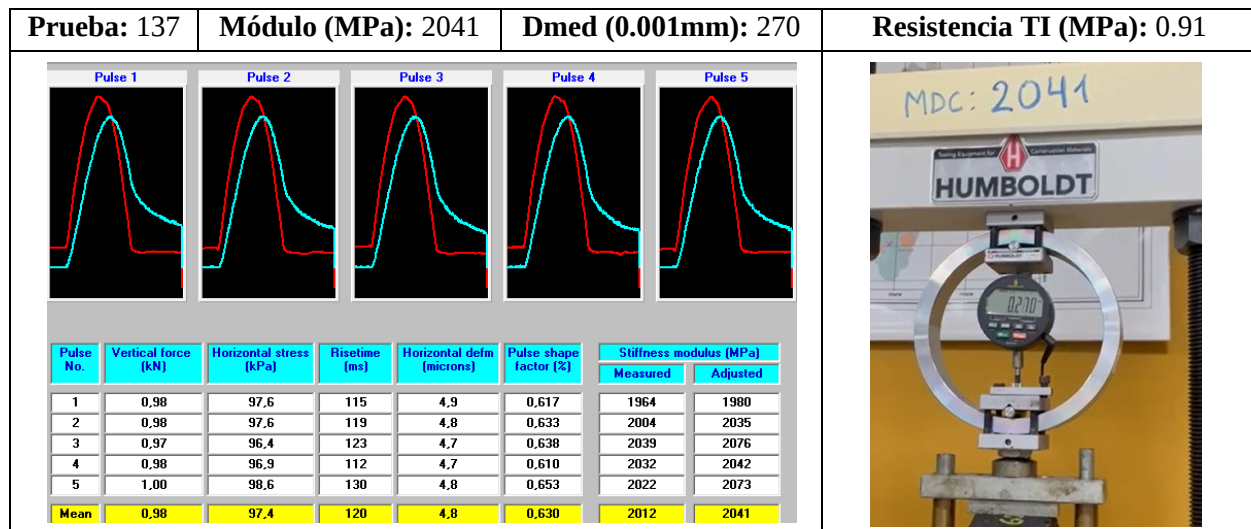
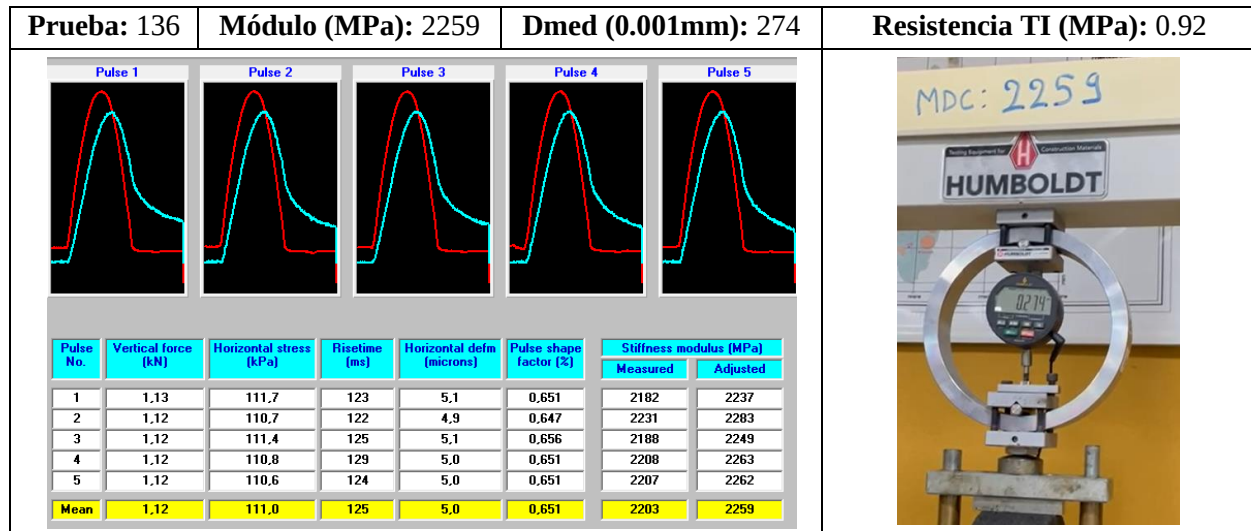
Prueba: 123	Módulo (MPa): 3427	Dmed (0.001mm): 370	Resistencia TI (MPa): 1.11																																																										
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5 <table><thead><tr><th rowspan="2">Pulse No.</th><th rowspan="2">Vertical force (kN)</th><th rowspan="2">Horizontal stress (kPa)</th><th rowspan="2">Risetime (ms)</th><th rowspan="2">Horizontal defm (microns)</th><th rowspan="2">Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus [MPa]</th></tr><tr><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>1.93</td><td>172.1</td><td>127</td><td>5.1</td><td>0.654</td><td>3344</td><td>3443</td></tr><tr><td>2</td><td>1.92</td><td>170.8</td><td>121</td><td>5.0</td><td>0.649</td><td>3377</td><td>3469</td></tr><tr><td>3</td><td>1.92</td><td>171.3</td><td>122</td><td>5.0</td><td>0.653</td><td>3379</td><td>3478</td></tr><tr><td>4</td><td>1.93</td><td>171.9</td><td>123</td><td>5.2</td><td>0.638</td><td>3289</td><td>3358</td></tr><tr><td>5</td><td>1.93</td><td>172.3</td><td>128</td><td>5.2</td><td>0.653</td><td>3294</td><td>3389</td></tr><tr><td>Mean</td><td>1.93</td><td>171.7</td><td>124</td><td>5.1</td><td>0.649</td><td>3337</td><td>3427</td></tr></tbody></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus [MPa]		Measured	Adjusted	1	1.93	172.1	127	5.1	0.654	3344	3443	2	1.92	170.8	121	5.0	0.649	3377	3469	3	1.92	171.3	122	5.0	0.653	3379	3478	4	1.93	171.9	123	5.2	0.638	3289	3358	5	1.93	172.3	128	5.2	0.653	3294	3389	Mean	1.93	171.7	124	5.1	0.649	3337	3427	MDC: 3427 HUMBOLDT 0.370
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)							Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus [MPa]																																																	
			Measured	Adjusted																																																									
1	1.93	172.1	127	5.1	0.654	3344	3443																																																						
2	1.92	170.8	121	5.0	0.649	3377	3469																																																						
3	1.92	171.3	122	5.0	0.653	3379	3478																																																						
4	1.93	171.9	123	5.2	0.638	3289	3358																																																						
5	1.93	172.3	128	5.2	0.653	3294	3389																																																						
Mean	1.93	171.7	124	5.1	0.649	3337	3427																																																						

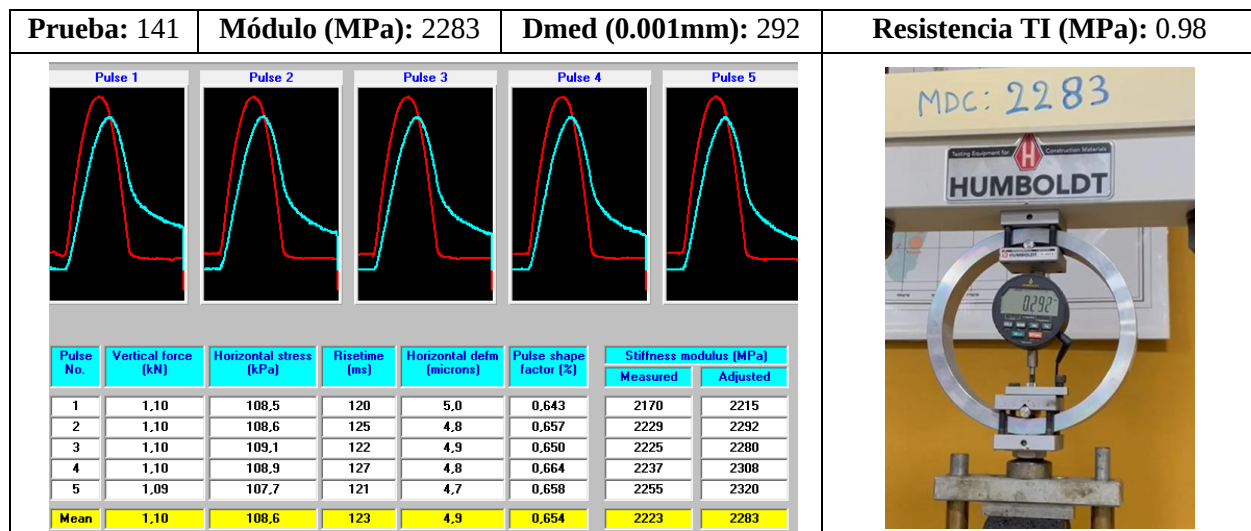
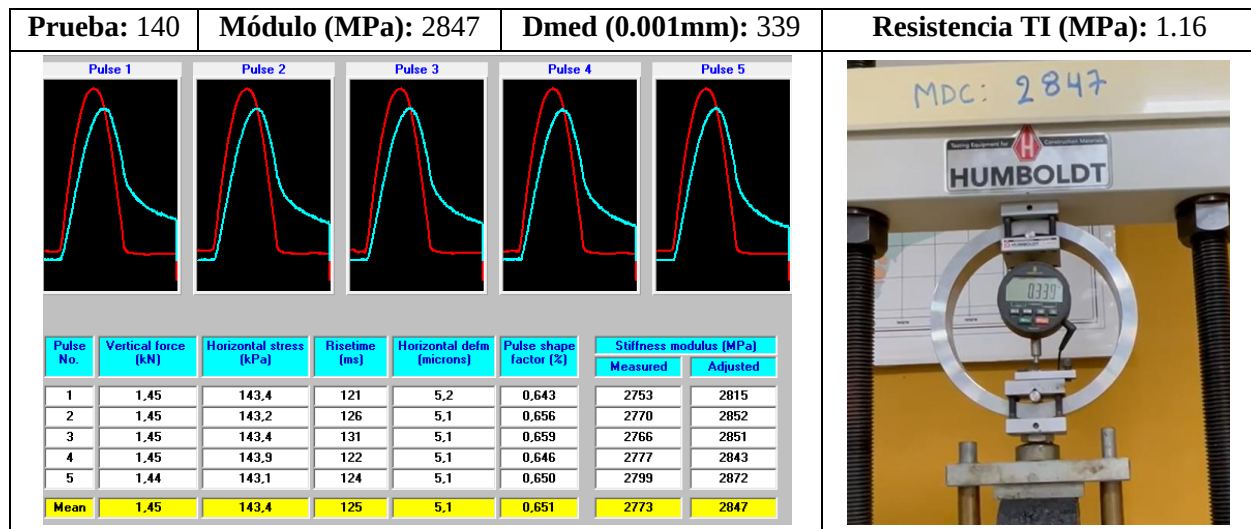
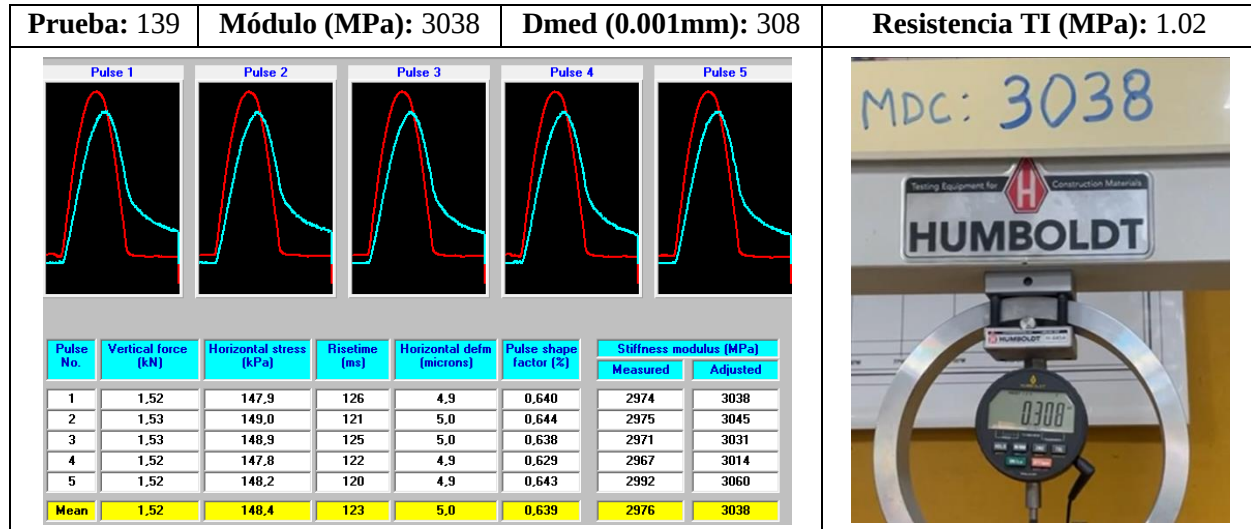


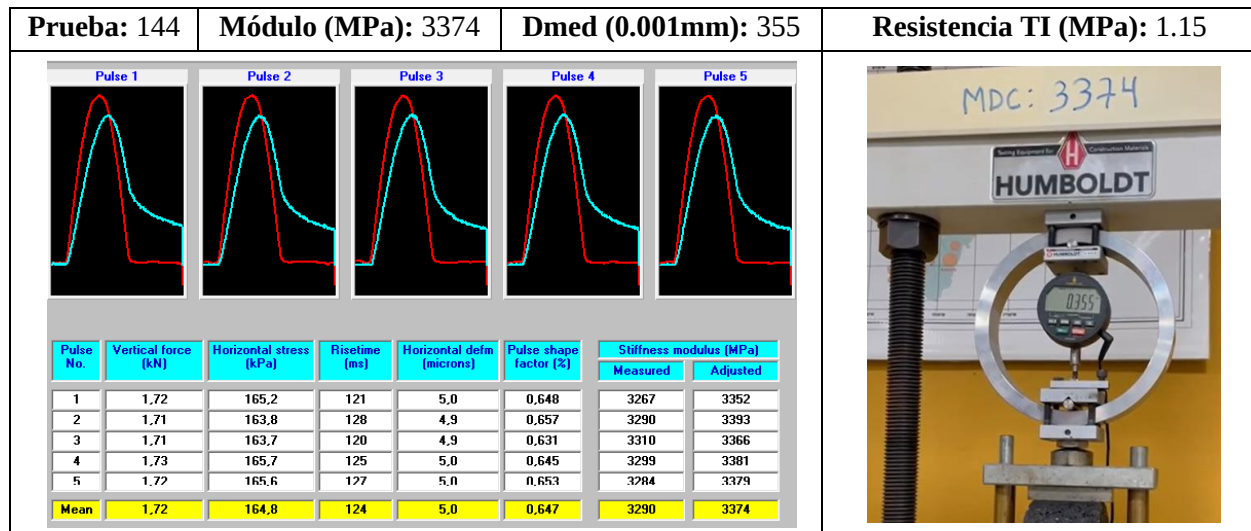
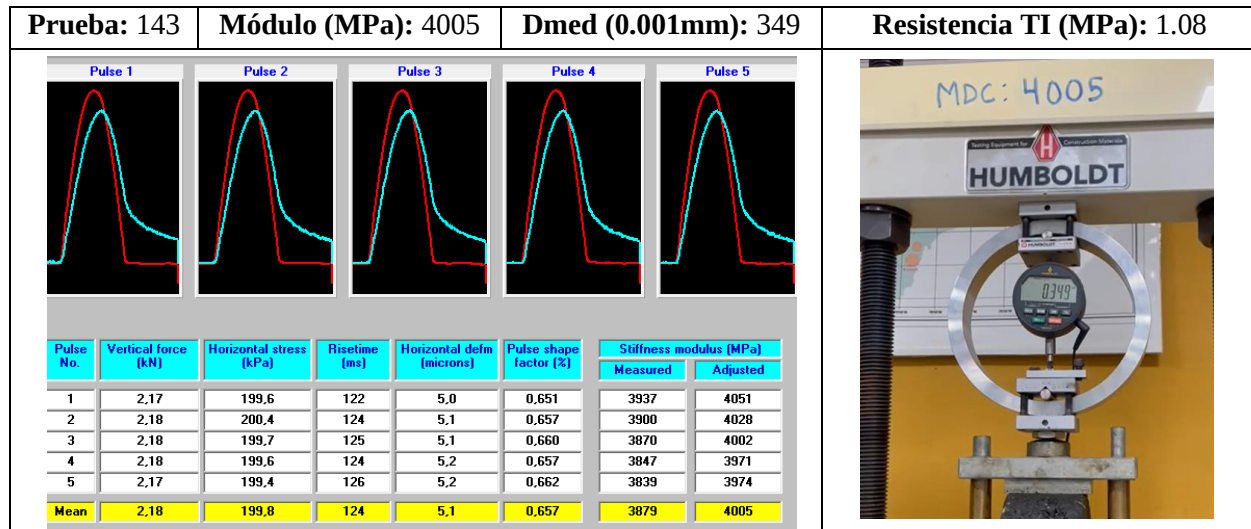
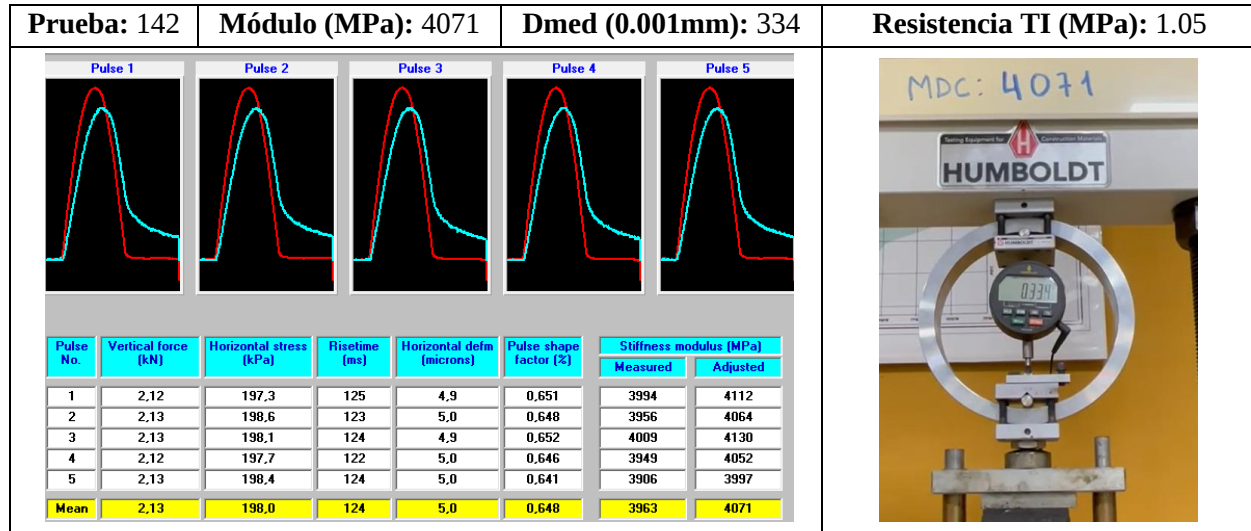


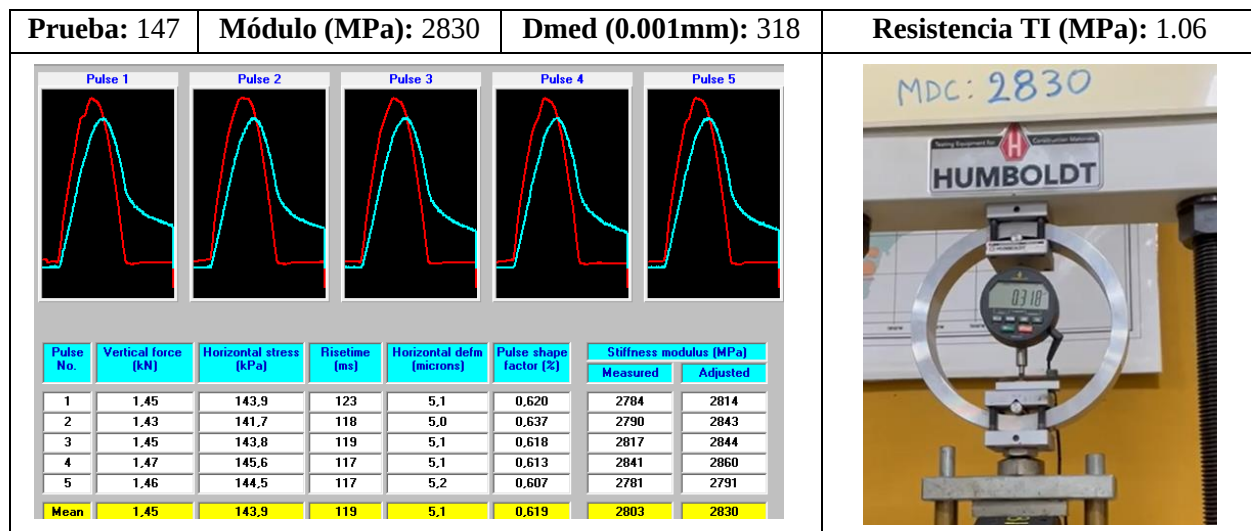
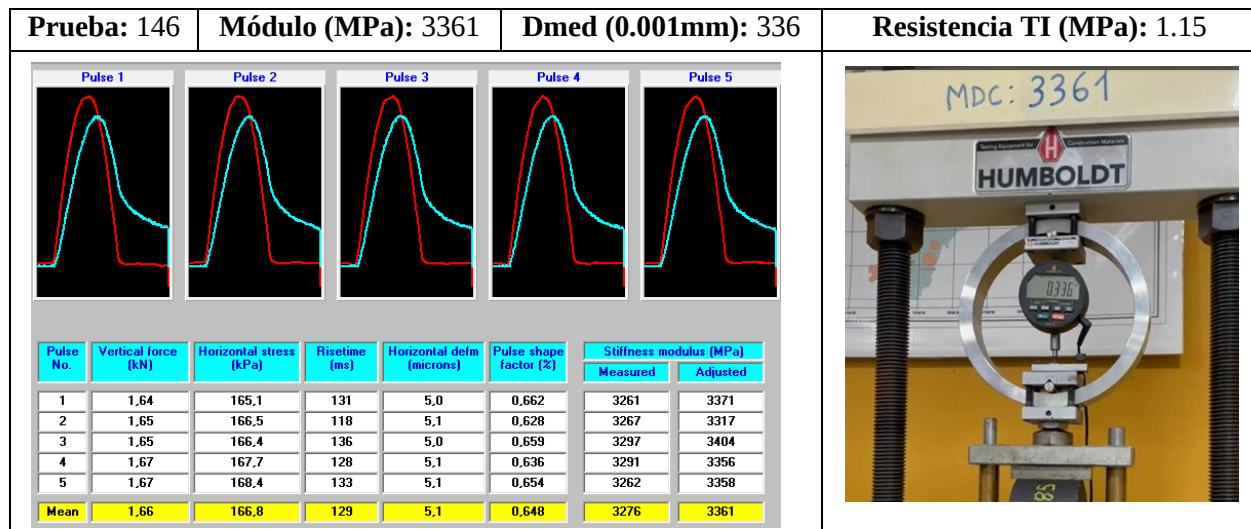
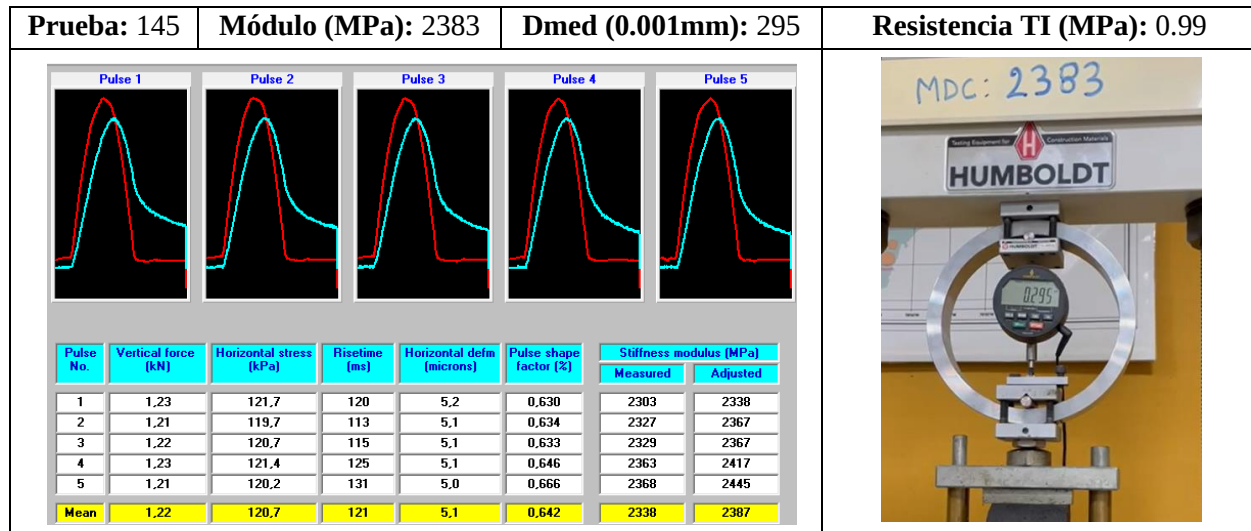


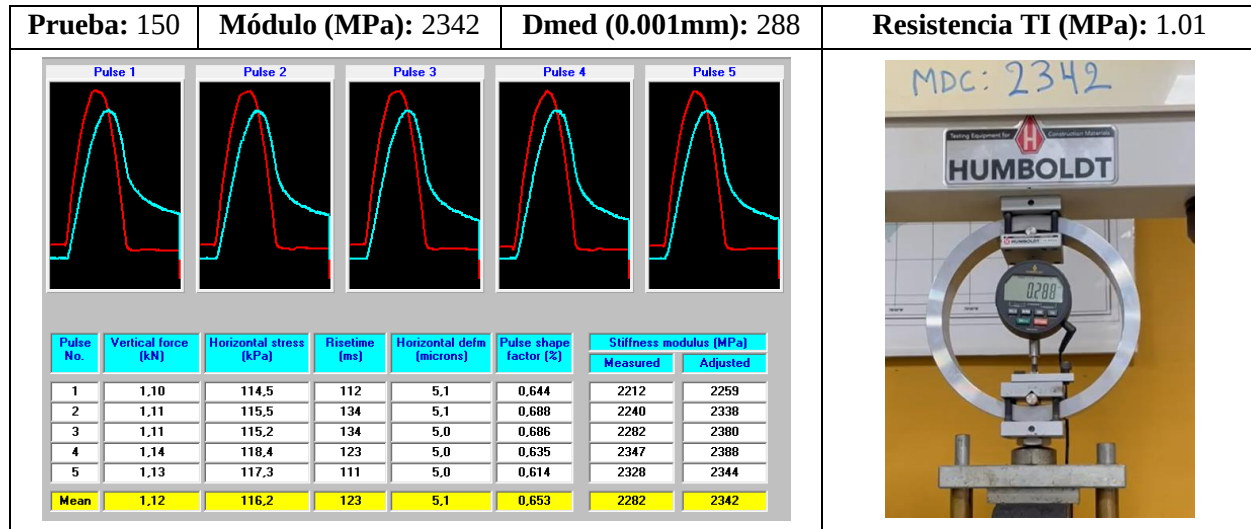
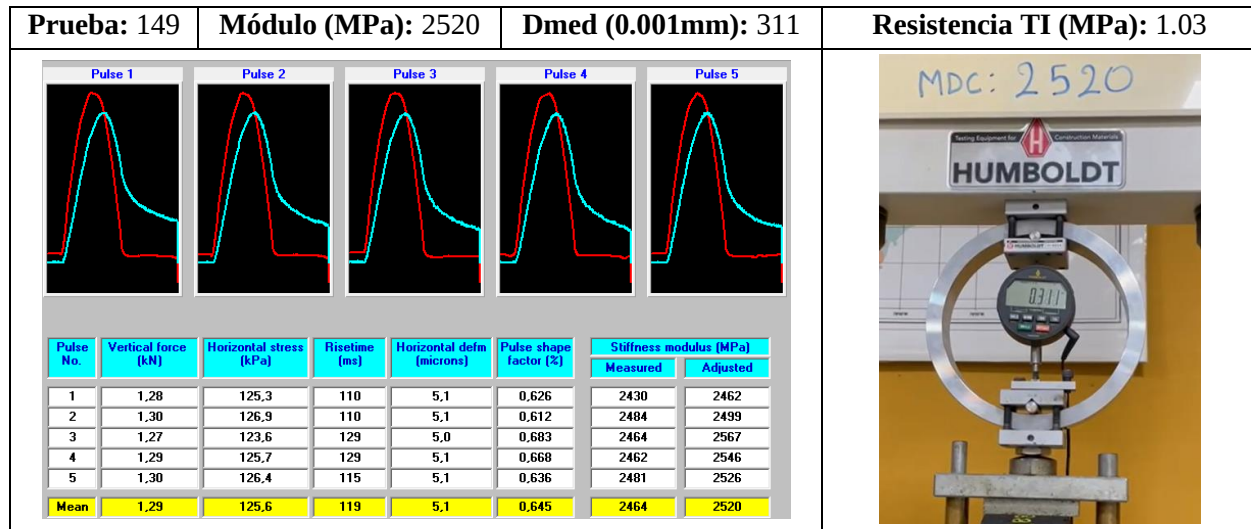
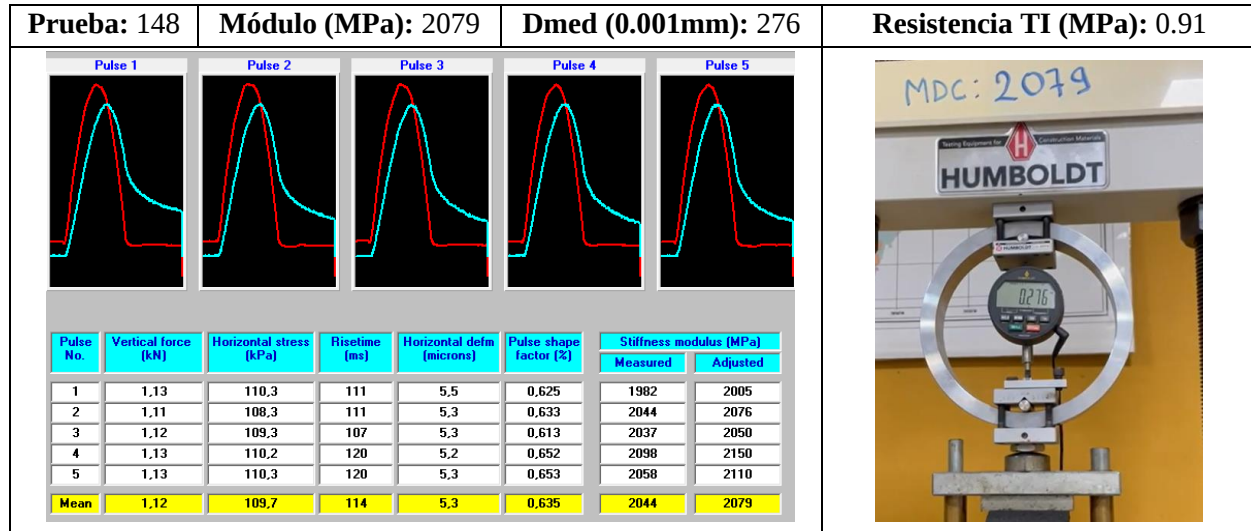


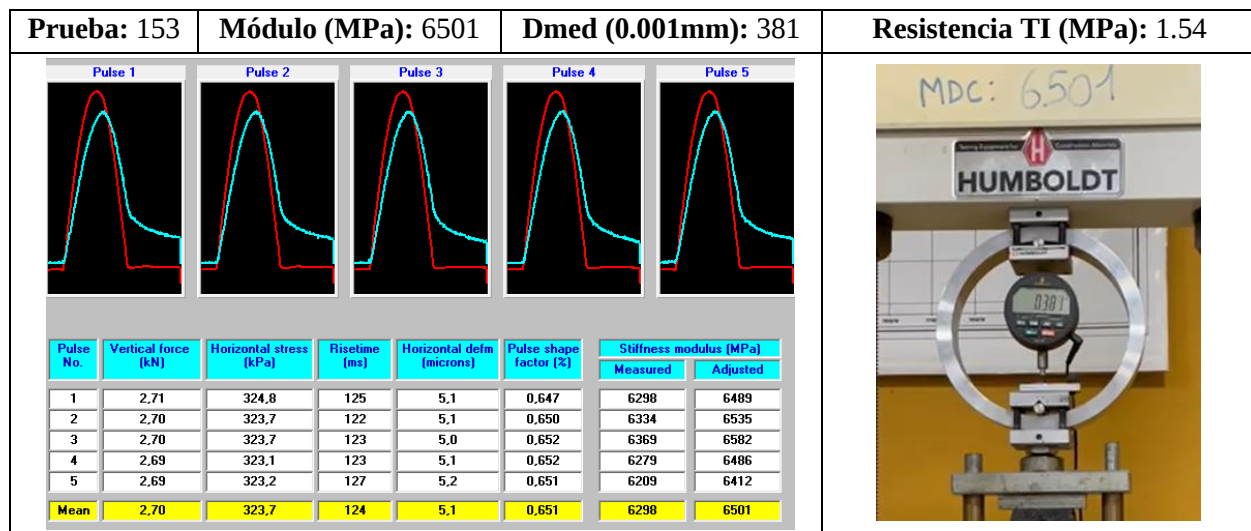
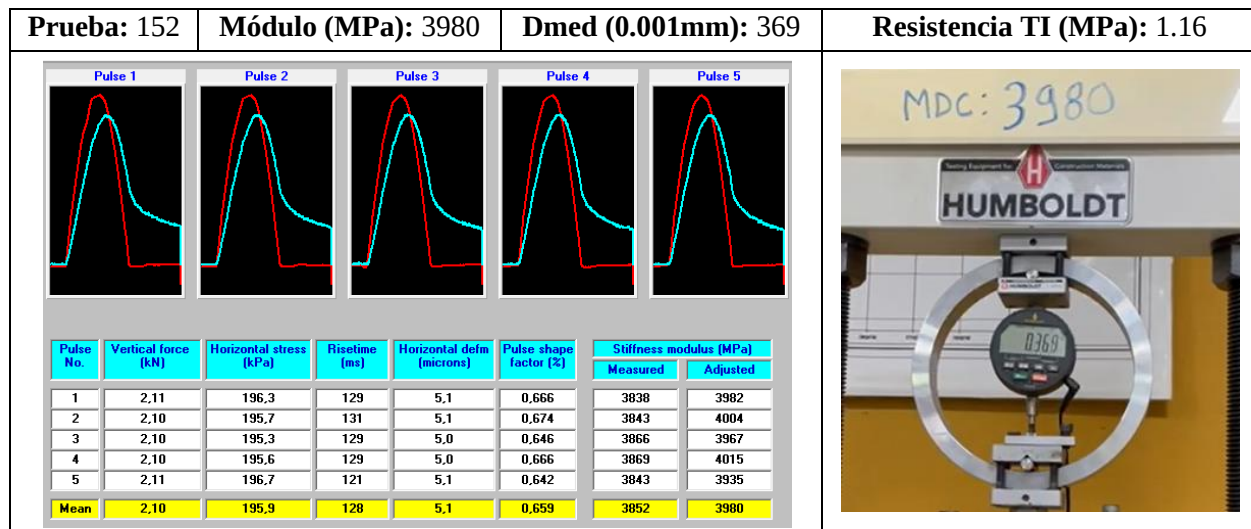
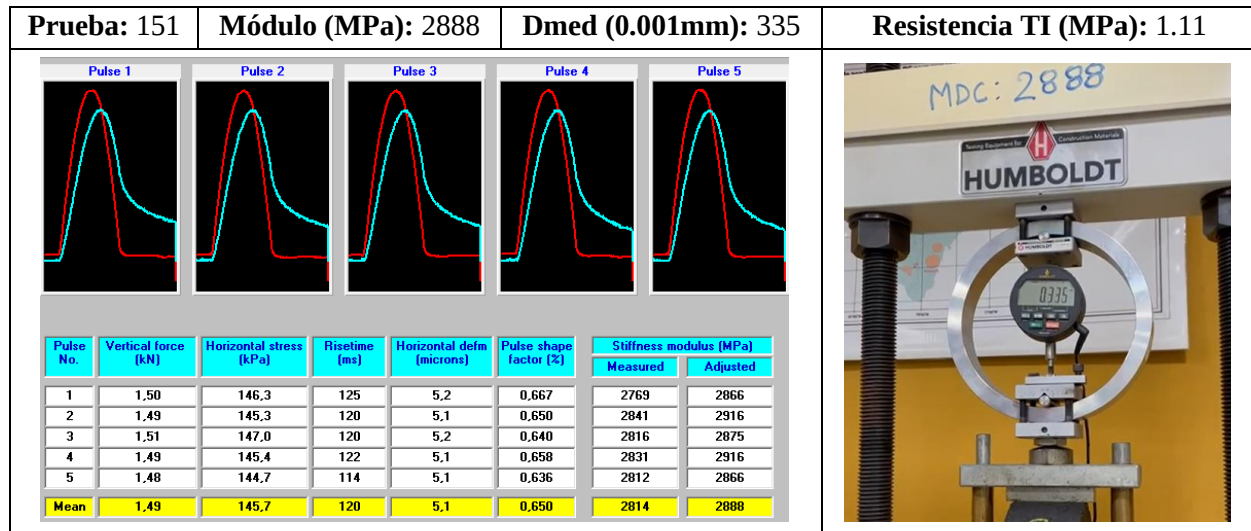


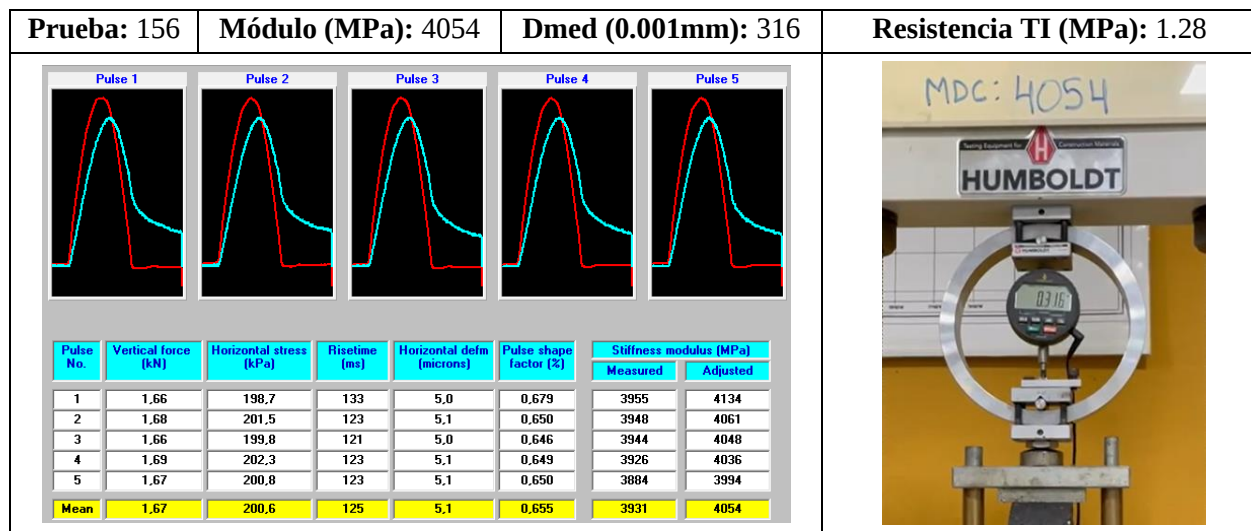
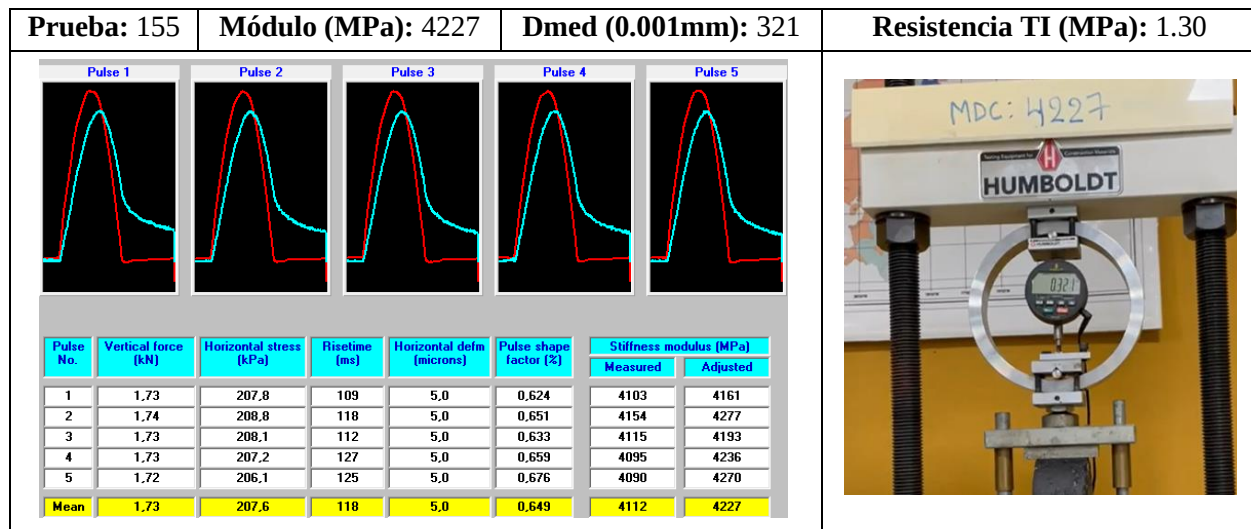
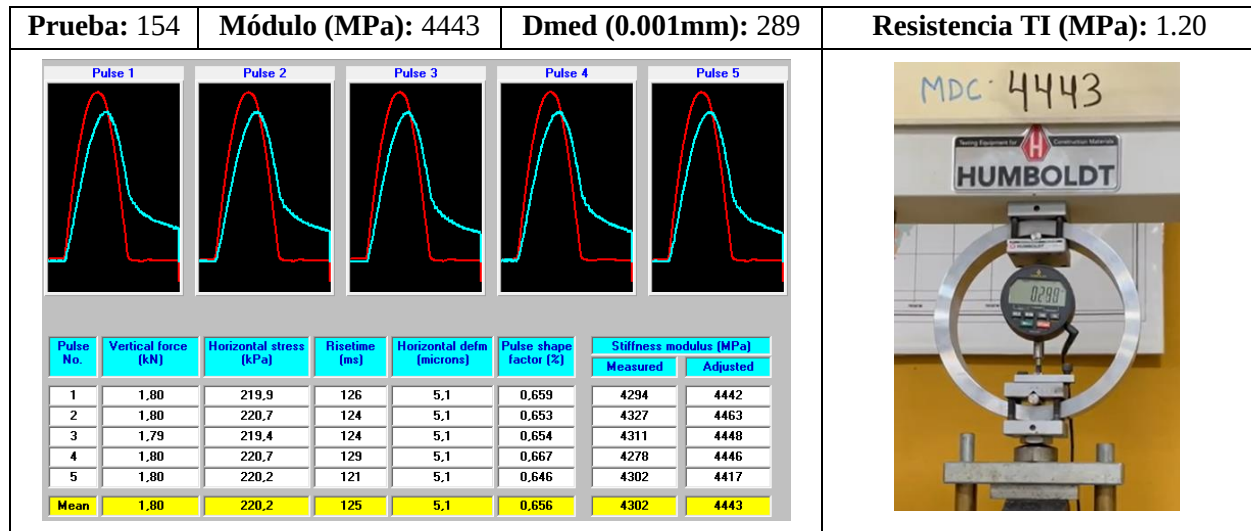


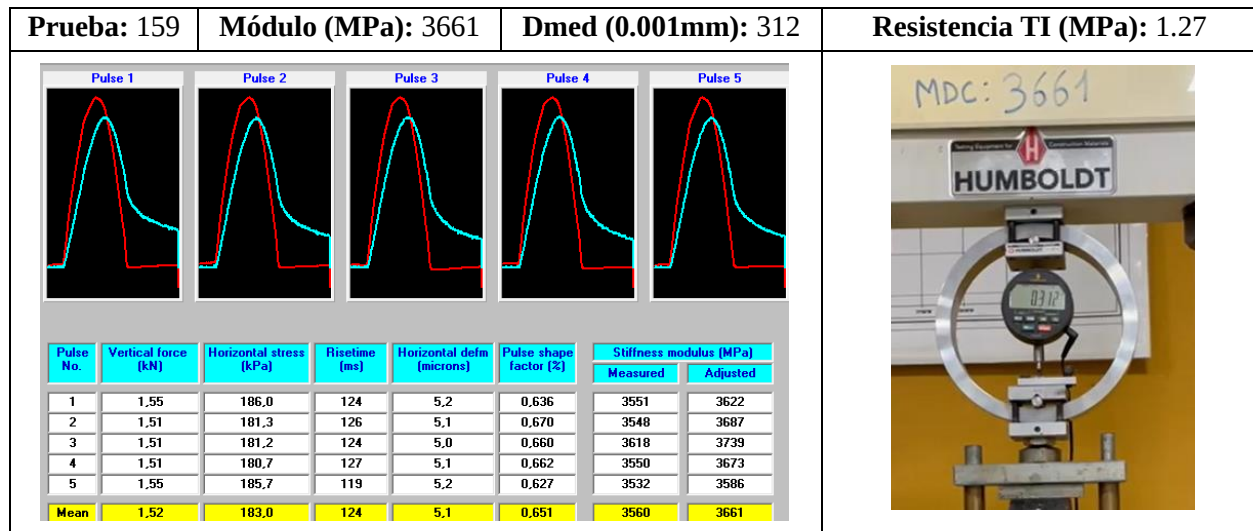
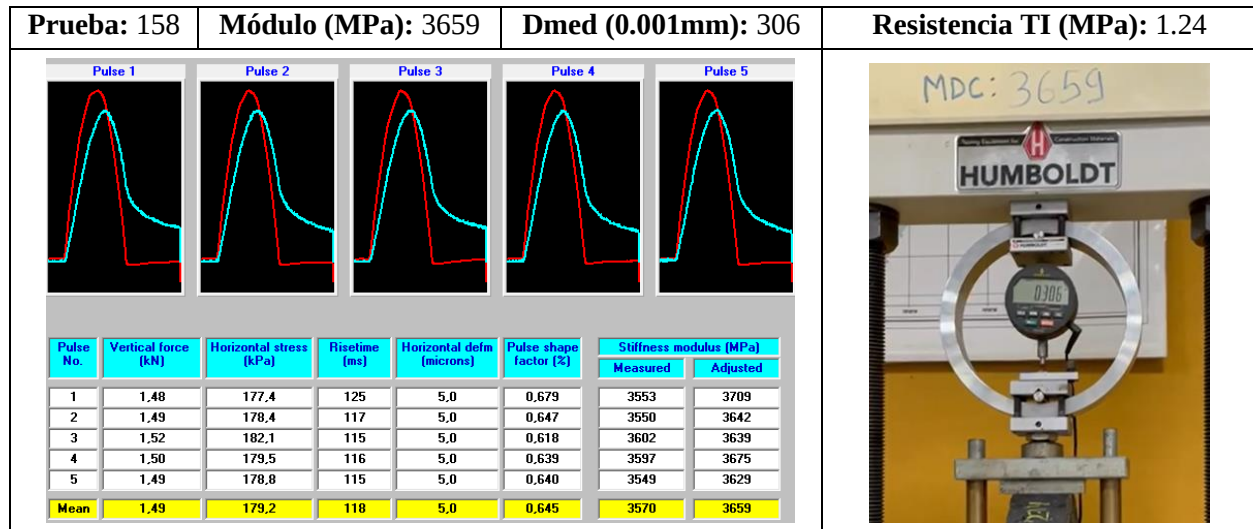
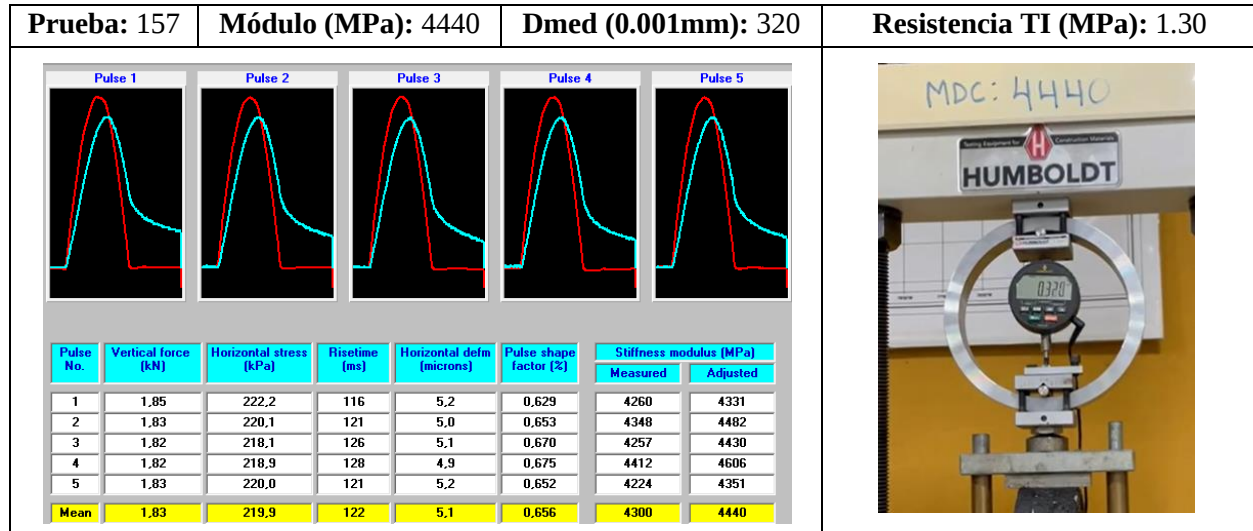


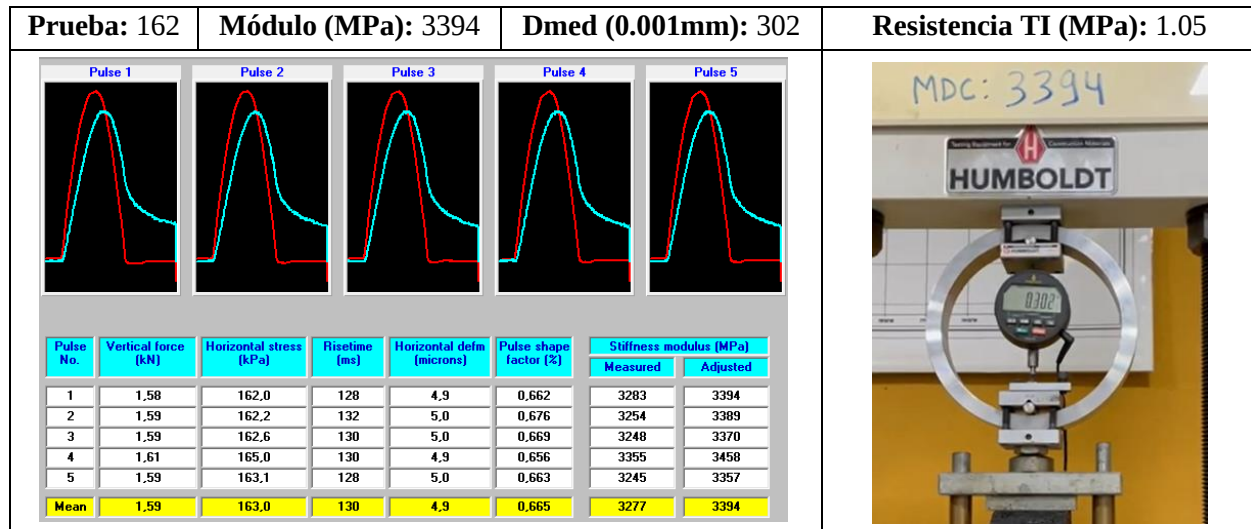
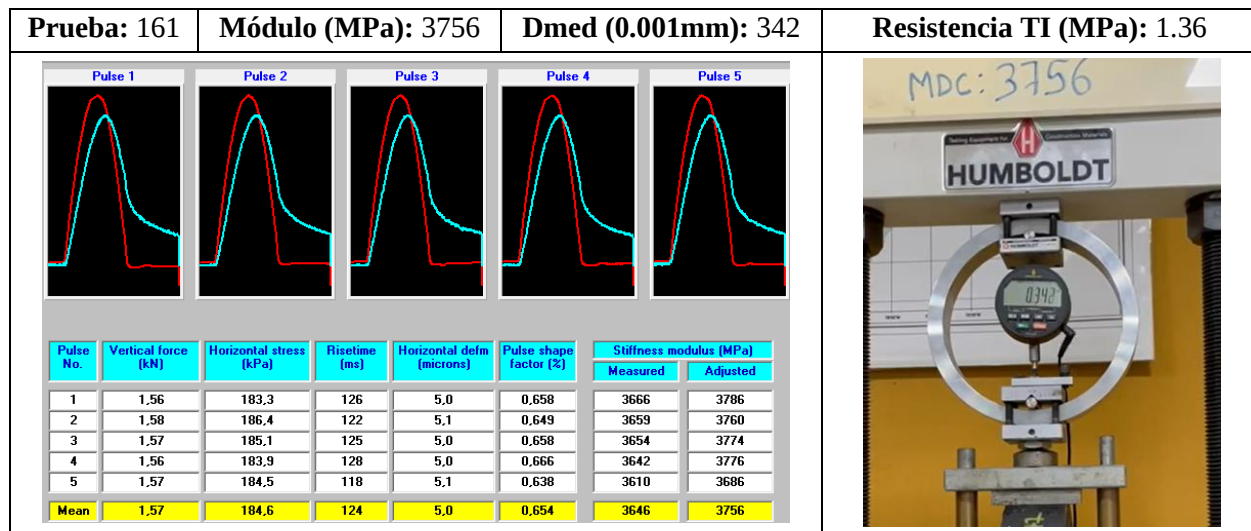
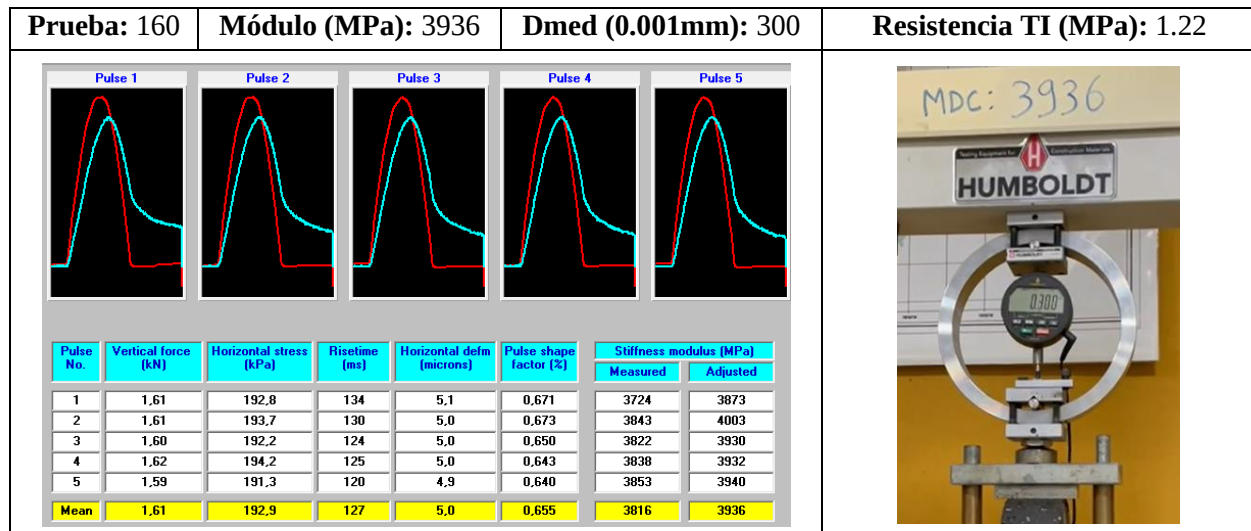


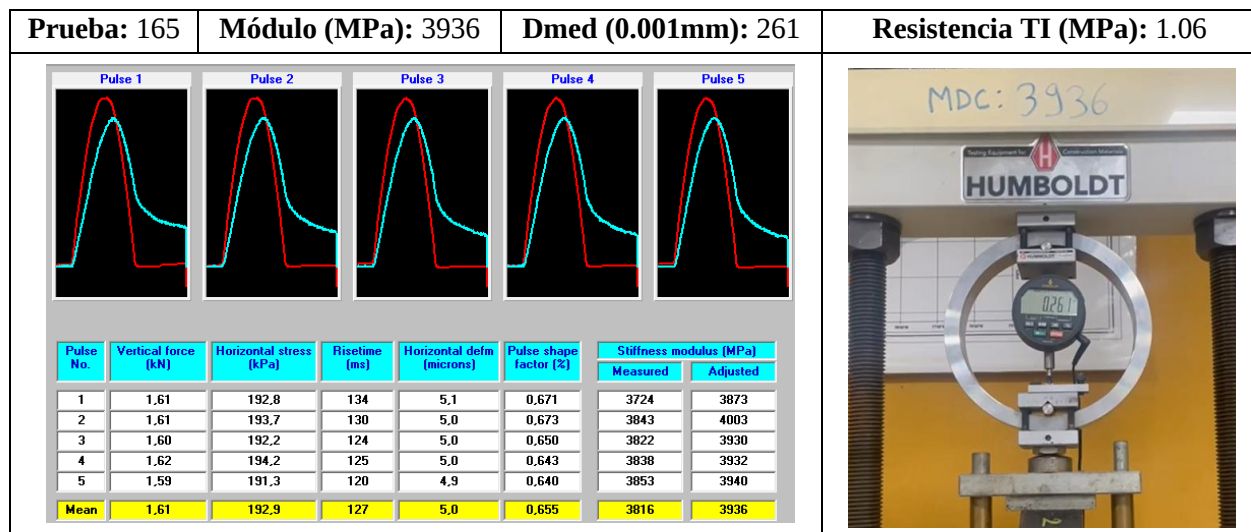
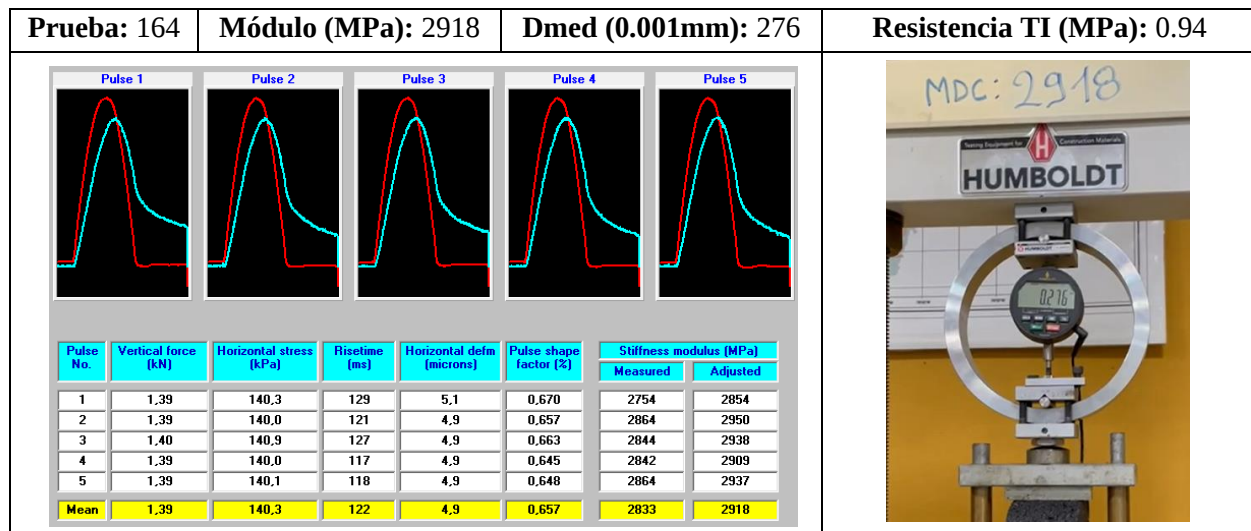
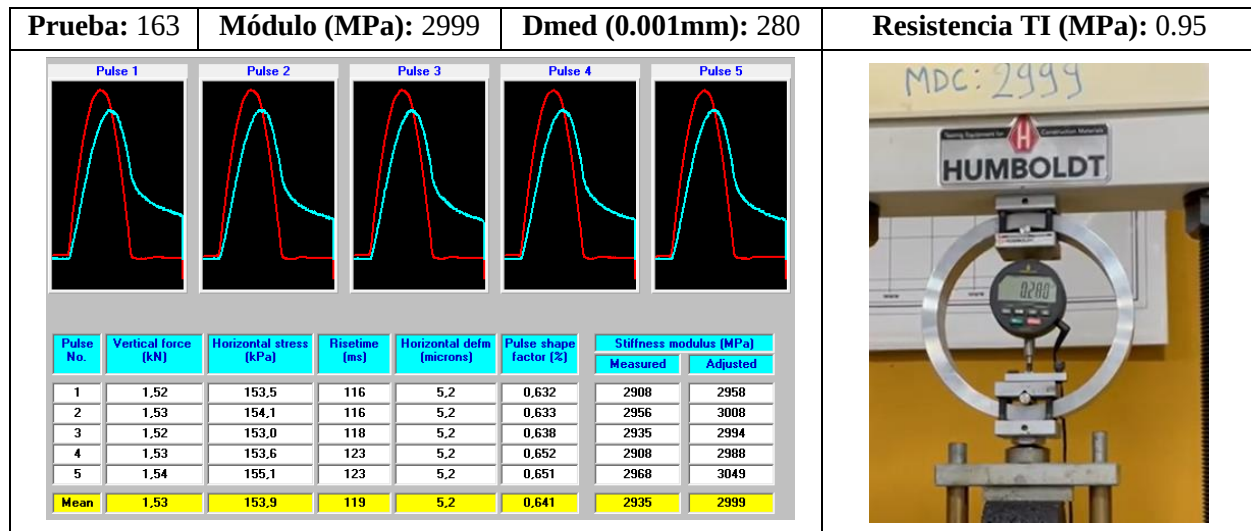


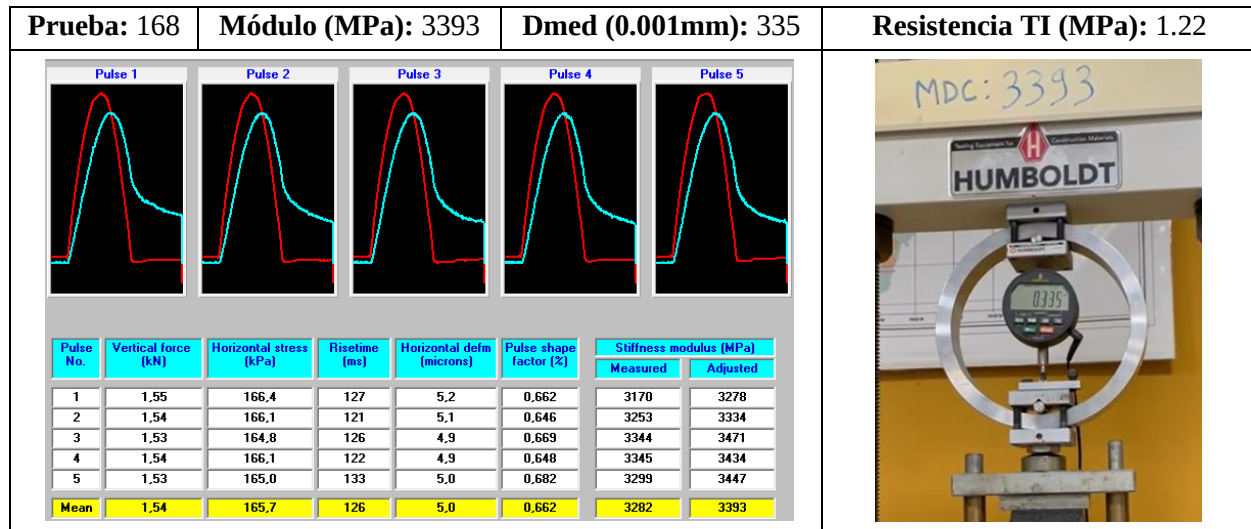
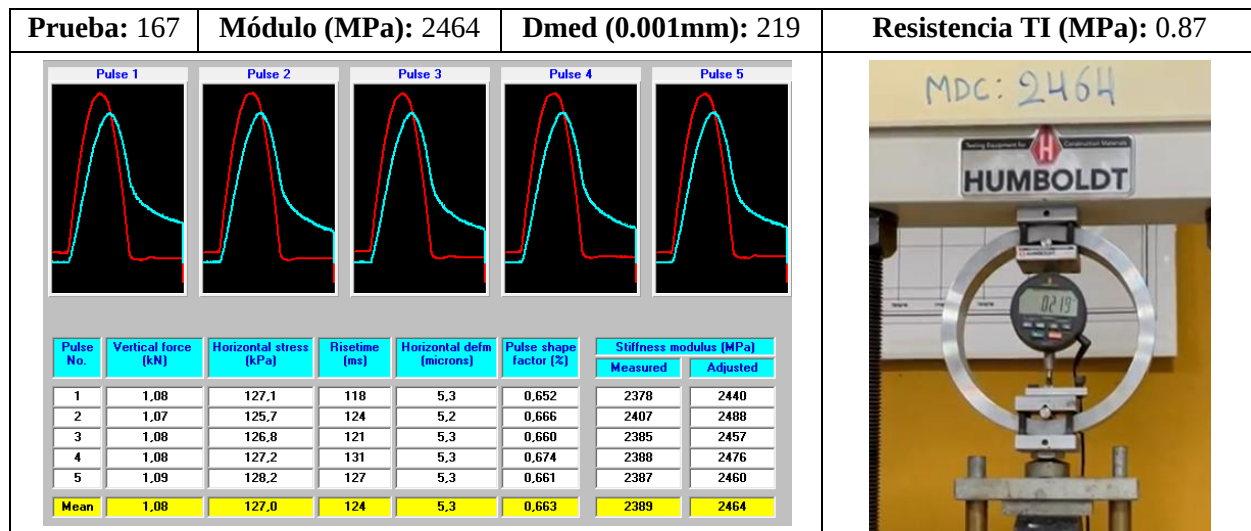
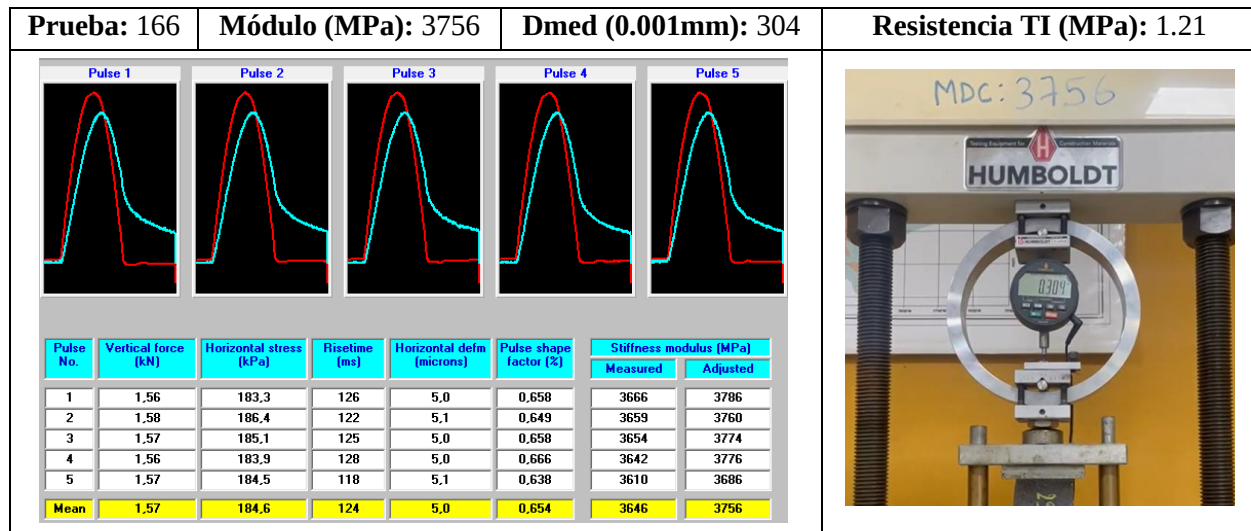


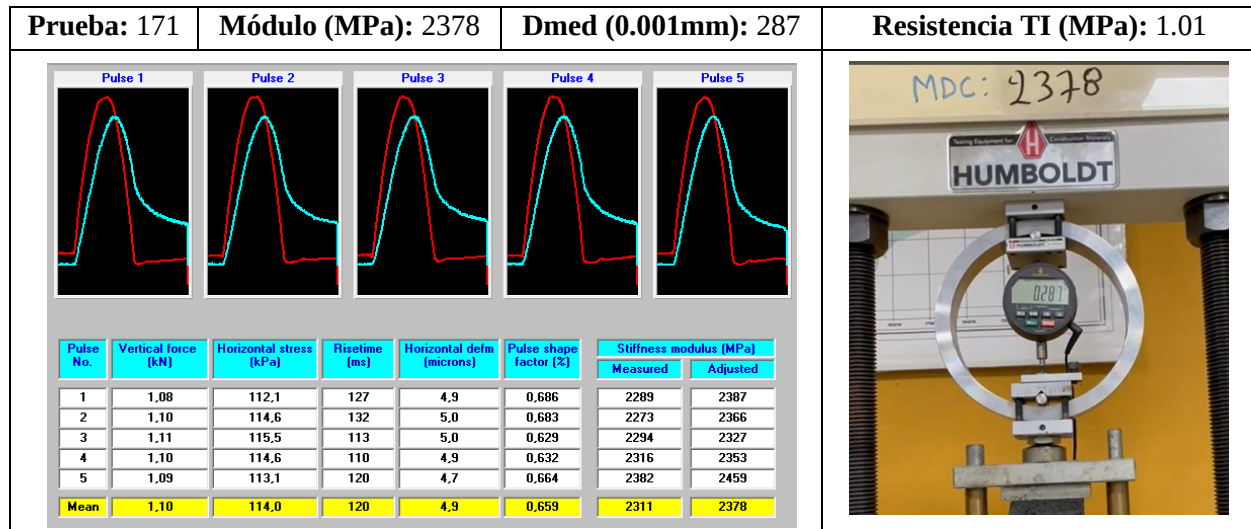
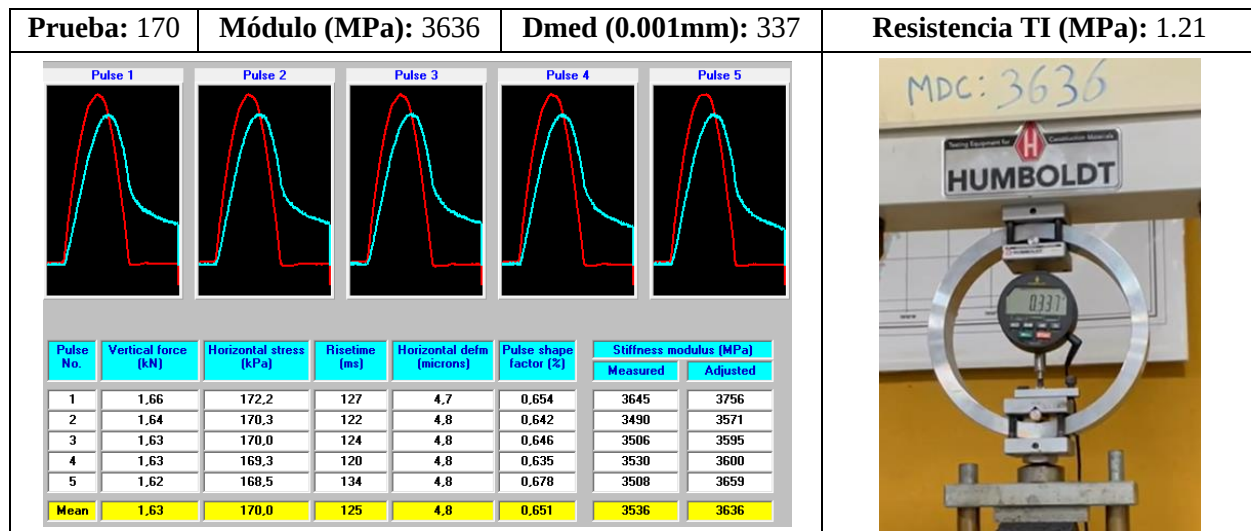
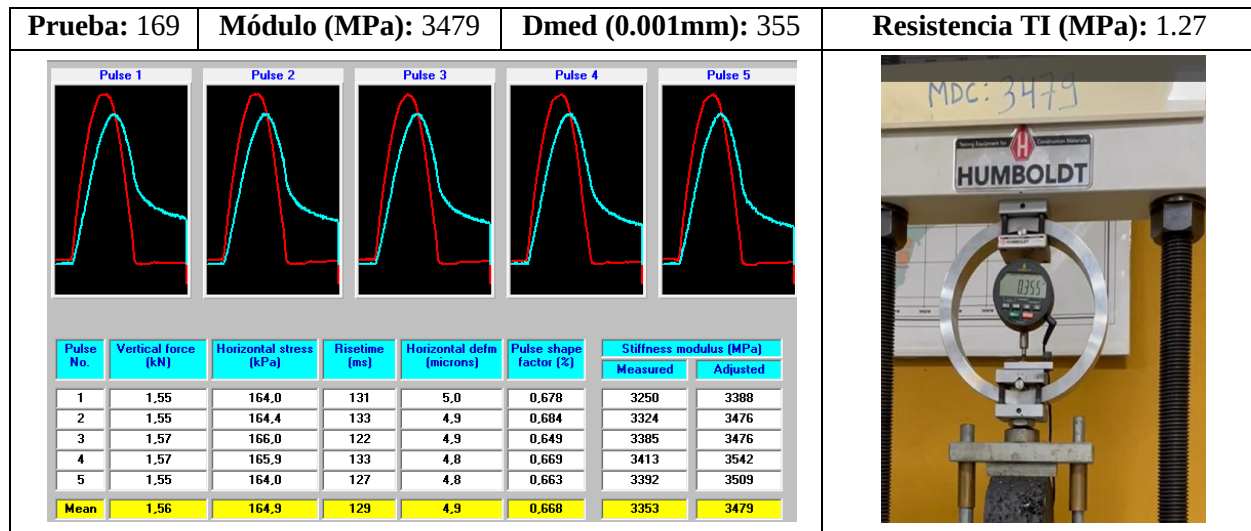


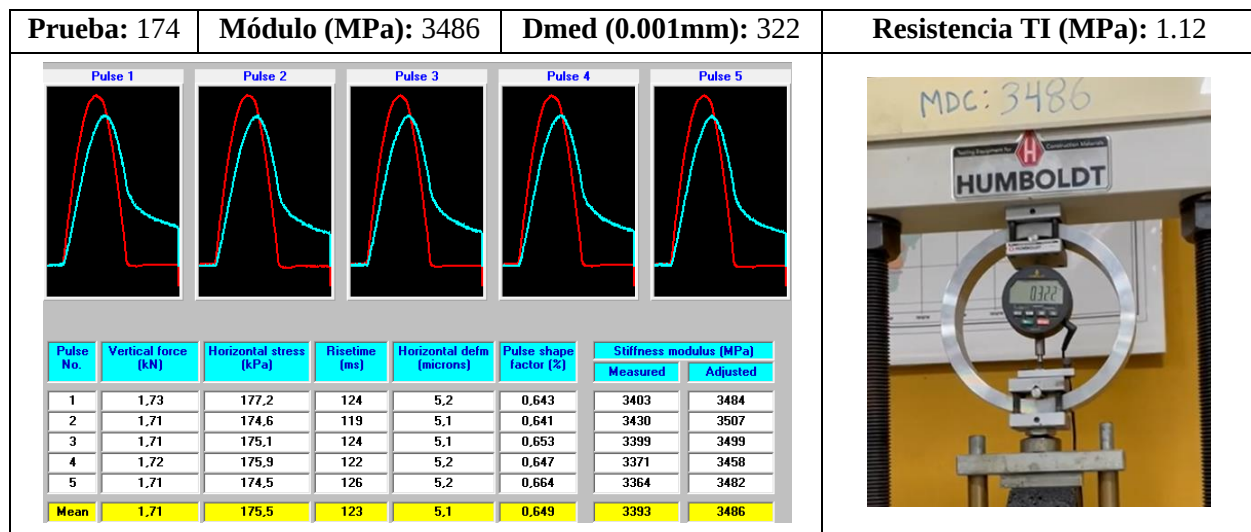
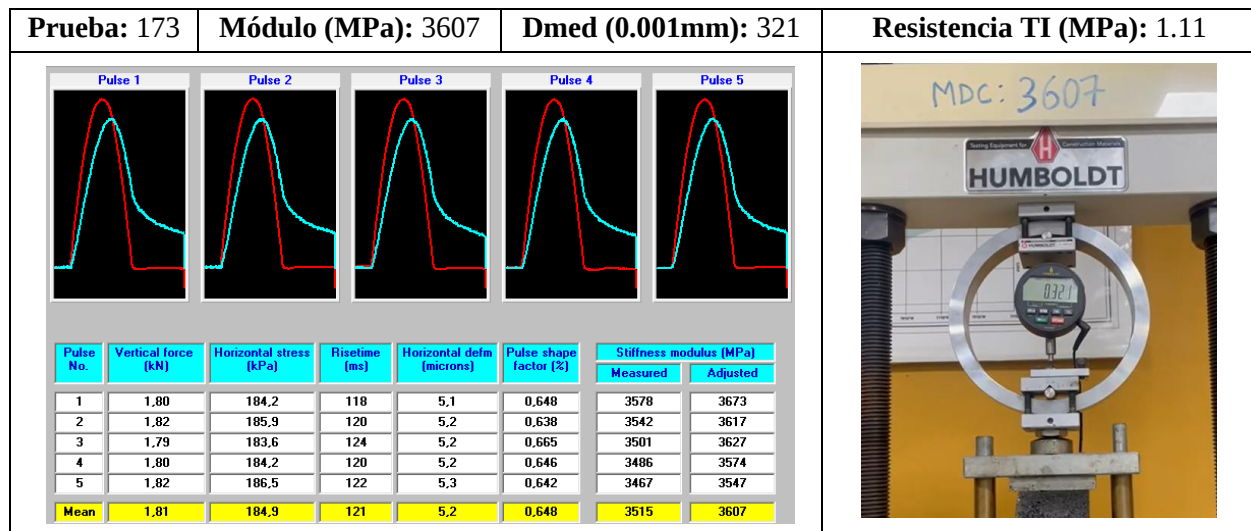
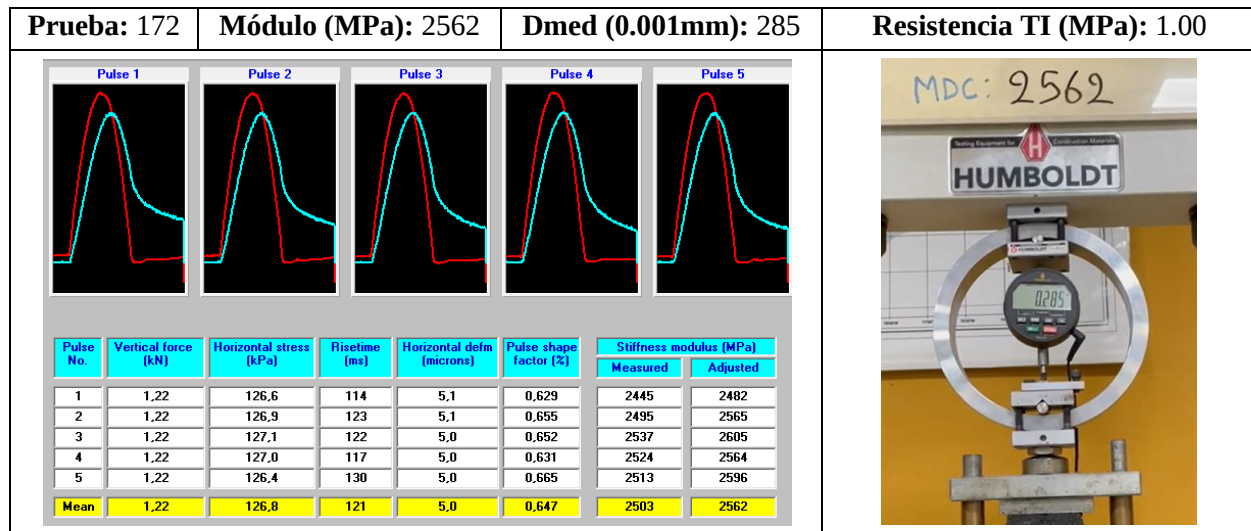


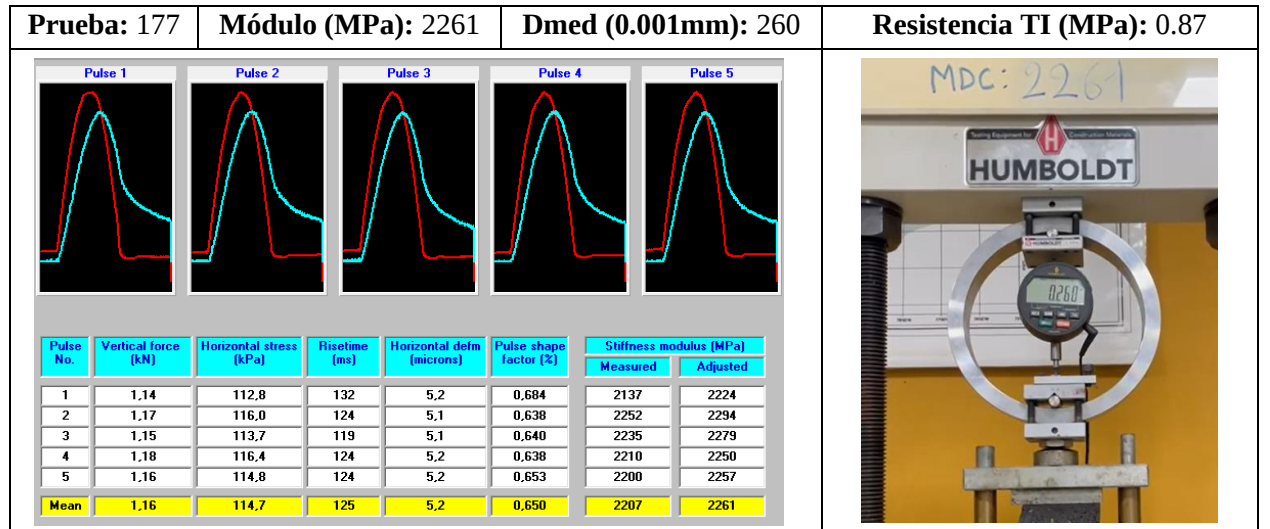
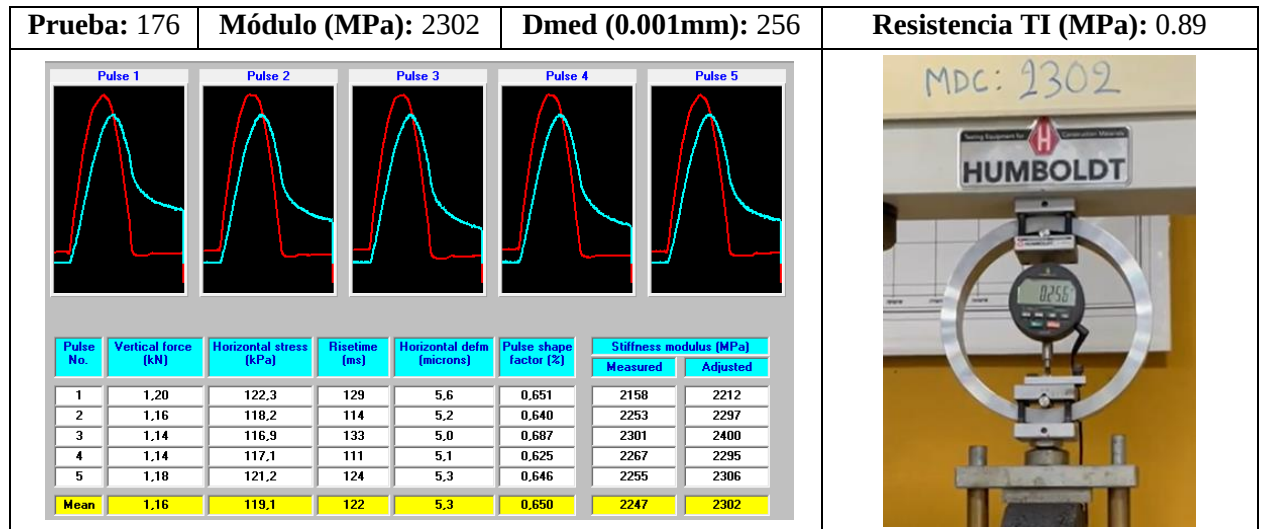
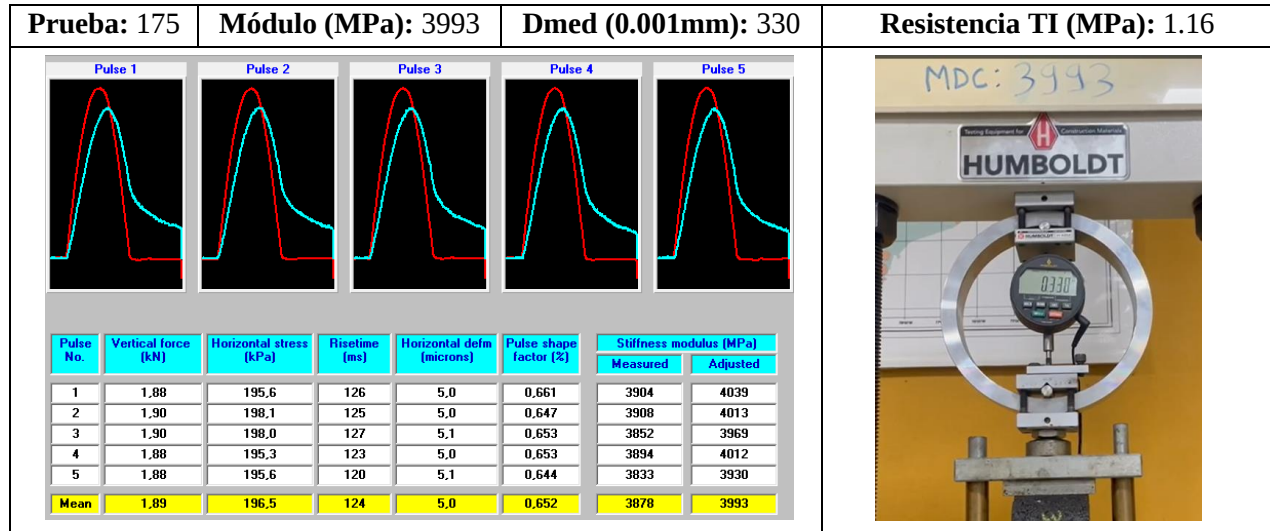








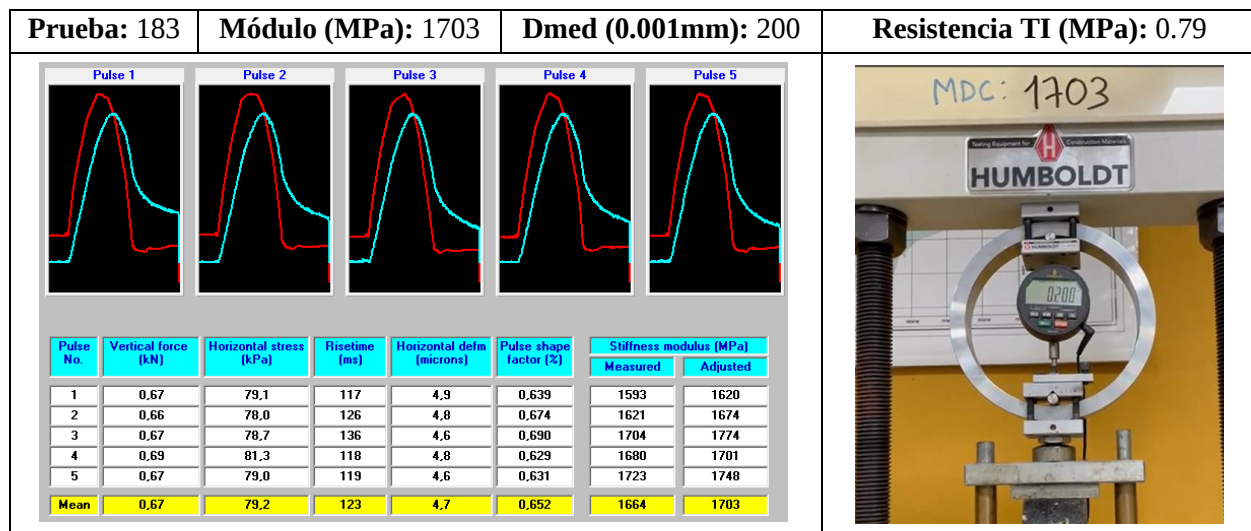
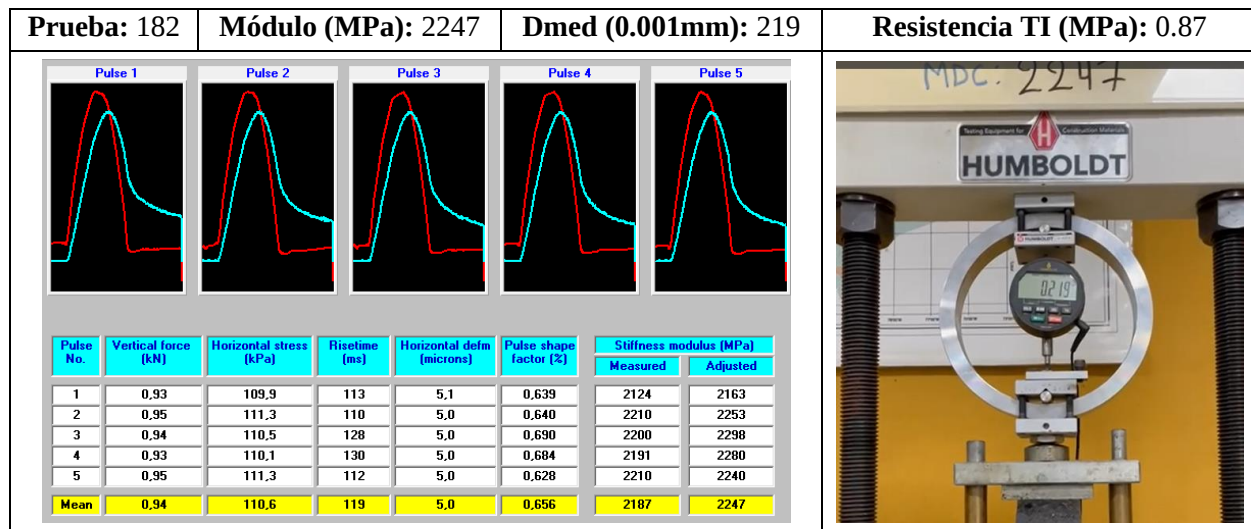
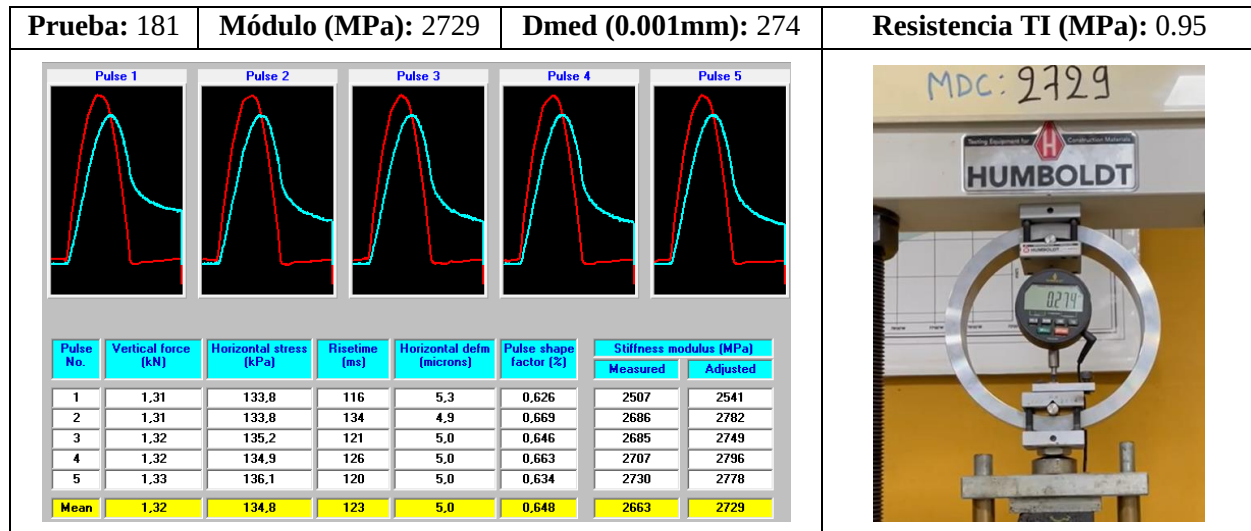


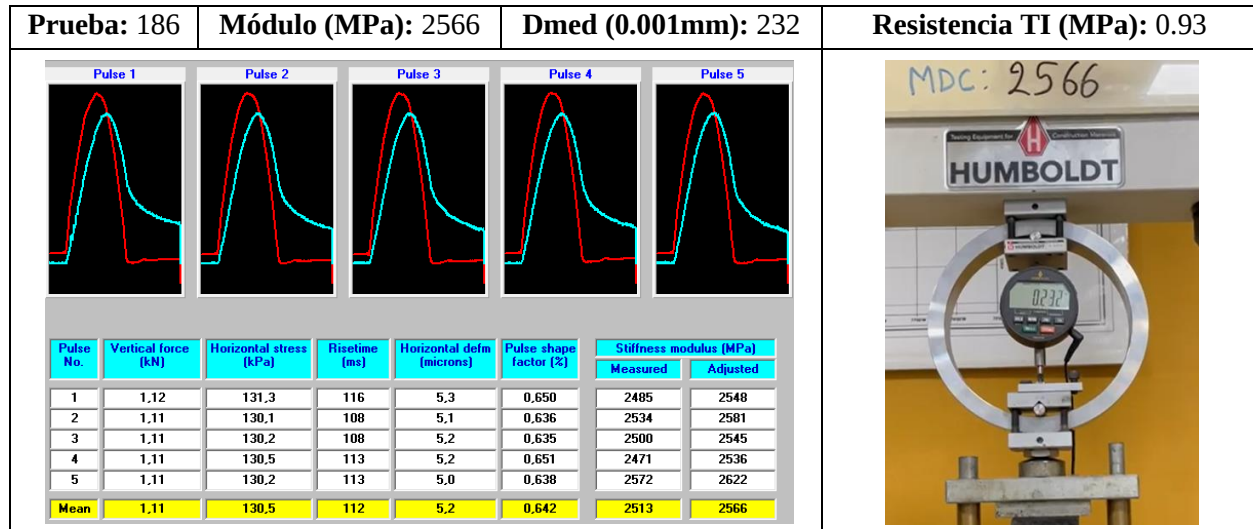
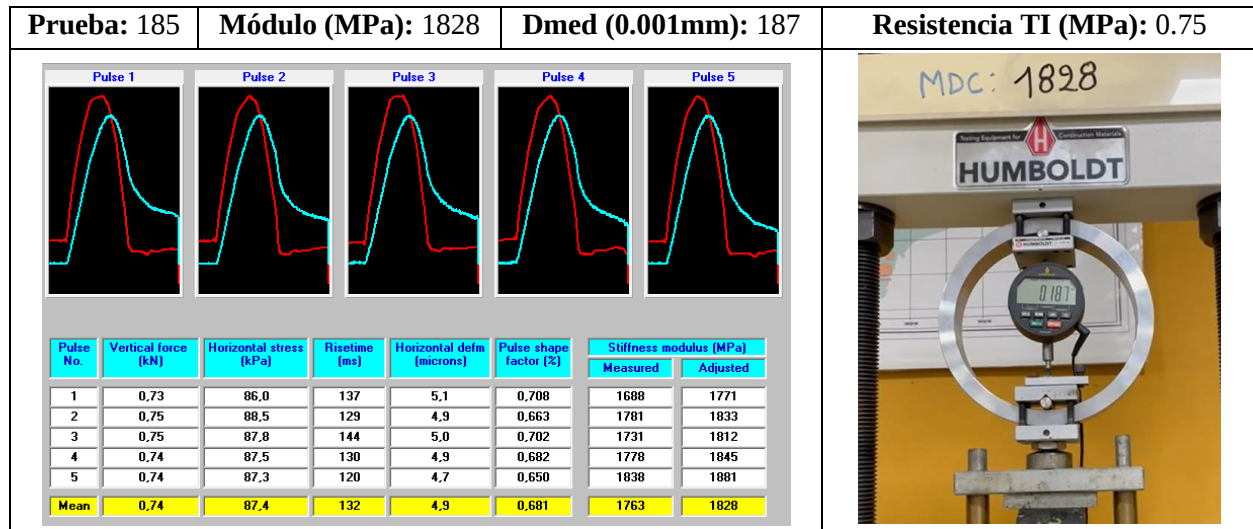
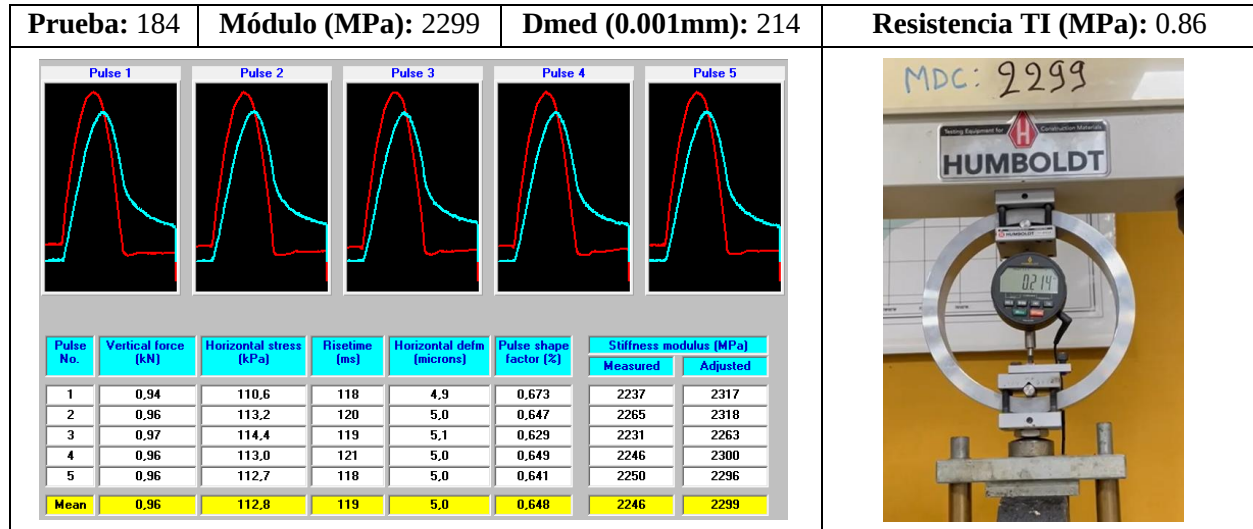


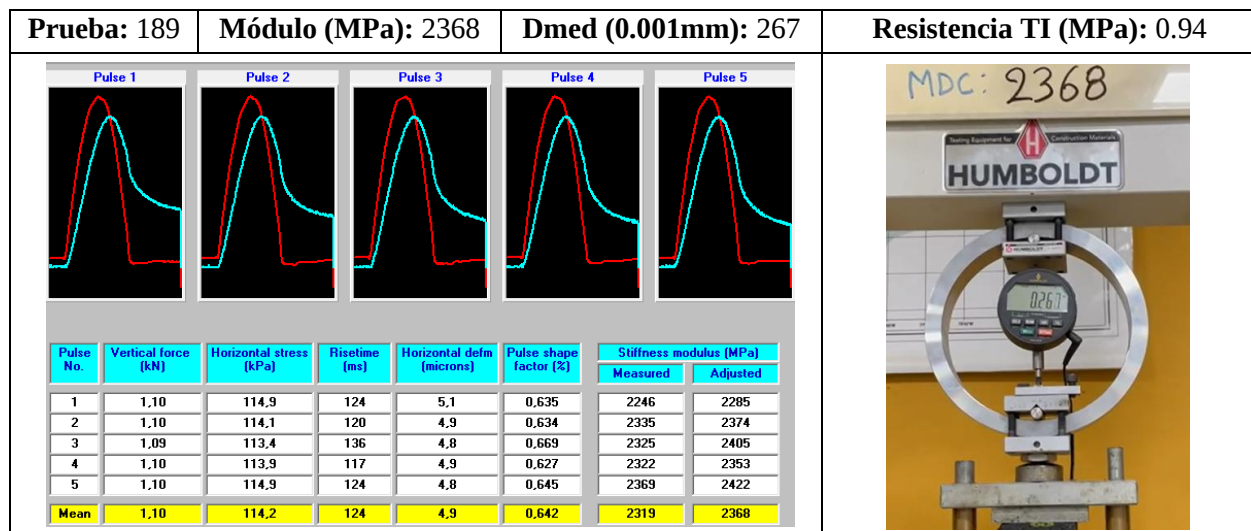
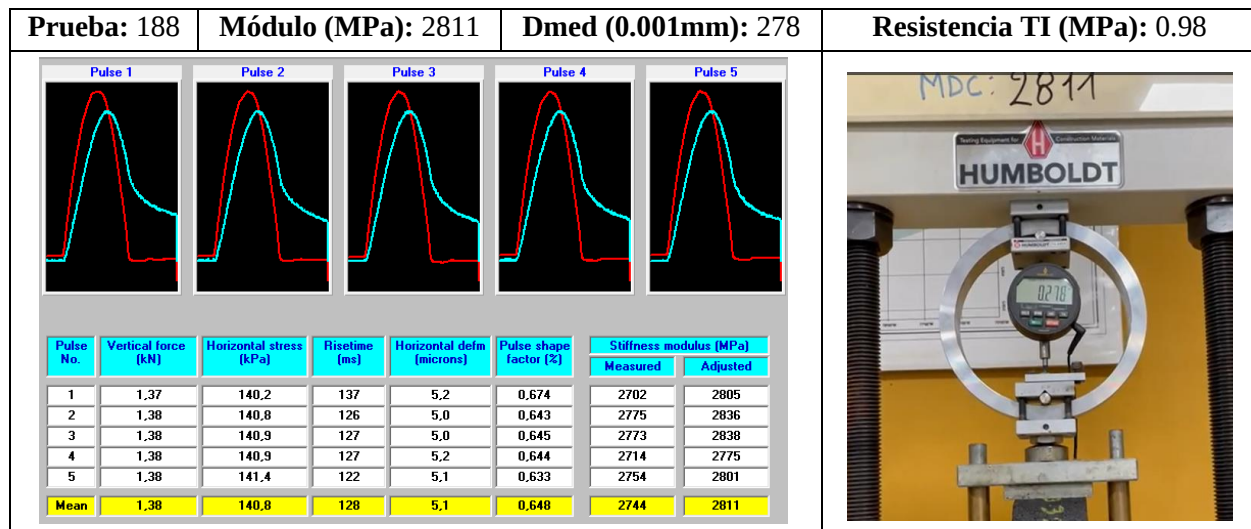
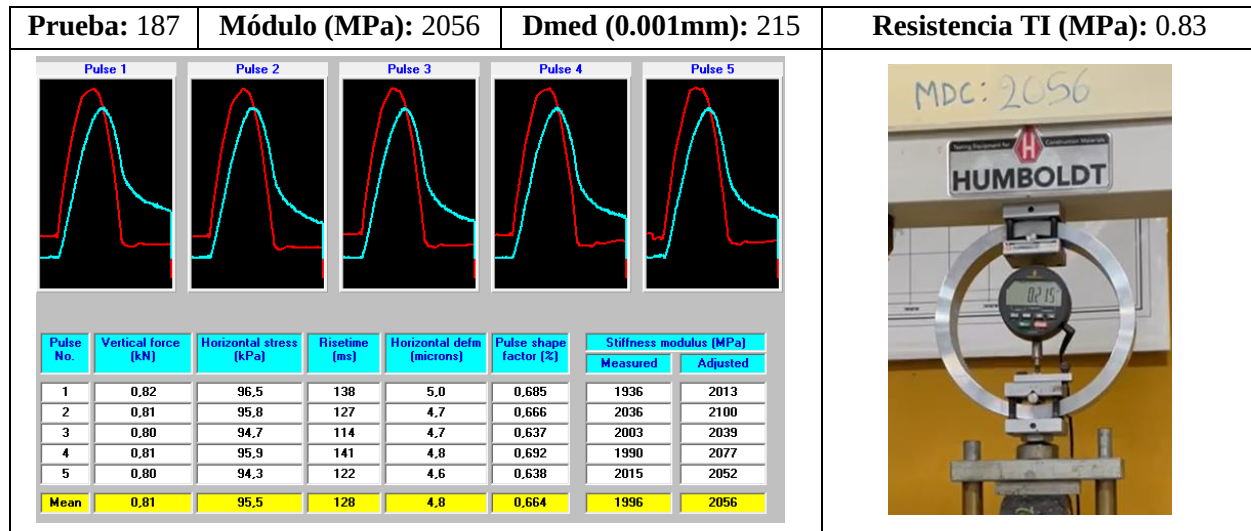
Prueba: 178	Módulo (MPa): 2027	Dmed (0.001mm): 234	Resistencia TI (MPa): 0.81
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5			MDC: 2027 </

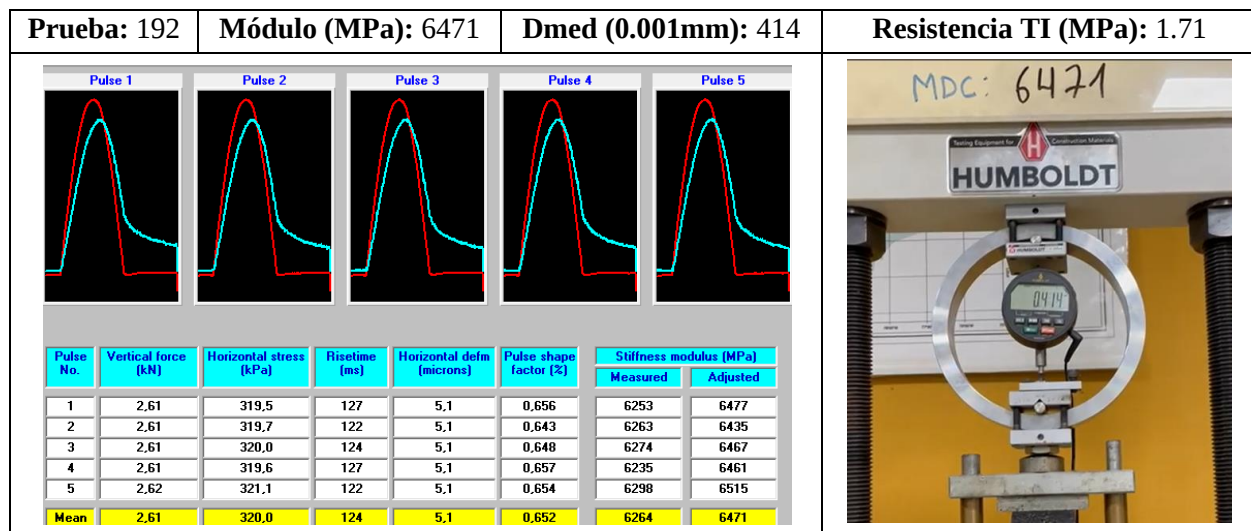
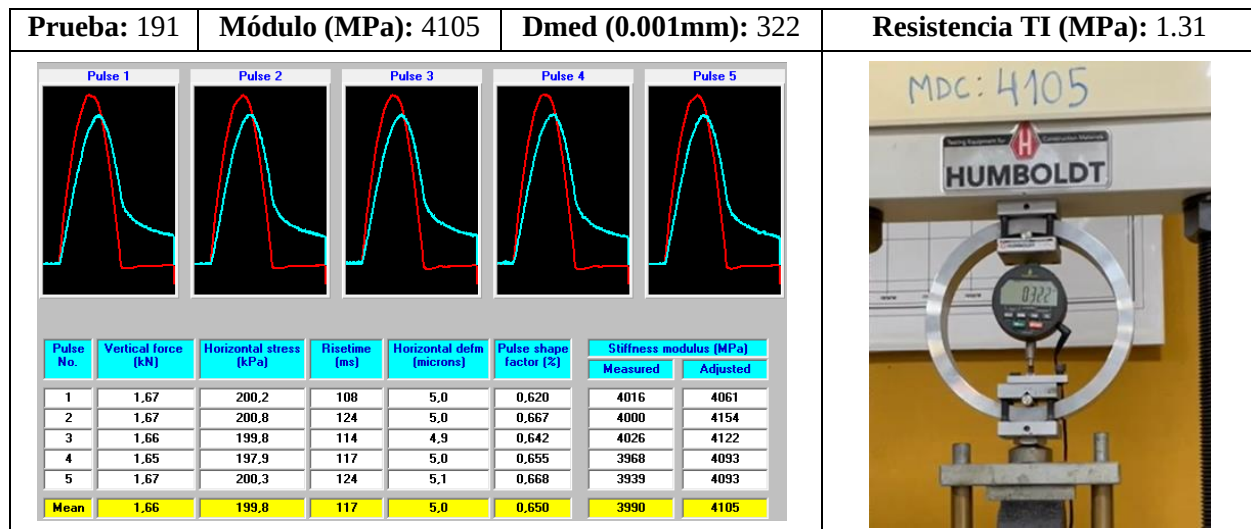
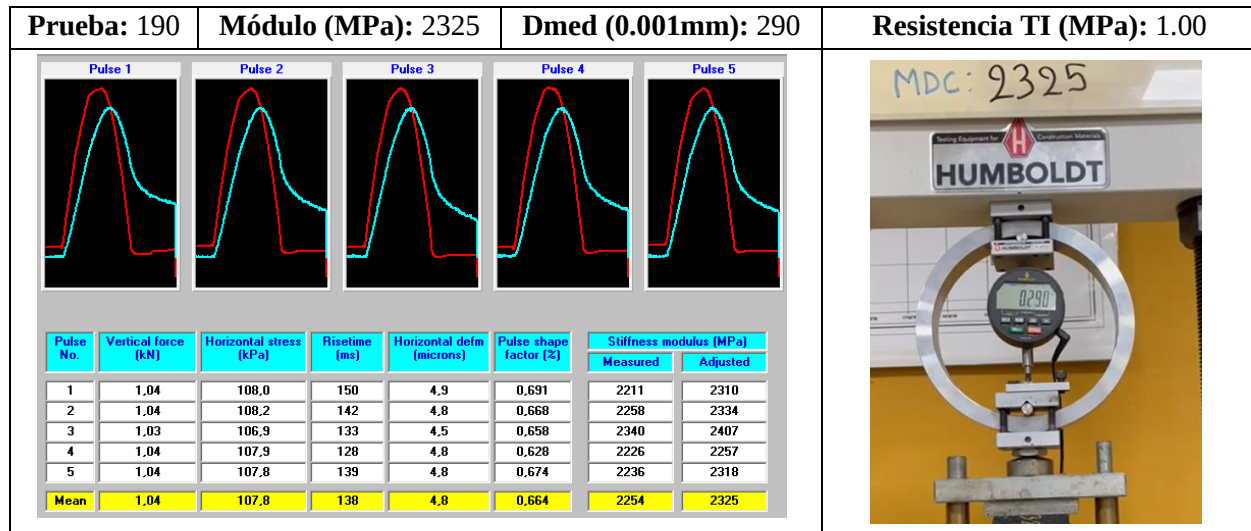
Prueba: 179	Módulo (MPa): 2298	Dmed (0.001mm): 274	Resistencia TI (MPa): 0.95																																																										
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5			MDC: 2298 HUMBOLDT 0.274																																																										
<table><tr><th rowspan="2">Pulse No.</th><th rowspan="2">Vertical force (kN)</th><th rowspan="2">Horizontal stress (kPa)</th><th rowspan="2">Risetime (ms)</th><th rowspan="2">Horizontal defm (microns)</th><th rowspan="2">Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr><tr><td>1</td><td>1.11</td><td>113.7</td><td>106</td><td>5.3</td><td>0.630</td><td>2126</td><td>2158</td></tr><tr><td>2</td><td>1.13</td><td>115.2</td><td>115</td><td>5.1</td><td>0.637</td><td>2245</td><td>2286</td></tr><tr><td>3</td><td>1.13</td><td>115.9</td><td>124</td><td>5.1</td><td>0.654</td><td>2275</td><td>2336</td></tr><tr><td>4</td><td>1.11</td><td>114.0</td><td>114</td><td>4.9</td><td>0.620</td><td>2323</td><td>2346</td></tr><tr><td>5</td><td>1.12</td><td>114.4</td><td>129</td><td>5.0</td><td>0.686</td><td>2265</td><td>2362</td></tr><tr><td>Mean</td><td>1.12</td><td>114.7</td><td>118</td><td>5.1</td><td>0.646</td><td>2247</td><td>2298</td></tr></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)		Measured	Adjusted	1	1.11	113.7	106	5.3	0.630	2126	2158	2	1.13	115.2	115	5.1	0.637	2245	2286	3	1.13	115.9	124	5.1	0.654	2275	2336	4	1.11	114.0	114	4.9	0.620	2323	2346	5	1.12	114.4	129	5.0	0.686	2265	2362	Mean	1.12	114.7	118	5.1	0.646	2247	2298	
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)							Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																	
			Measured	Adjusted																																																									
1	1.11	113.7	106	5.3	0.630	2126	2158																																																						
2	1.13	115.2	115	5.1	0.637	2245	2286																																																						
3	1.13	115.9	124	5.1	0.654	2275	2336																																																						
4	1.11	114.0	114	4.9	0.620	2323	2346																																																						
5	1.12	114.4	129	5.0	0.686	2265	2362																																																						
Mean	1.12	114.7	118	5.1	0.646	2247	2298																																																						

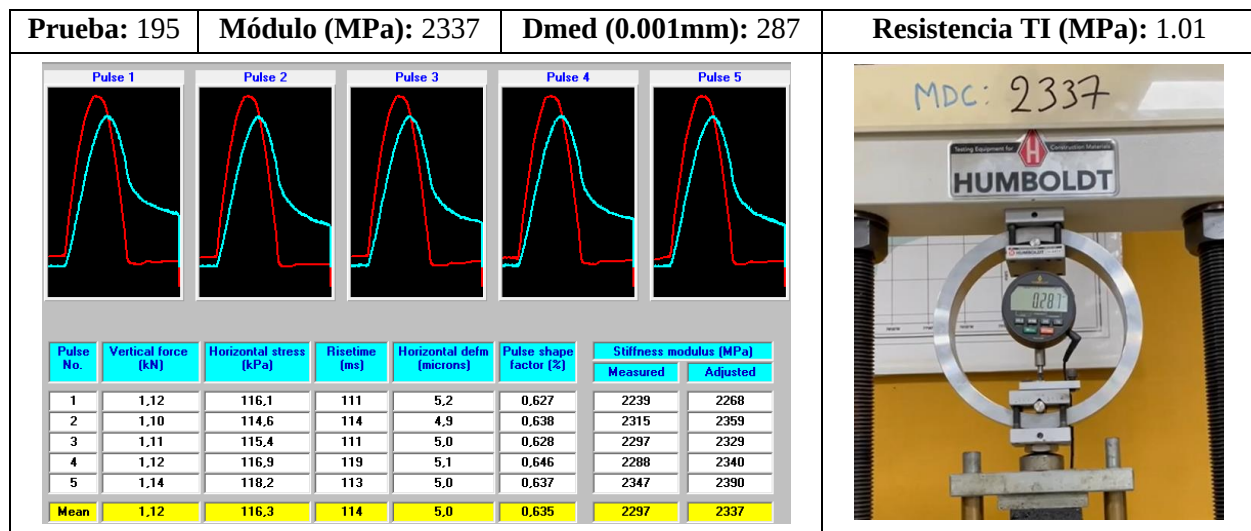
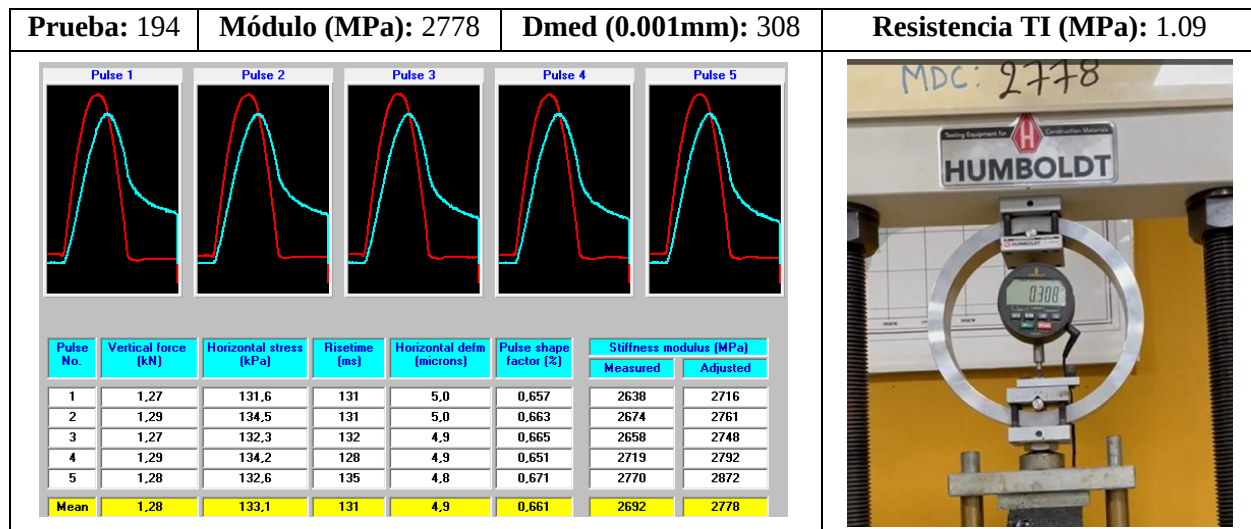
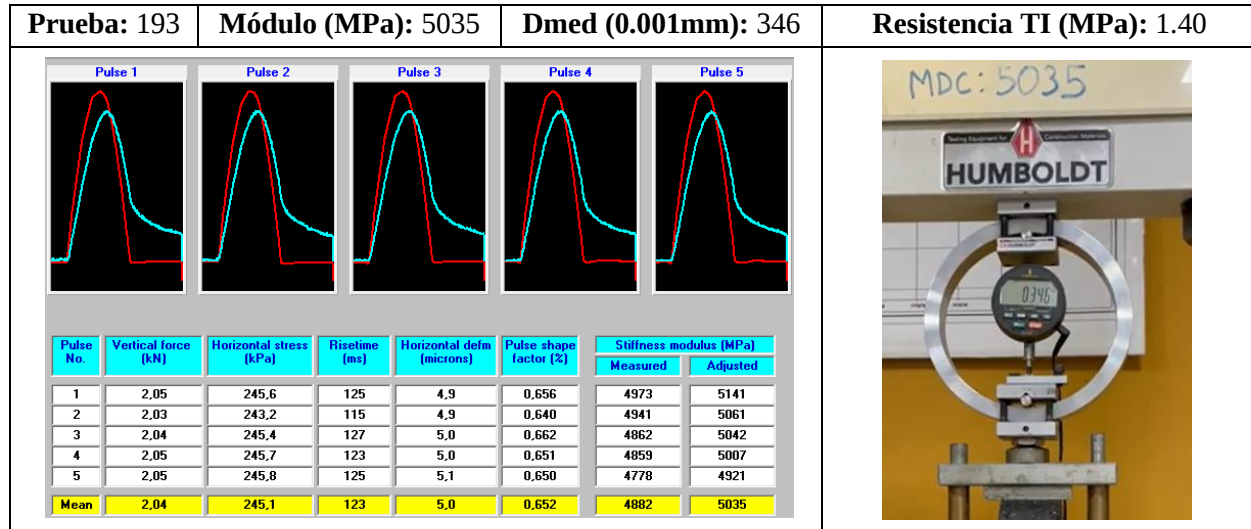
Prueba: 180	Módulo (MPa): 2557	Dmed (0.001mm): 254	Resistencia TI (MPa): 0.88																																																										
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5			MDC: 2557 HUMBOLDT 0.254																																																										
<table><tr><th rowspan="2">Pulse No.</th><th rowspan="2">Vertical force (kN)</th><th rowspan="2">Horizontal stress (kPa)</th><th rowspan="2">Risetime (ms)</th><th rowspan="2">Horizontal defm (microns)</th><th rowspan="2">Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr><tr><td>1</td><td>1.24</td><td>127.0</td><td>113</td><td>5.3</td><td>0.638</td><td>2387</td><td>2433</td></tr><tr><td>2</td><td>1.25</td><td>128.4</td><td>127</td><td>5.2</td><td>0.654</td><td>2464</td><td>2532</td></tr><tr><td>3</td><td>1.25</td><td>127.5</td><td>128</td><td>5.1</td><td>0.669</td><td>2484</td><td>2571</td></tr><tr><td>4</td><td>1.25</td><td>128.2</td><td>134</td><td>5.1</td><td>0.696</td><td>2508</td><td>2631</td></tr><tr><td>5</td><td>1.24</td><td>127.1</td><td>130</td><td>5.0</td><td>0.660</td><td>2541</td><td>2619</td></tr><tr><td>Mean</td><td>1.25</td><td>127.6</td><td>126</td><td>5.1</td><td>0.663</td><td>2477</td><td>2557</td></tr></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)		Measured	Adjusted	1	1.24	127.0	113	5.3	0.638	2387	2433	2	1.25	128.4	127	5.2	0.654	2464	2532	3	1.25	127.5	128	5.1	0.669	2484	2571	4	1.25	128.2	134	5.1	0.696	2508	2631	5	1.24	127.1	130	5.0	0.660	2541	2619	Mean	1.25	127.6	126	5.1	0.663	2477	2557	
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)							Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																	
			Measured	Adjusted																																																									
1	1.24	127.0	113	5.3	0.638	2387	2433																																																						
2	1.25	128.4	127	5.2	0.654	2464	2532																																																						
3	1.25	127.5	128	5.1	0.669	2484	2571																																																						
4	1.25	128.2	134	5.1	0.696	2508	2631																																																						
5	1.24	127.1	130	5.0	0.660	2541	2619																																																						
Mean	1.25	127.6	126	5.1	0.663	2477	2557																																																						







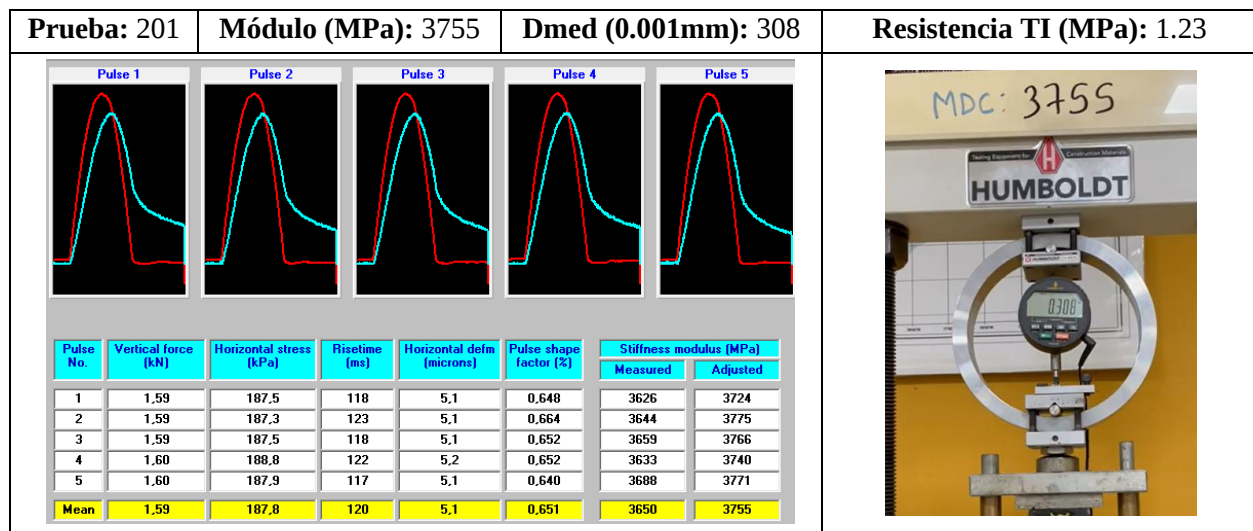
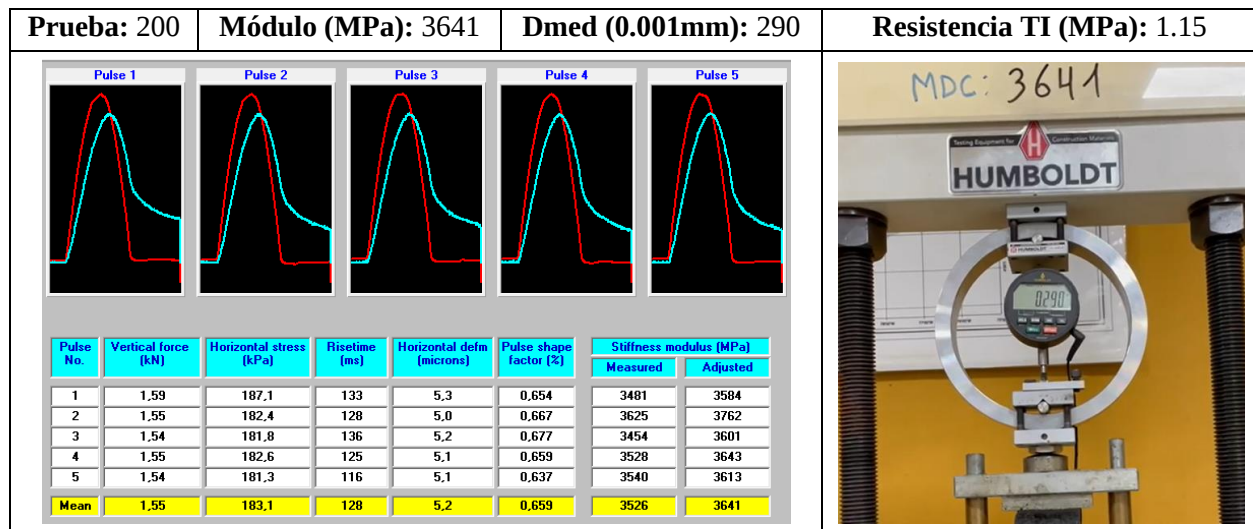
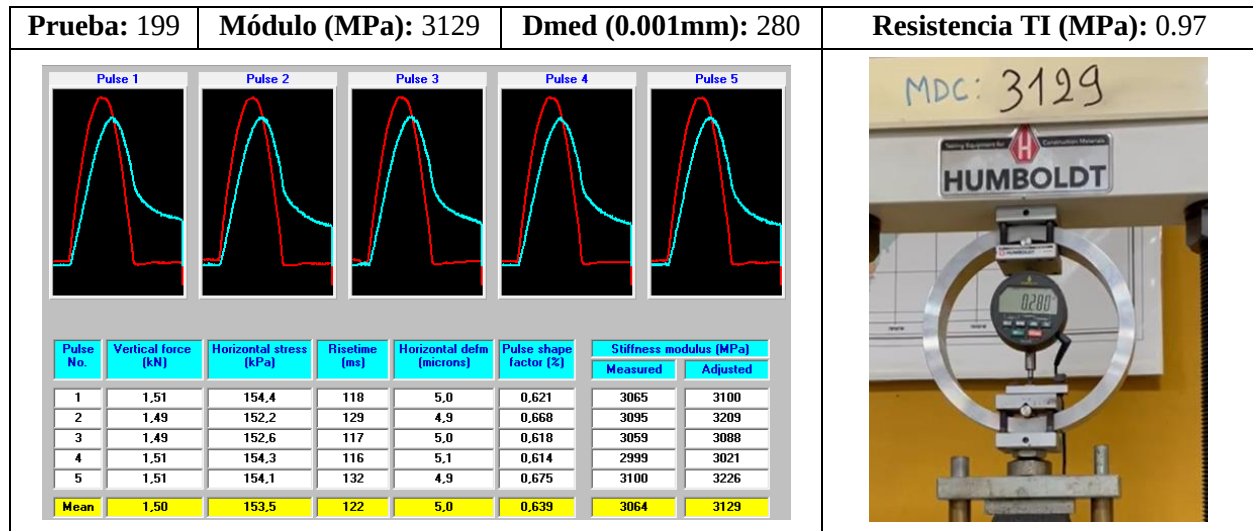


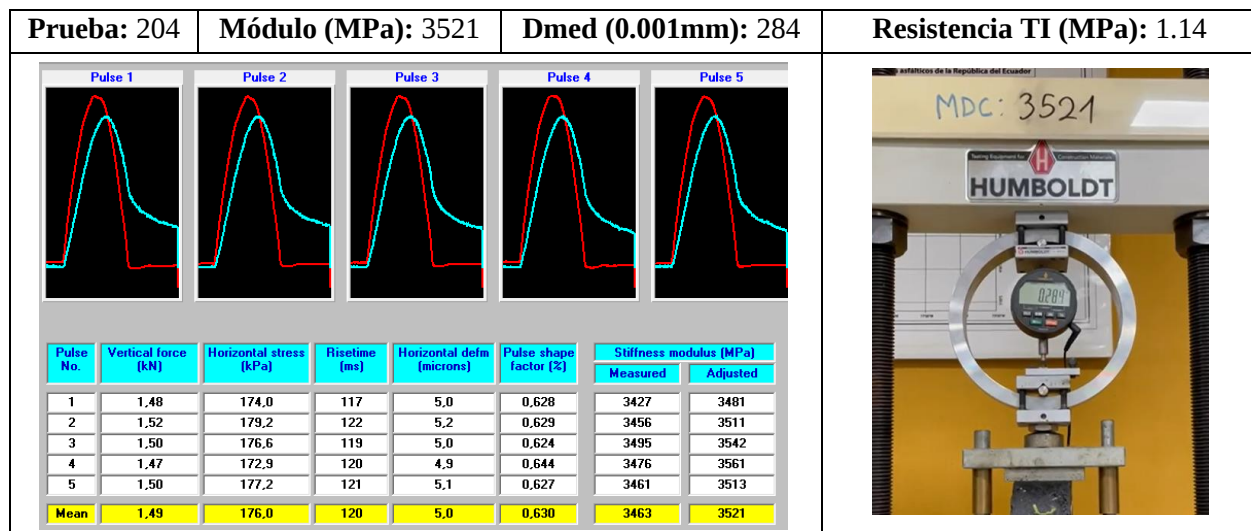
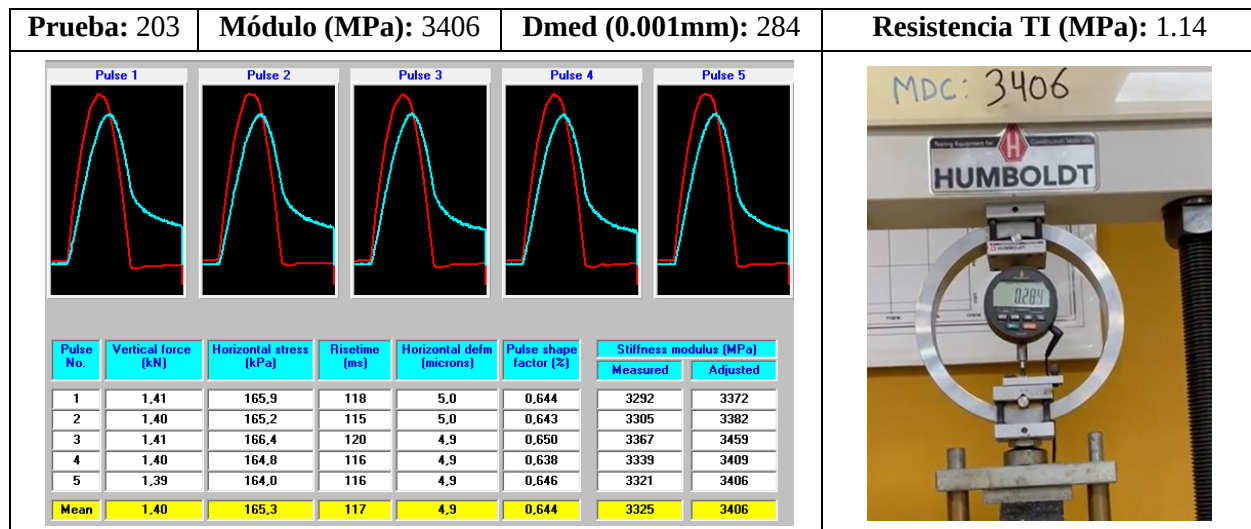
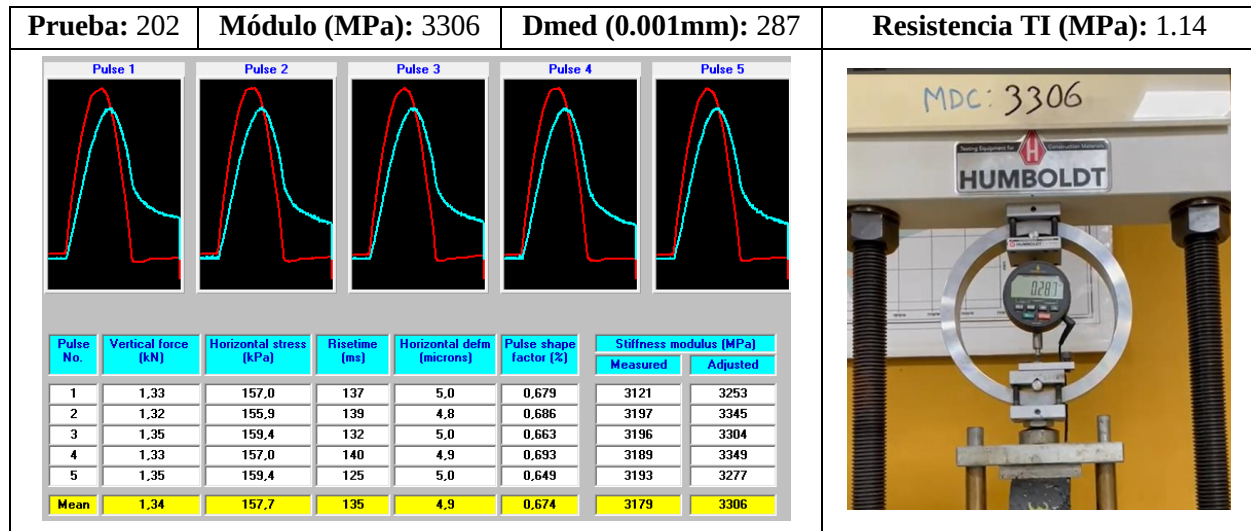


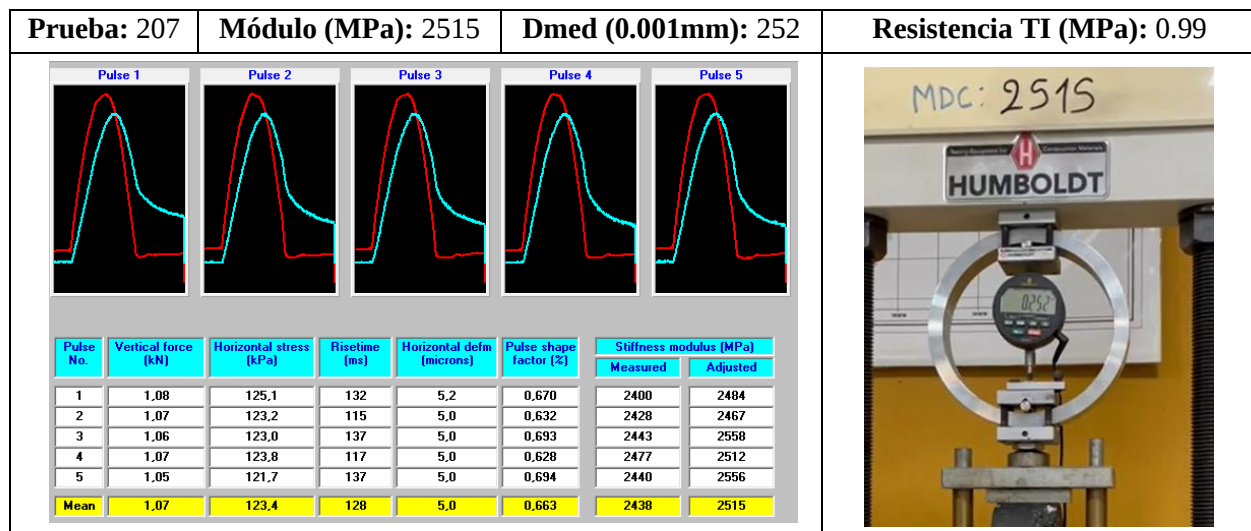
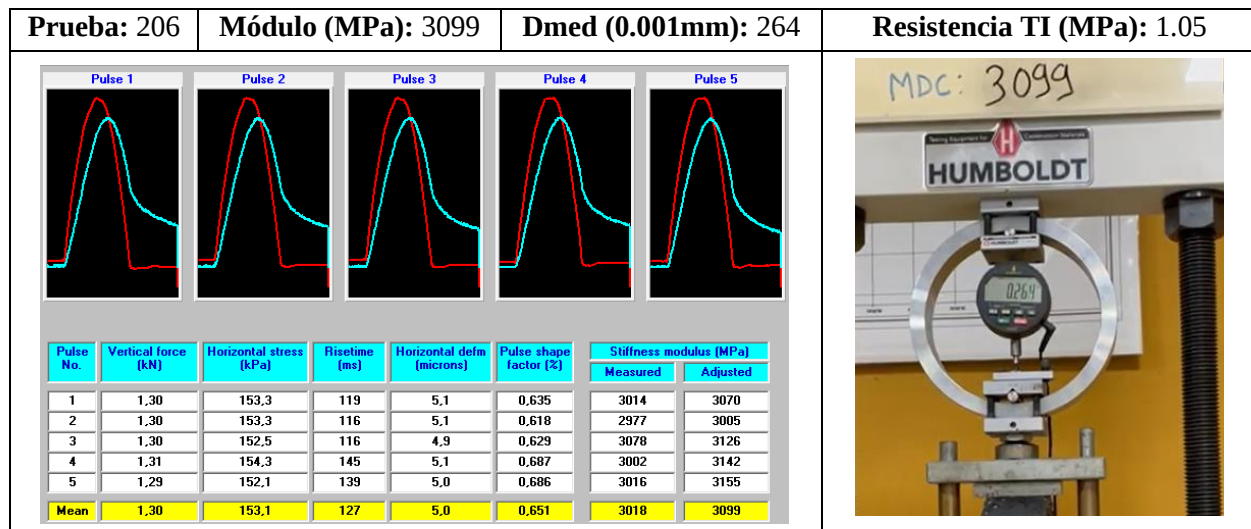
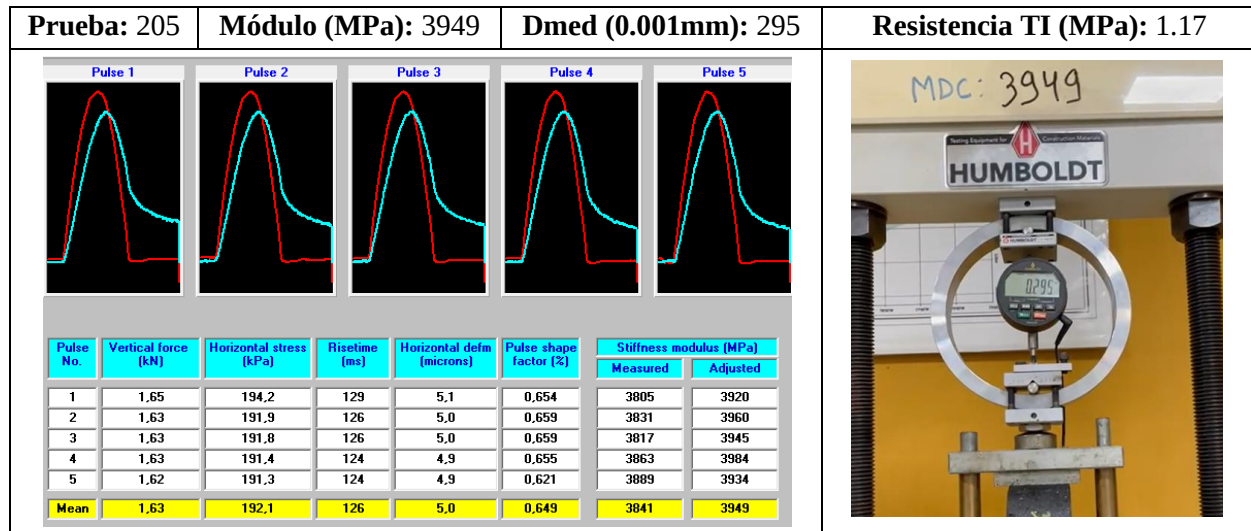
Prueba: 196	Módulo (MPa): 2013	Dmed (0.001mm): 271	Resistencia TI (MPa): 0.94																																																										
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5 <table><thead><tr><th rowspan="2">Pulse No.</th><th rowspan="2">Vertical force (kN)</th><th rowspan="2">Horizontal stress (kPa)</th><th rowspan="2">Risetime (ms)</th><th rowspan="2">Horizontal defm (microns)</th><th rowspan="2">Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>0.93</td><td>95.1</td><td>119</td><td>5.0</td><td>0.650</td><td>1881</td><td>1926</td></tr><tr><td>2</td><td>0.95</td><td>97.1</td><td>118</td><td>5.0</td><td>0.640</td><td>1925</td><td>1961</td></tr><tr><td>3</td><td>0.93</td><td>95.6</td><td>130</td><td>4.7</td><td>0.668</td><td>2032</td><td>2099</td></tr><tr><td>4</td><td>0.95</td><td>97.3</td><td>123</td><td>5.0</td><td>0.629</td><td>1949</td><td>1977</td></tr><tr><td>5</td><td>0.95</td><td>97.4</td><td>142</td><td>4.8</td><td>0.696</td><td>2012</td><td>2104</td></tr><tr><td>Mean</td><td>0.94</td><td>96.5</td><td>126</td><td>4.9</td><td>0.657</td><td>1960</td><td>2013</td></tr></tbody></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)		Measured	Adjusted	1	0.93	95.1	119	5.0	0.650	1881	1926	2	0.95	97.1	118	5.0	0.640	1925	1961	3	0.93	95.6	130	4.7	0.668	2032	2099	4	0.95	97.3	123	5.0	0.629	1949	1977	5	0.95	97.4	142	4.8	0.696	2012	2104	Mean	0.94	96.5	126	4.9	0.657	1960	2013	MDC: 2013 HUMBOLDT 0.94
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)							Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																	
			Measured	Adjusted																																																									
1	0.93	95.1	119	5.0	0.650	1881	1926																																																						
2	0.95	97.1	118	5.0	0.640	1925	1961																																																						
3	0.93	95.6	130	4.7	0.668	2032	2099																																																						
4	0.95	97.3	123	5.0	0.629	1949	1977																																																						
5	0.95	97.4	142	4.8	0.696	2012	2104																																																						
Mean	0.94	96.5	126	4.9	0.657	1960	2013																																																						

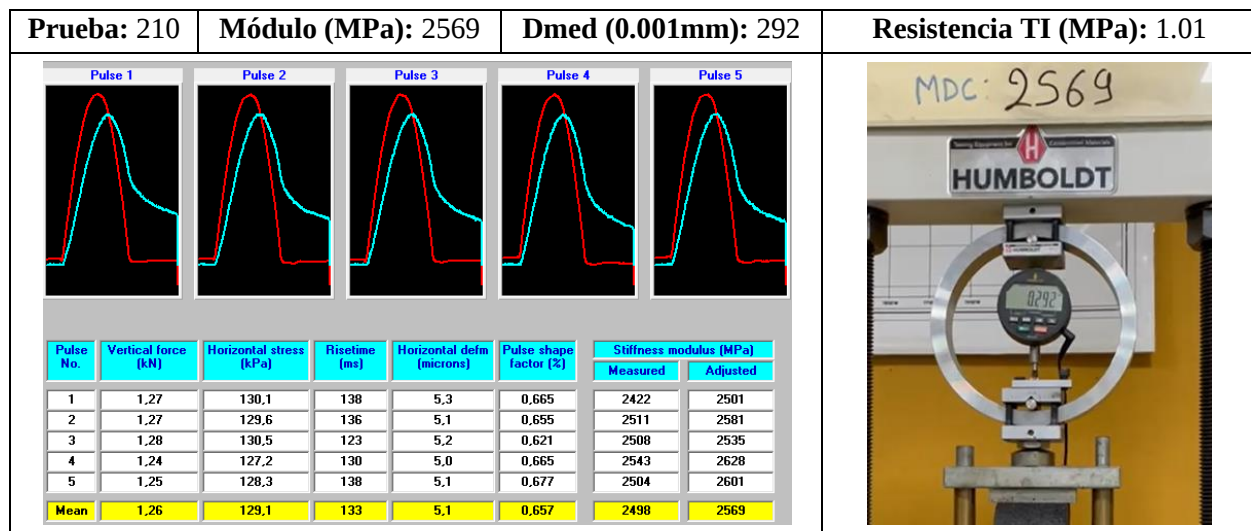
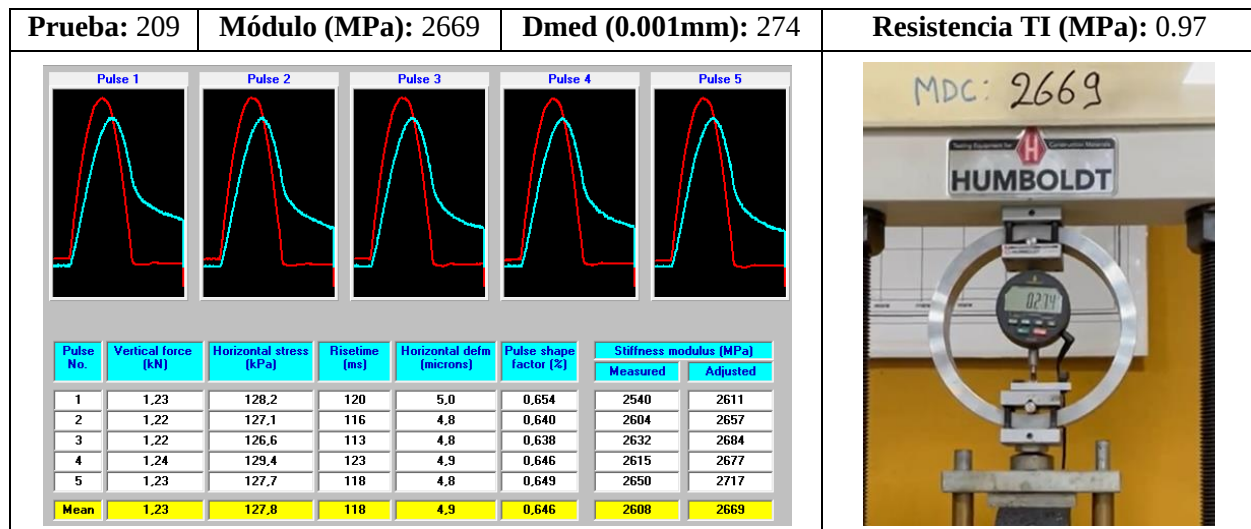
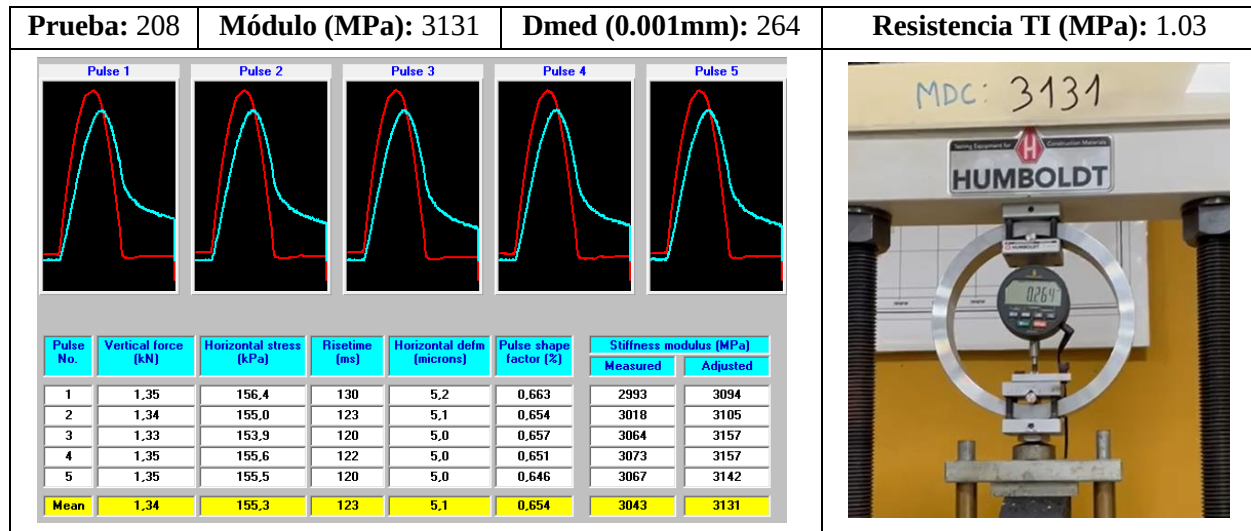
Prueba: 197	Módulo (MPa): 2374	Dmed (0.001mm): 254	Resistencia TI (MPa): 0.88																																																																
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5 <table><thead><tr><th>Pulse No.</th><th>Vertical force (kN)</th><th>Horizontal stress (kPa)</th><th>Risetime (ms)</th><th>Horizontal defm (microns)</th><th>Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>1.10</td><td>112.7</td><td>116</td><td>5.0</td><td>0.639</td><td>2260</td><td>2304</td></tr><tr><td>2</td><td>1.13</td><td>115.1</td><td>118</td><td>5.0</td><td>0.620</td><td>2267</td><td>2290</td></tr><tr><td>3</td><td>1.11</td><td>113.8</td><td>123</td><td>4.9</td><td>0.658</td><td>2330</td><td>2398</td></tr><tr><td>4</td><td>1.12</td><td>114.4</td><td>125</td><td>4.8</td><td>0.647</td><td>2361</td><td>2417</td></tr><tr><td>5</td><td>1.10</td><td>112.8</td><td>122</td><td>4.7</td><td>0.648</td><td>2403</td><td>2461</td></tr><tr><td>Mean</td><td>1.11</td><td>113.8</td><td>121</td><td>4.9</td><td>0.643</td><td>2324</td><td>2374</td></tr></tbody></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)								Measured	Adjusted	1	1.10	112.7	116	5.0	0.639	2260	2304	2	1.13	115.1	118	5.0	0.620	2267	2290	3	1.11	113.8	123	4.9	0.658	2330	2398	4	1.12	114.4	125	4.8	0.647	2361	2417	5	1.10	112.8	122	4.7	0.648	2403	2461	Mean	1.11	113.8	121	4.9	0.643	2324	2374	MDC: 2374 HUMBOLDT 0.88
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																													
						Measured	Adjusted																																																												
1	1.10	112.7	116	5.0	0.639	2260	2304																																																												
2	1.13	115.1	118	5.0	0.620	2267	2290																																																												
3	1.11	113.8	123	4.9	0.658	2330	2398																																																												
4	1.12	114.4	125	4.8	0.647	2361	2417																																																												
5	1.10	112.8	122	4.7	0.648	2403	2461																																																												
Mean	1.11	113.8	121	4.9	0.643	2324	2374																																																												

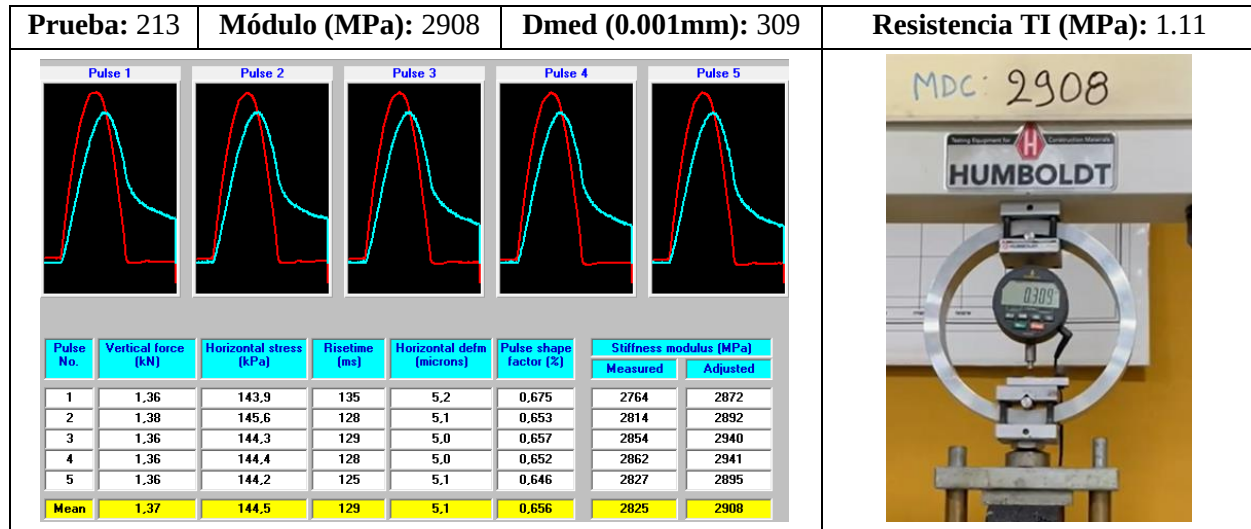
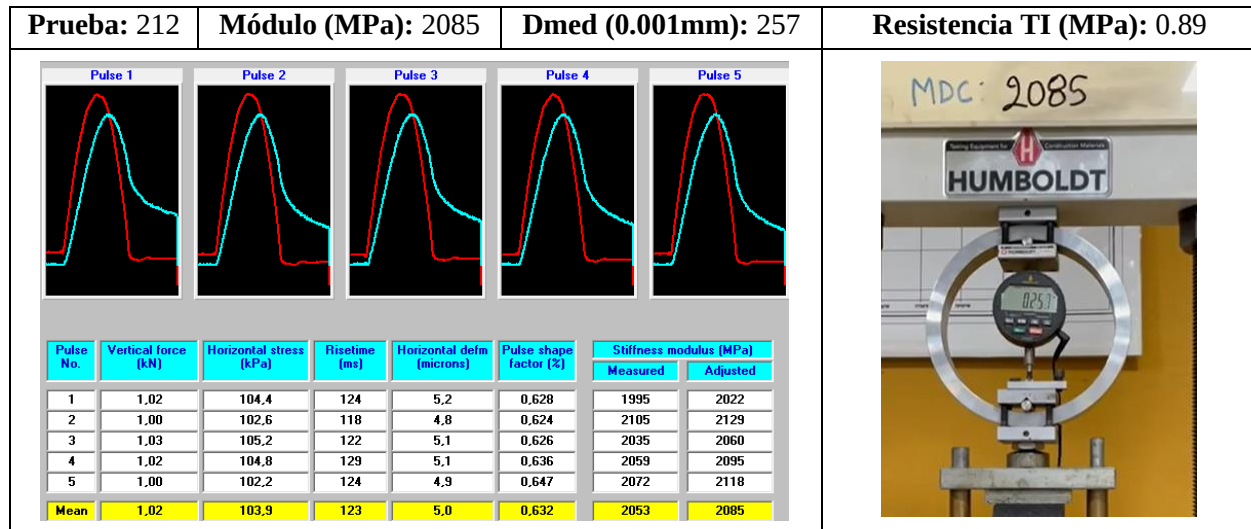
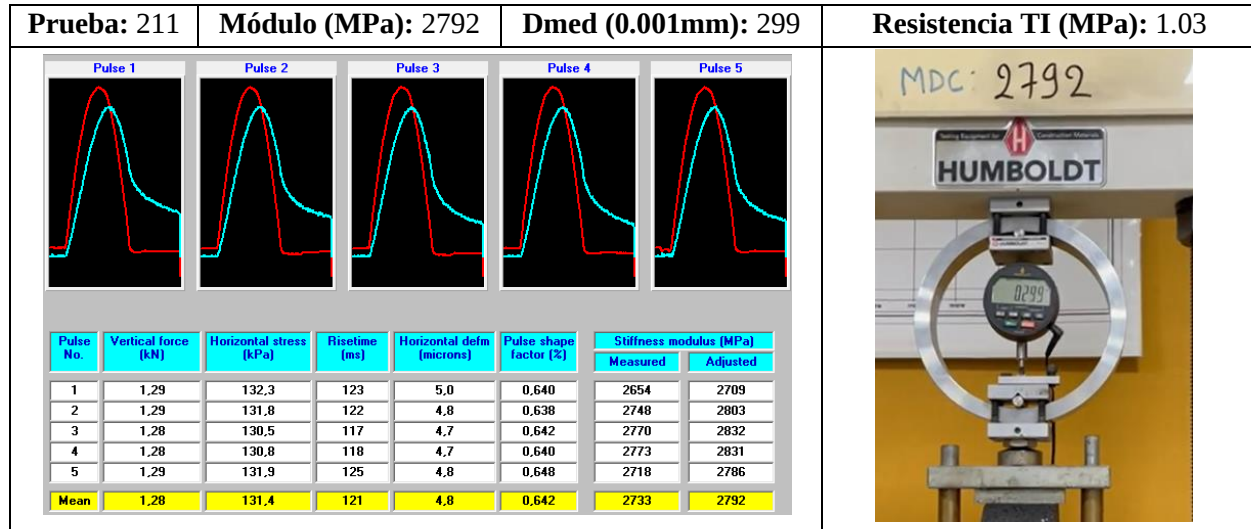
Prueba: 198	Módulo (MPa): 2741	Dmed (0.001mm): 278	Resistencia TI (MPa): 0.96																																																										
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5			MDC: 2741 HUMBOLDT 0.216																																																										
<table><tr><th rowspan="2">Pulse No.</th><th rowspan="2">Vertical force (kN)</th><th rowspan="2">Horizontal stress (kPa)</th><th rowspan="2">Risetime (ms)</th><th rowspan="2">Horizontal defm (microns)</th><th rowspan="2">Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr><tr><td>1</td><td>1.29</td><td>132.2</td><td>128</td><td>5.0</td><td>0.641</td><td>2604</td><td>2659</td></tr><tr><td>2</td><td>1.28</td><td>130.5</td><td>125</td><td>4.8</td><td>0.645</td><td>2683</td><td>2746</td></tr><tr><td>3</td><td>1.28</td><td>131.4</td><td>130</td><td>4.8</td><td>0.659</td><td>2699</td><td>2782</td></tr><tr><td>4</td><td>1.29</td><td>132.3</td><td>130</td><td>4.9</td><td>0.641</td><td>2666</td><td>2723</td></tr><tr><td>5</td><td>1.27</td><td>130.3</td><td>137</td><td>4.8</td><td>0.680</td><td>2681</td><td>2792</td></tr><tr><td>Mean</td><td>1.28</td><td>131.3</td><td>130</td><td>4.9</td><td>0.653</td><td>2667</td><td>2741</td></tr></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)		Measured	Adjusted	1	1.29	132.2	128	5.0	0.641	2604	2659	2	1.28	130.5	125	4.8	0.645	2683	2746	3	1.28	131.4	130	4.8	0.659	2699	2782	4	1.29	132.3	130	4.9	0.641	2666	2723	5	1.27	130.3	137	4.8	0.680	2681	2792	Mean	1.28	131.3	130	4.9	0.653	2667	2741	
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)							Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																	
			Measured	Adjusted																																																									
1	1.29	132.2	128	5.0	0.641	2604	2659																																																						
2	1.28	130.5	125	4.8	0.645	2683	2746																																																						
3	1.28	131.4	130	4.8	0.659	2699	2782																																																						
4	1.29	132.3	130	4.9	0.641	2666	2723																																																						
5	1.27	130.3	137	4.8	0.680	2681	2792																																																						
Mean	1.28	131.3	130	4.9	0.653	2667	2741																																																						







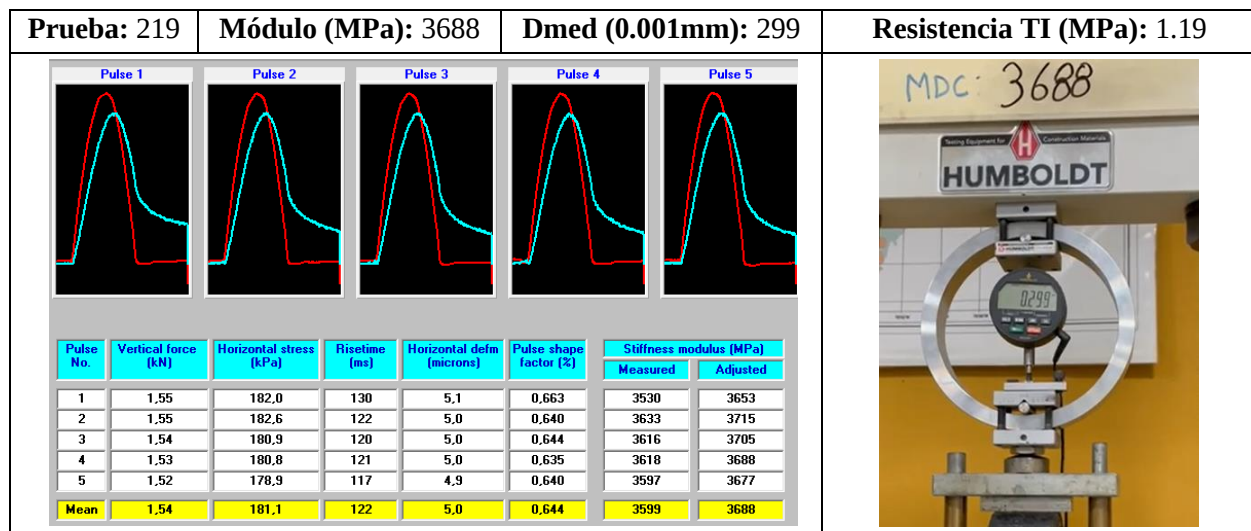
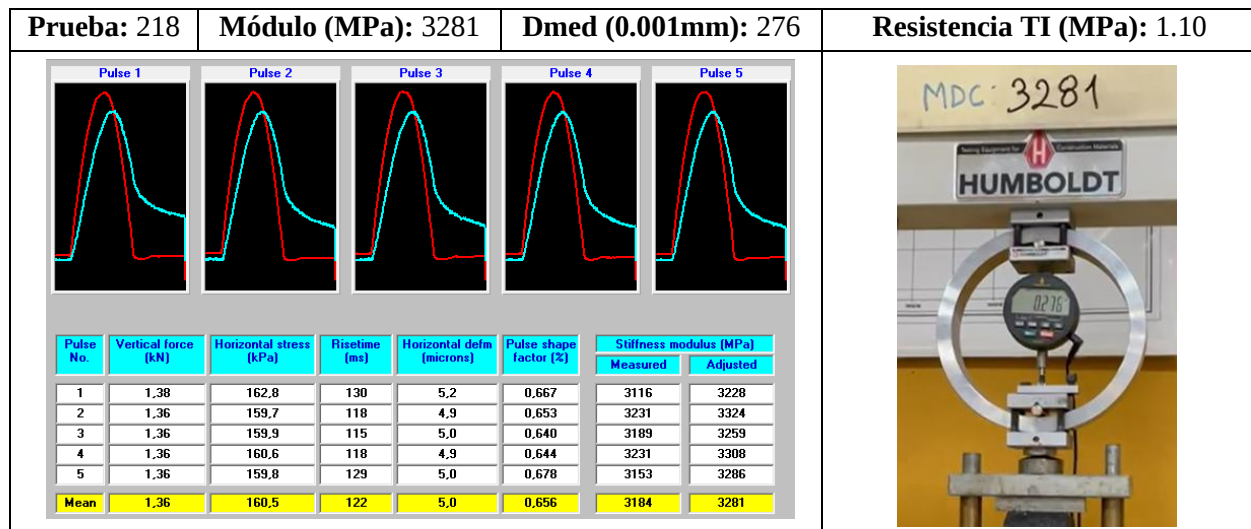
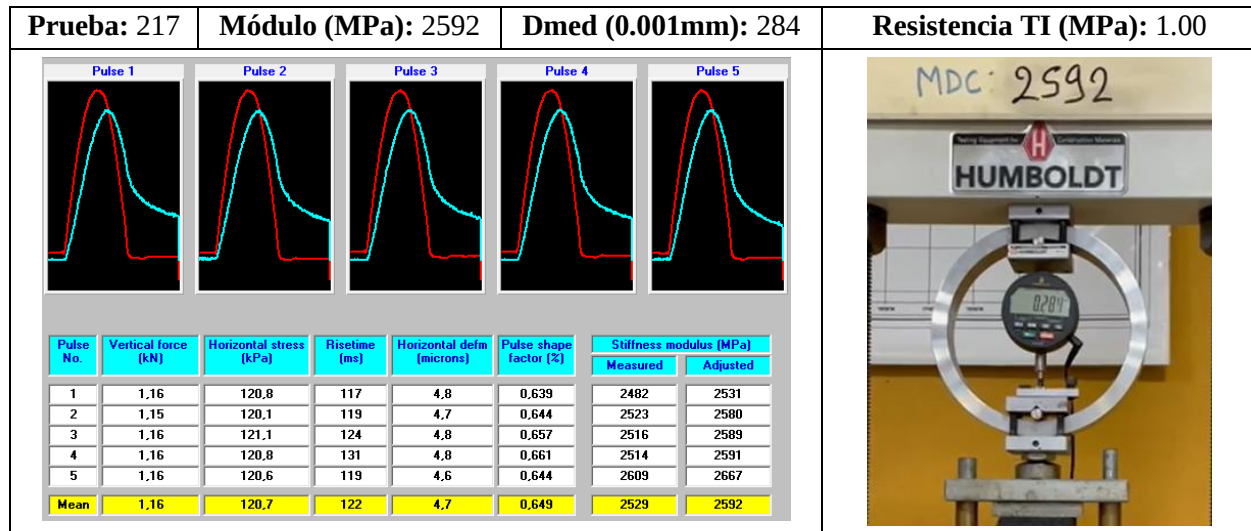


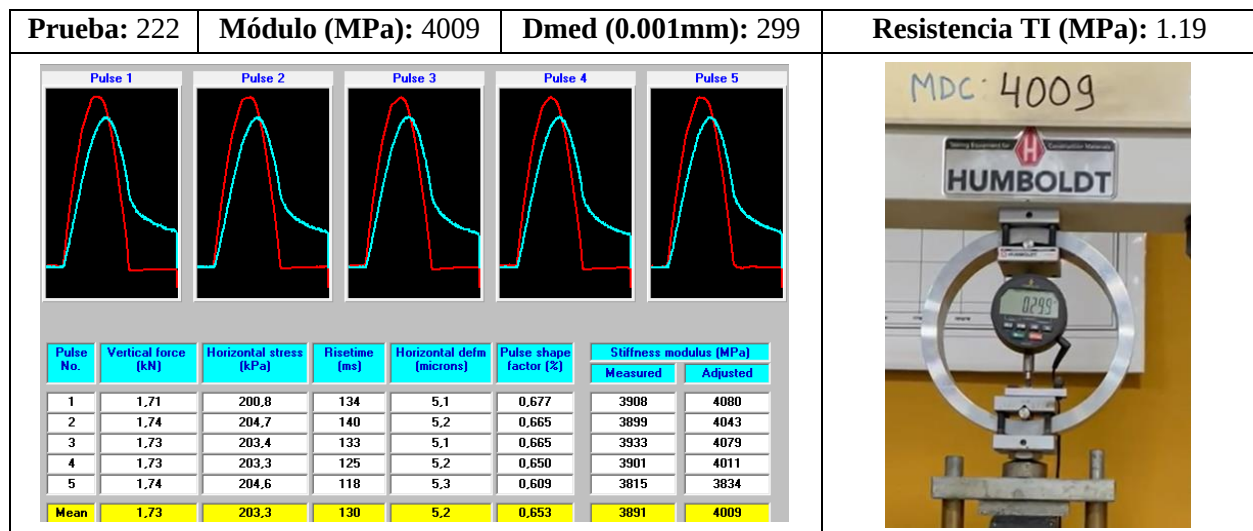
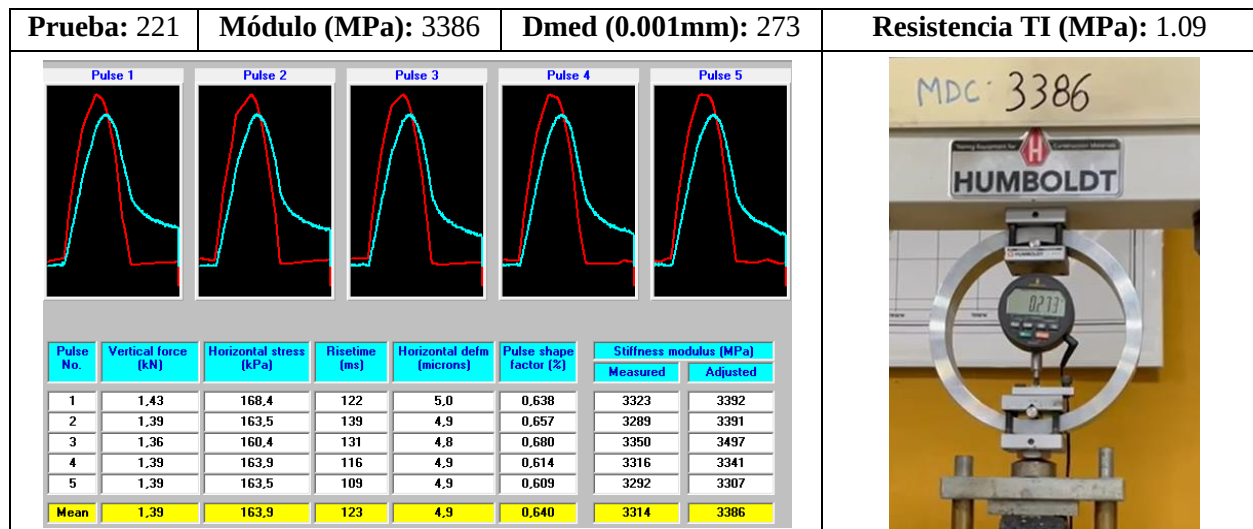
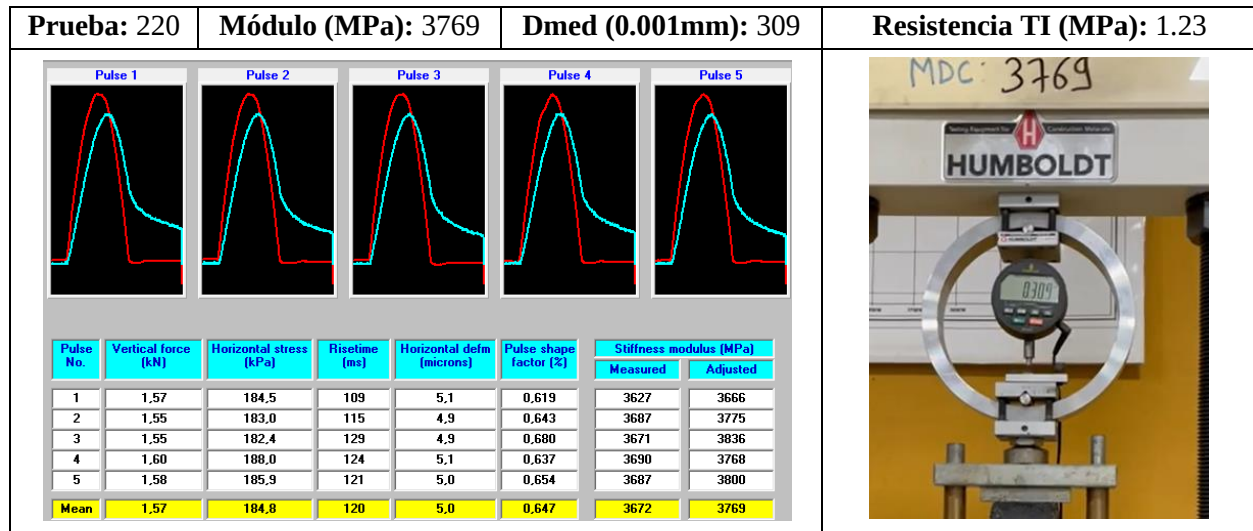


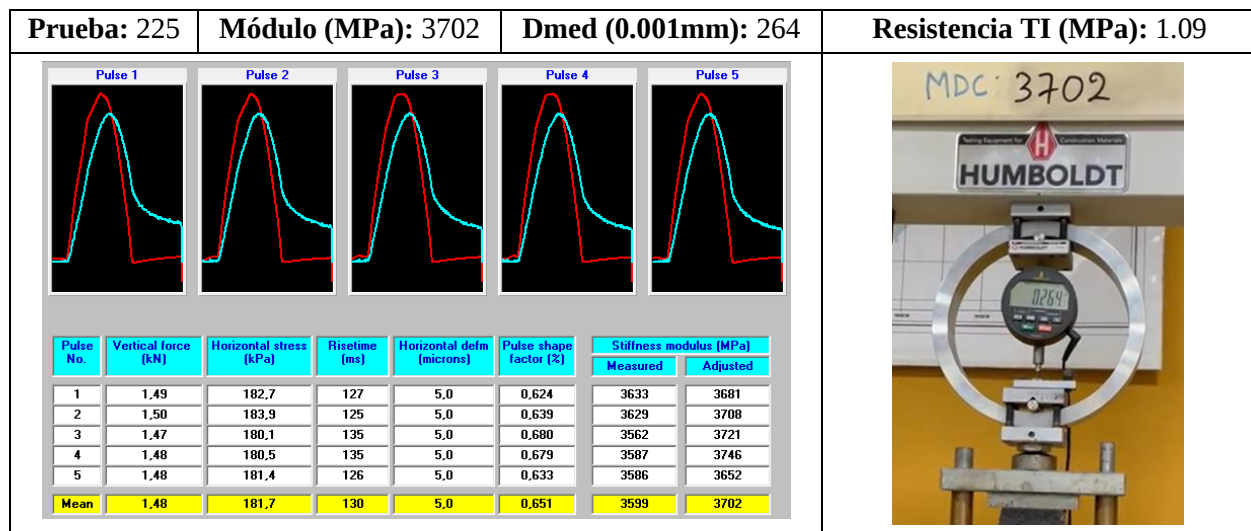
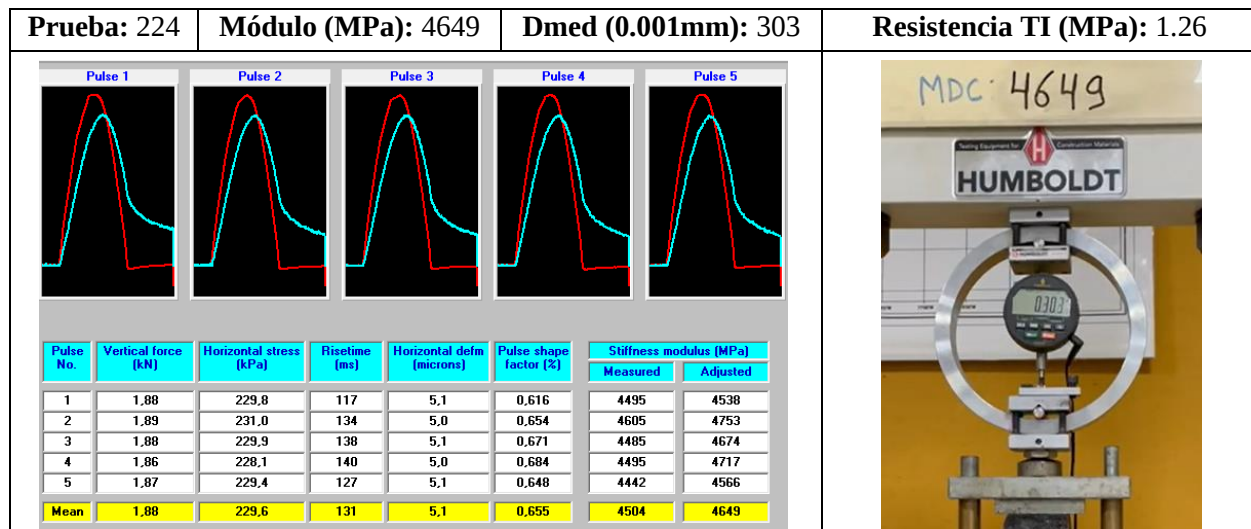
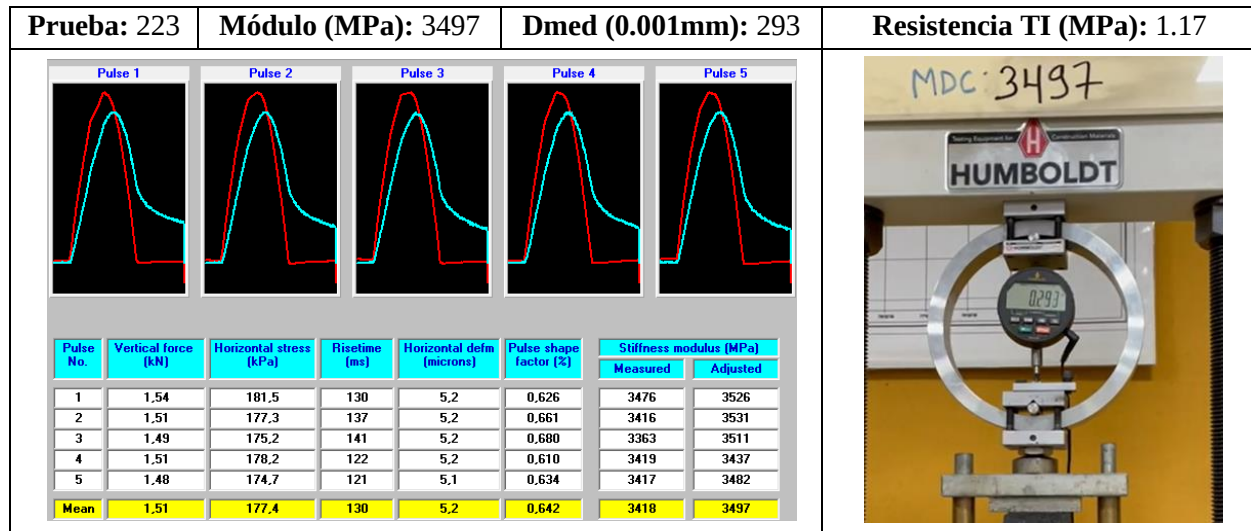
Prueba: 214	Módulo (MPa): 2693	Dmed (0.001mm): 289	Resistencia TI (MPa): 1.00																																																																
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5			MDC: 2693 HUMOLDT 0289																																																																
<table><tr><th>Pulse No.</th><th>Vertical force (kN)</th><th>Horizontal stress (kPa)</th><th>Risetime (ms)</th><th>Horizontal defm (microns)</th><th>Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr><tr><td>1</td><td>1,28</td><td>131,5</td><td>126</td><td>5,1</td><td>0,659</td><td>2576</td><td>2654</td></tr><tr><td>2</td><td>1,29</td><td>132,0</td><td>117</td><td>5,0</td><td>0,633</td><td>2620</td><td>2664</td></tr><tr><td>3</td><td>1,28</td><td>130,8</td><td>118</td><td>5,0</td><td>0,636</td><td>2613</td><td>2661</td></tr><tr><td>4</td><td>1,30</td><td>132,7</td><td>127</td><td>4,9</td><td>0,644</td><td>2686</td><td>2747</td></tr><tr><td>5</td><td>1,28</td><td>130,7</td><td>131</td><td>4,9</td><td>0,674</td><td>2639</td><td>2740</td></tr><tr><td>Mean</td><td>1,29</td><td>131,5</td><td>124</td><td>5,0</td><td>0,649</td><td>2627</td><td>2693</td></tr></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)								Measured	Adjusted	1	1,28	131,5	126	5,1	0,659	2576	2654	2	1,29	132,0	117	5,0	0,633	2620	2664	3	1,28	130,8	118	5,0	0,636	2613	2661	4	1,30	132,7	127	4,9	0,644	2686	2747	5	1,28	130,7	131	4,9	0,674	2639	2740	Mean	1,29	131,5	124	5,0	0,649	2627	2693	
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																													
						Measured	Adjusted																																																												
1	1,28	131,5	126	5,1	0,659	2576	2654																																																												
2	1,29	132,0	117	5,0	0,633	2620	2664																																																												
3	1,28	130,8	118	5,0	0,636	2613	2661																																																												
4	1,30	132,7	127	4,9	0,644	2686	2747																																																												
5	1,28	130,7	131	4,9	0,674	2639	2740																																																												
Mean	1,29	131,5	124	5,0	0,649	2627	2693																																																												

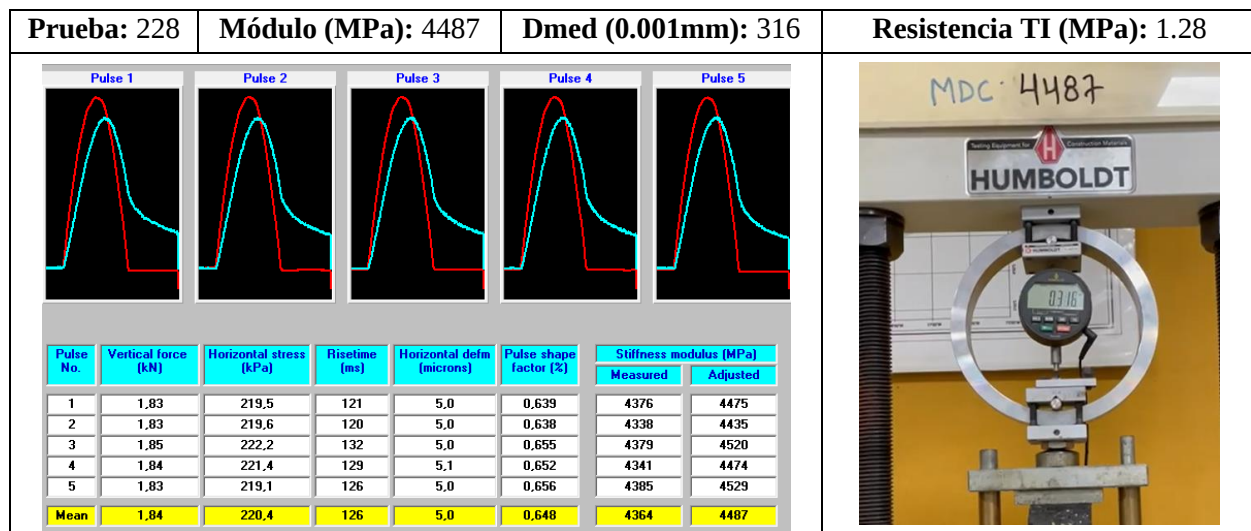
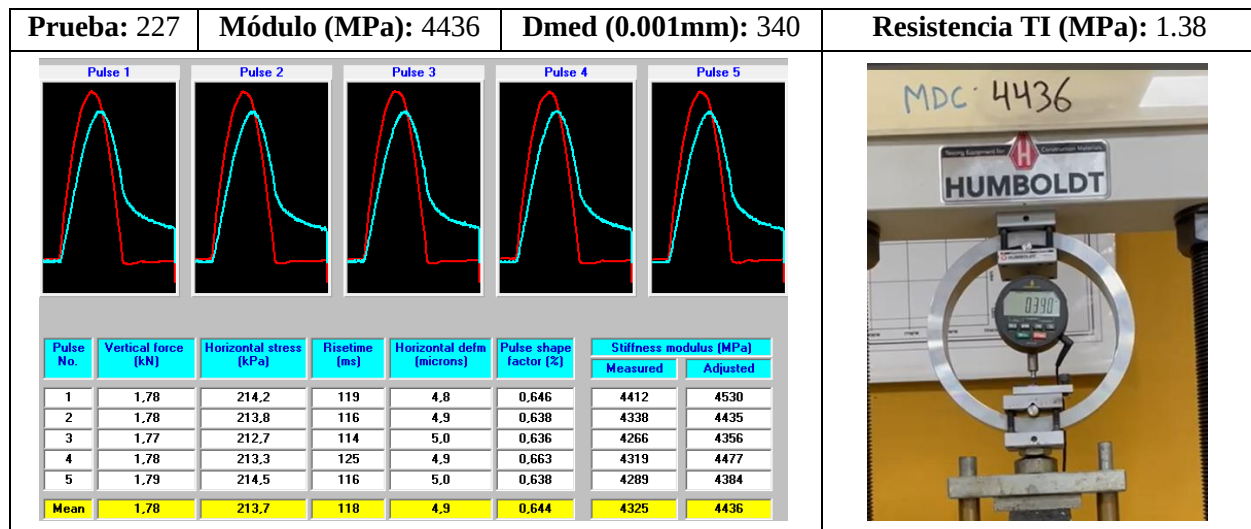
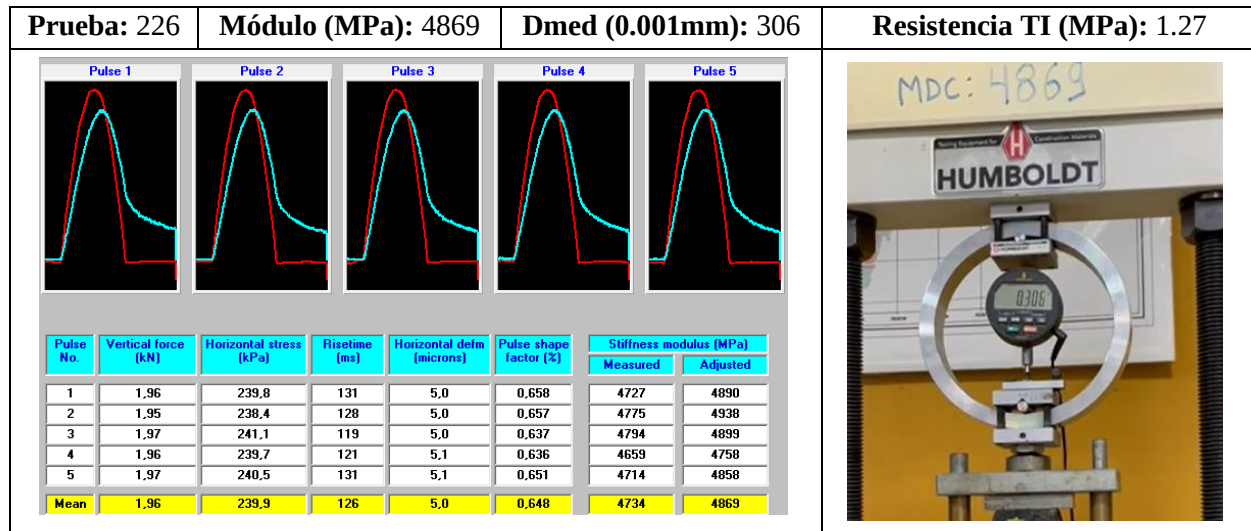
Prueba: 215	Módulo (MPa): 2432	Dmed (0.001mm): 274	Resistencia TI (MPa): 0.97																																																										
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5			MDC: 2432 H HUMBOLDT 0.274																																																										
<table><tr><th rowspan="2">Pulse No.</th><th rowspan="2">Vertical force (kN)</th><th rowspan="2">Horizontal stress (kPa)</th><th rowspan="2">Risetime (ms)</th><th rowspan="2">Horizontal defm (microns)</th><th rowspan="2">Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr><tr><td>1</td><td>1,13</td><td>117,8</td><td>118</td><td>5,0</td><td>0,641</td><td>2325</td><td>2373</td></tr><tr><td>2</td><td>1,14</td><td>118,4</td><td>128</td><td>4,9</td><td>0,635</td><td>2404</td><td>2445</td></tr><tr><td>3</td><td>1,14</td><td>118,1</td><td>133</td><td>5,0</td><td>0,666</td><td>2364</td><td>2442</td></tr><tr><td>4</td><td>1,14</td><td>118,1</td><td>118</td><td>4,8</td><td>0,625</td><td>2442</td><td>2473</td></tr><tr><td>5</td><td>1,15</td><td>119,5</td><td>127</td><td>5,0</td><td>0,642</td><td>2376</td><td>2426</td></tr><tr><td>Mean</td><td>1,14</td><td>118,4</td><td>125</td><td>4,9</td><td>0,642</td><td>2382</td><td>2432</td></tr></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)		Measured	Adjusted	1	1,13	117,8	118	5,0	0,641	2325	2373	2	1,14	118,4	128	4,9	0,635	2404	2445	3	1,14	118,1	133	5,0	0,666	2364	2442	4	1,14	118,1	118	4,8	0,625	2442	2473	5	1,15	119,5	127	5,0	0,642	2376	2426	Mean	1,14	118,4	125	4,9	0,642	2382	2432	
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)							Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																	
			Measured	Adjusted																																																									
1	1,13	117,8	118	5,0	0,641	2325	2373																																																						
2	1,14	118,4	128	4,9	0,635	2404	2445																																																						
3	1,14	118,1	133	5,0	0,666	2364	2442																																																						
4	1,14	118,1	118	4,8	0,625	2442	2473																																																						
5	1,15	119,5	127	5,0	0,642	2376	2426																																																						
Mean	1,14	118,4	125	4,9	0,642	2382	2432																																																						

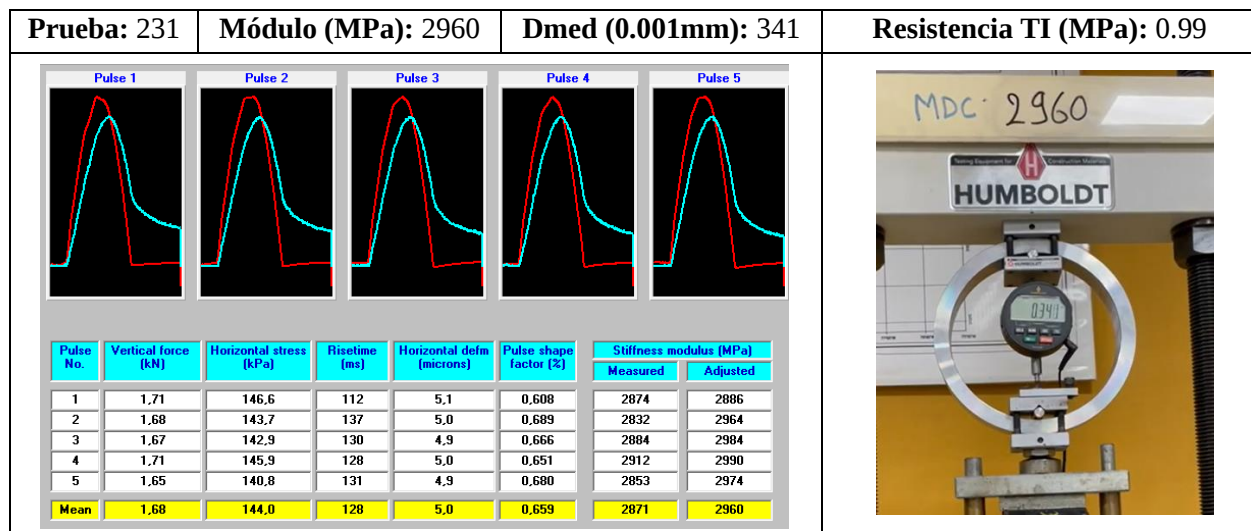
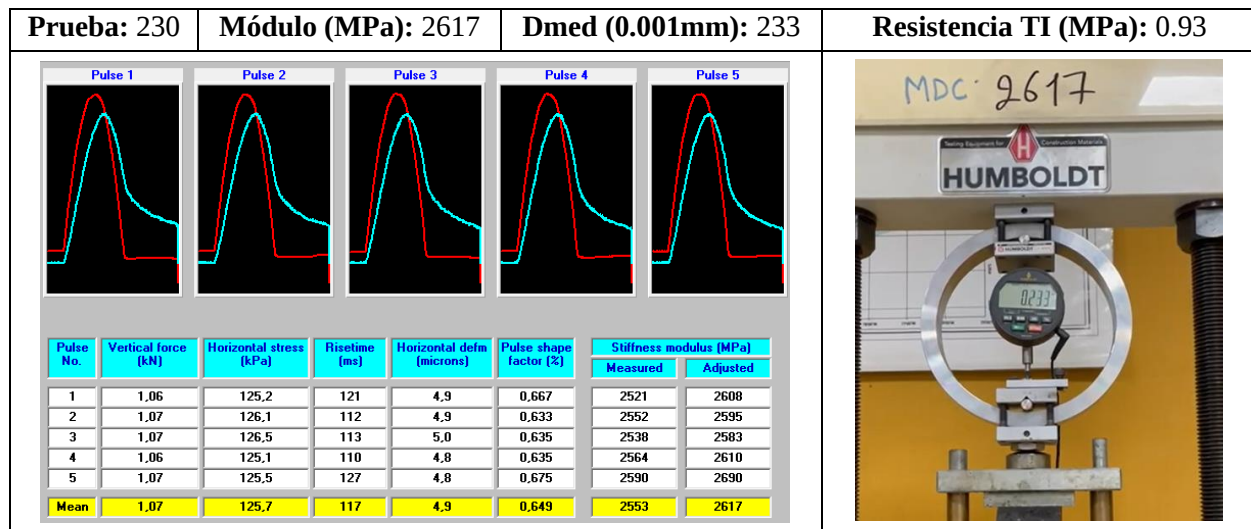
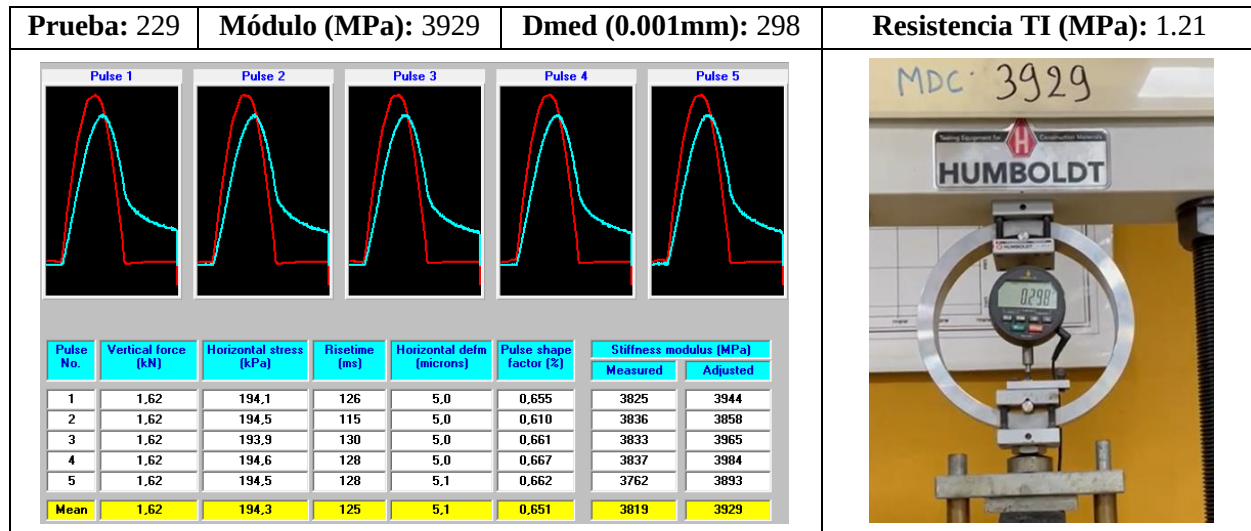
Prueba: 216	Módulo (MPa): 2515	Dmed (0.001mm): 280	Resistencia TI (MPa): 0.99																																																										
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5 <table><thead><tr><th rowspan="2">Pulse No.</th><th rowspan="2">Vertical force (kN)</th><th rowspan="2">Horizontal stress (kPa)</th><th rowspan="2">Risetime (ms)</th><th rowspan="2">Horizontal defm (microns)</th><th rowspan="2">Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>1,19</td><td>124,2</td><td>131</td><td>5,1</td><td>0,658</td><td>2407</td><td>2476</td></tr><tr><td>2</td><td>1,18</td><td>122,6</td><td>119</td><td>4,9</td><td>0,637</td><td>2477</td><td>2523</td></tr><tr><td>3</td><td>1,18</td><td>122,5</td><td>135</td><td>5,0</td><td>0,681</td><td>2433</td><td>2533</td></tr><tr><td>4</td><td>1,18</td><td>123,1</td><td>121</td><td>5,0</td><td>0,641</td><td>2453</td><td>2505</td></tr><tr><td>5</td><td>1,18</td><td>122,6</td><td>127</td><td>4,9</td><td>0,657</td><td>2467</td><td>2538</td></tr><tr><td>Mean</td><td>1,18</td><td>123,0</td><td>127</td><td>5,0</td><td>0,655</td><td>2447</td><td>2515</td></tr></tbody></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)		Measured	Adjusted	1	1,19	124,2	131	5,1	0,658	2407	2476	2	1,18	122,6	119	4,9	0,637	2477	2523	3	1,18	122,5	135	5,0	0,681	2433	2533	4	1,18	123,1	121	5,0	0,641	2453	2505	5	1,18	122,6	127	4,9	0,657	2467	2538	Mean	1,18	123,0	127	5,0	0,655	2447	2515	MDC 2515 HUMBOLDT 0.280
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)							Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																	
			Measured	Adjusted																																																									
1	1,19	124,2	131	5,1	0,658	2407	2476																																																						
2	1,18	122,6	119	4,9	0,637	2477	2523																																																						
3	1,18	122,5	135	5,0	0,681	2433	2533																																																						
4	1,18	123,1	121	5,0	0,641	2453	2505																																																						
5	1,18	122,6	127	4,9	0,657	2467	2538																																																						
Mean	1,18	123,0	127	5,0	0,655	2447	2515																																																						

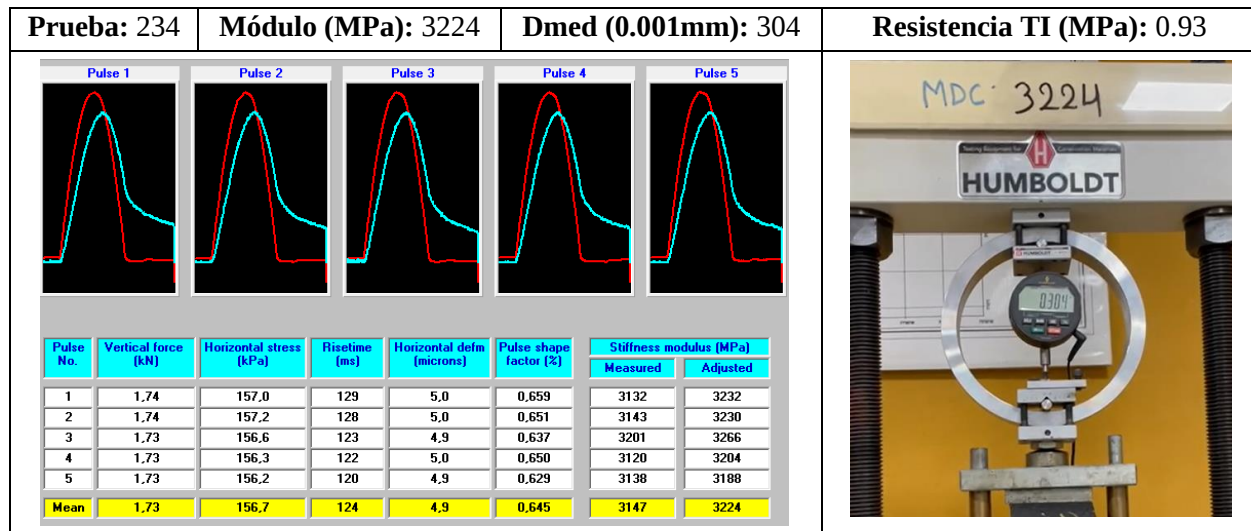
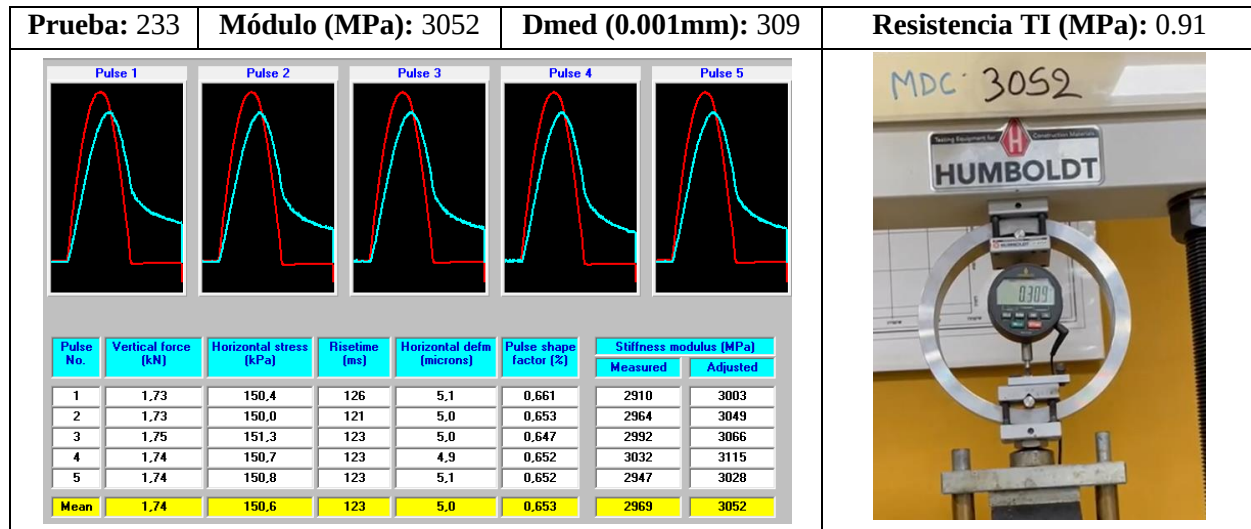
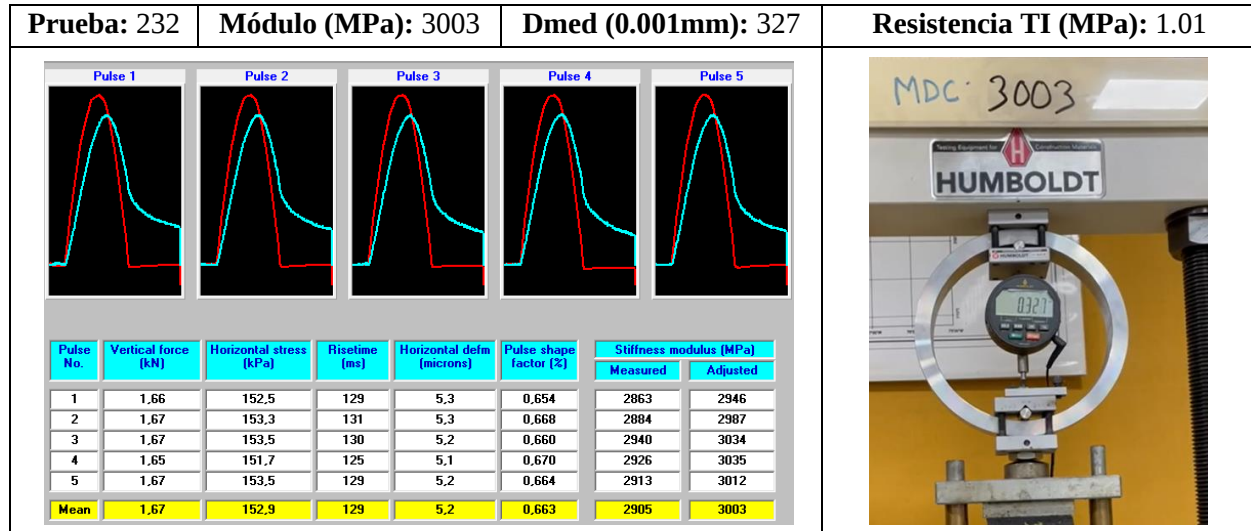


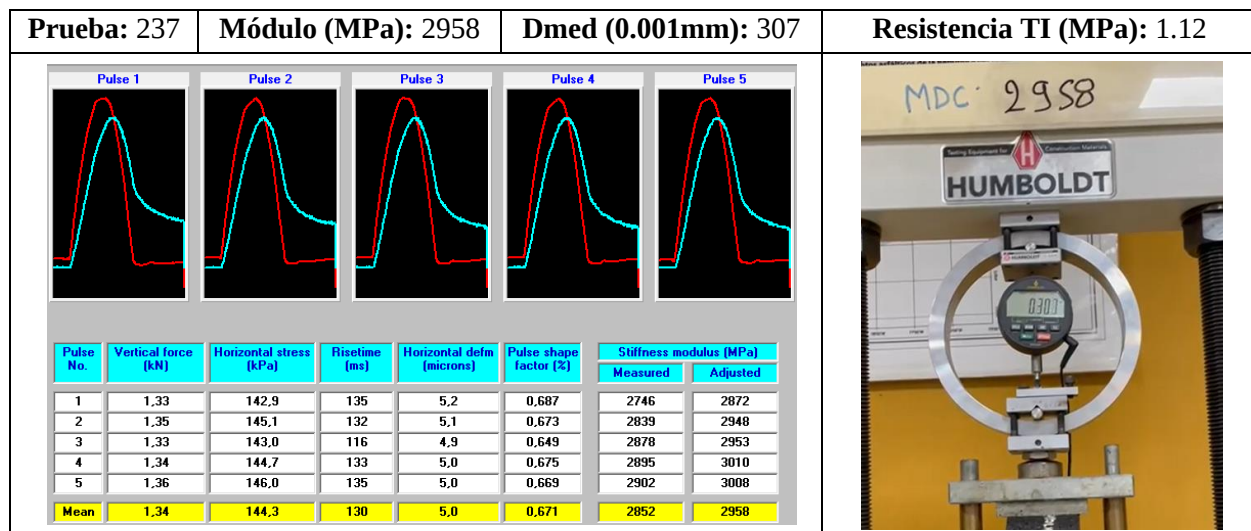
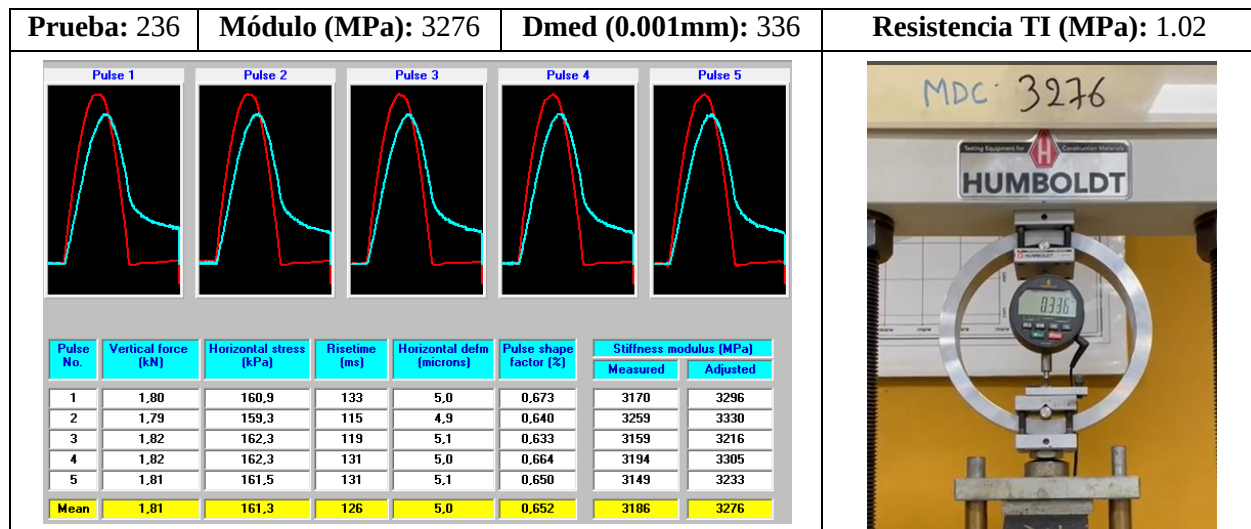
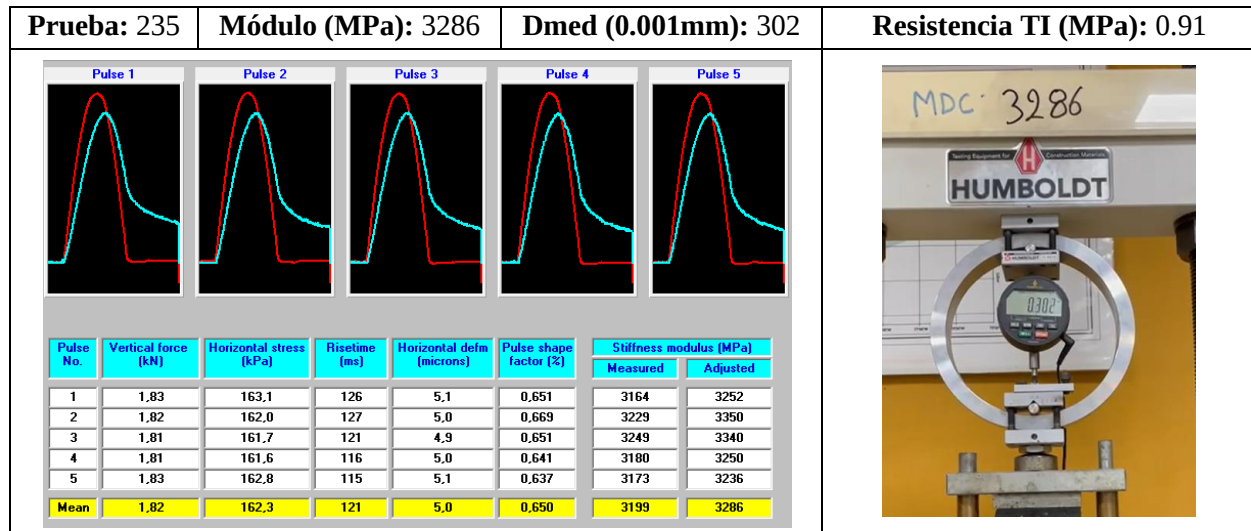


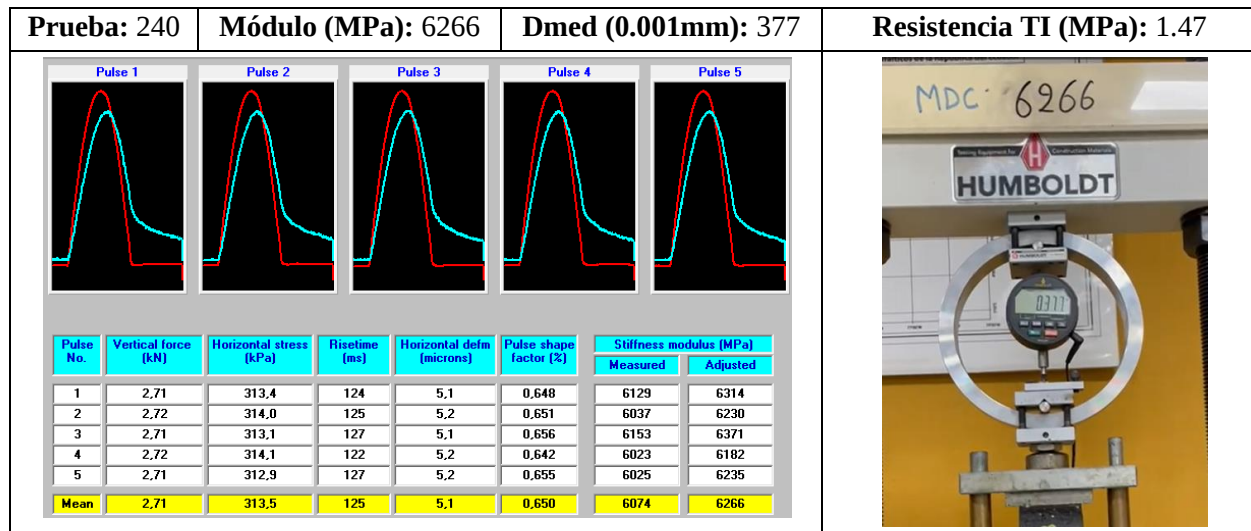
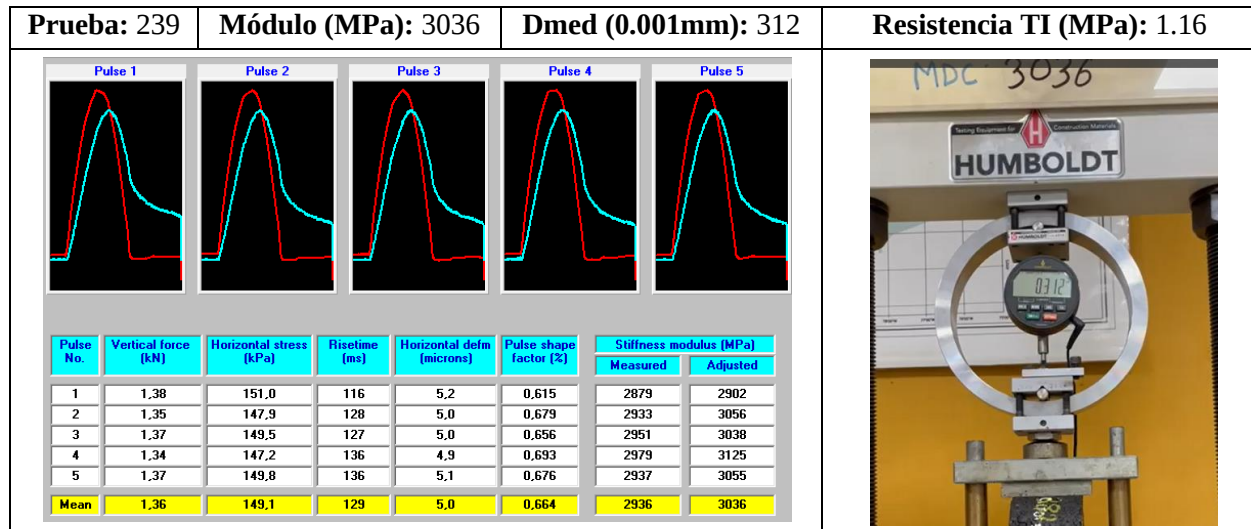
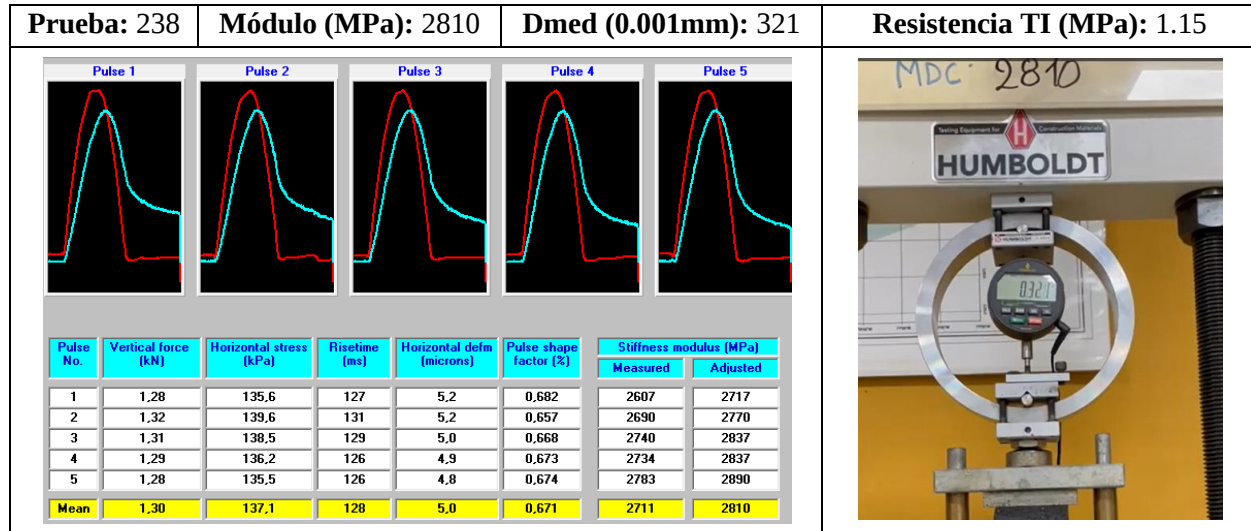


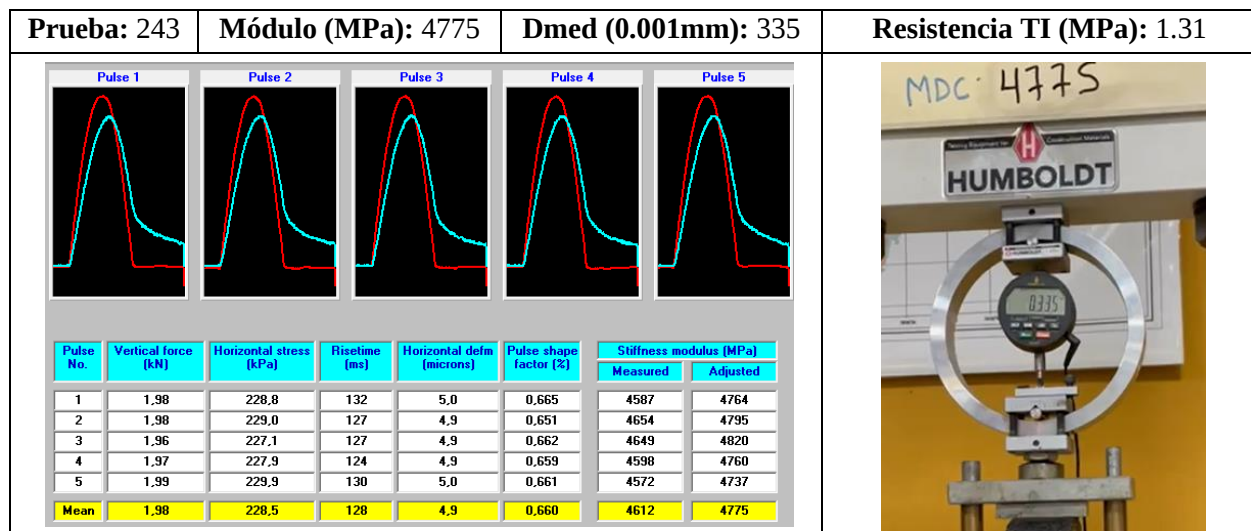
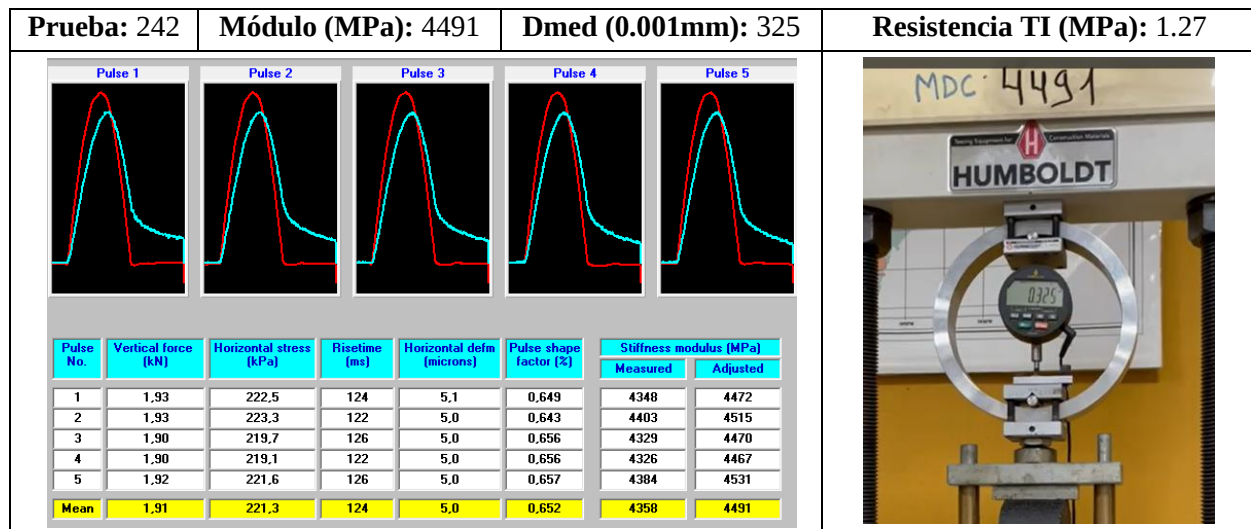
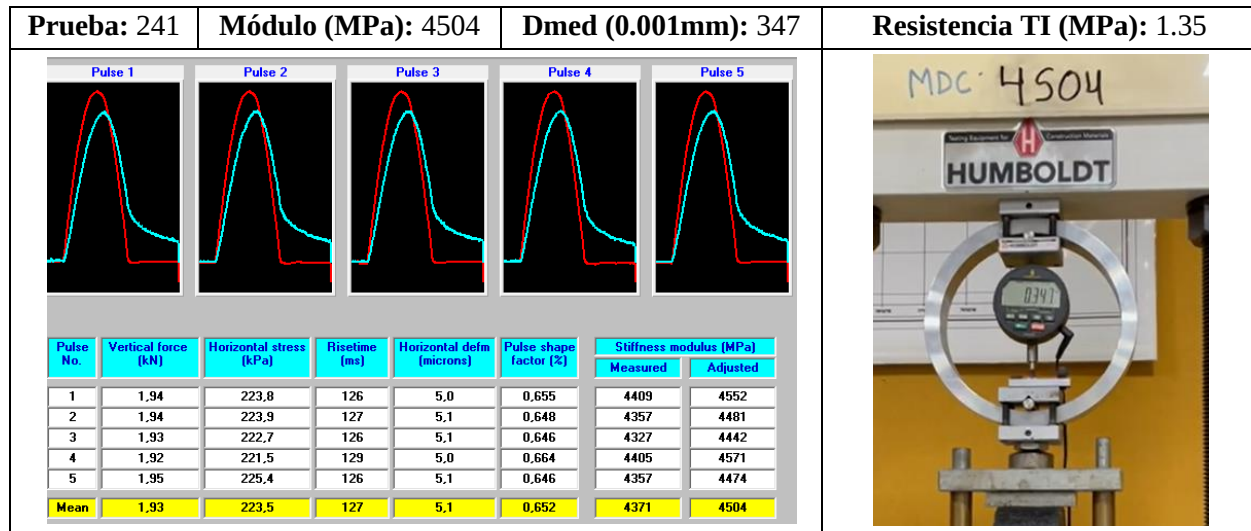


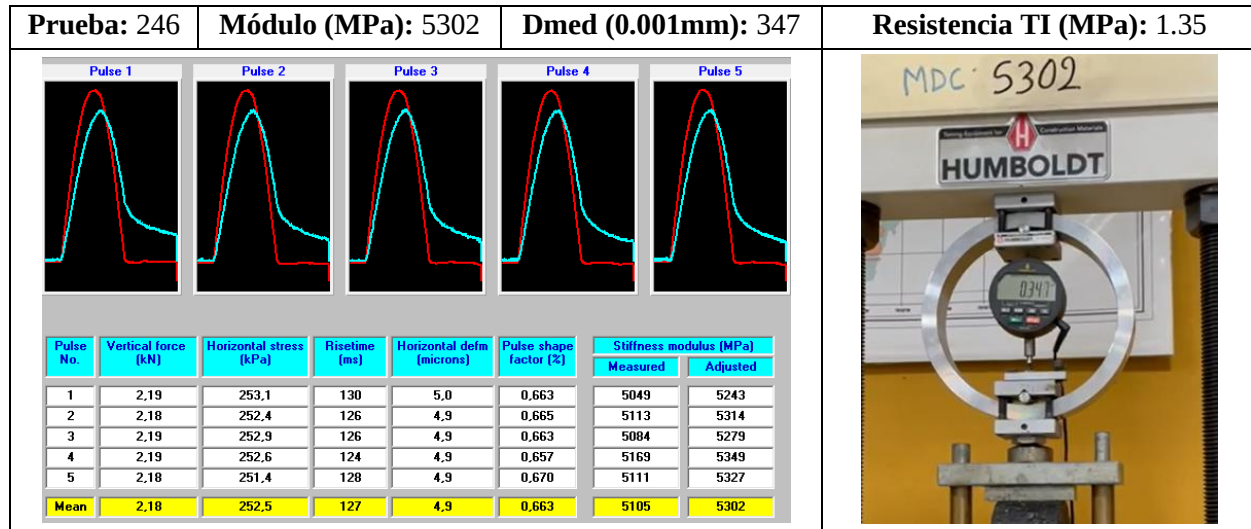
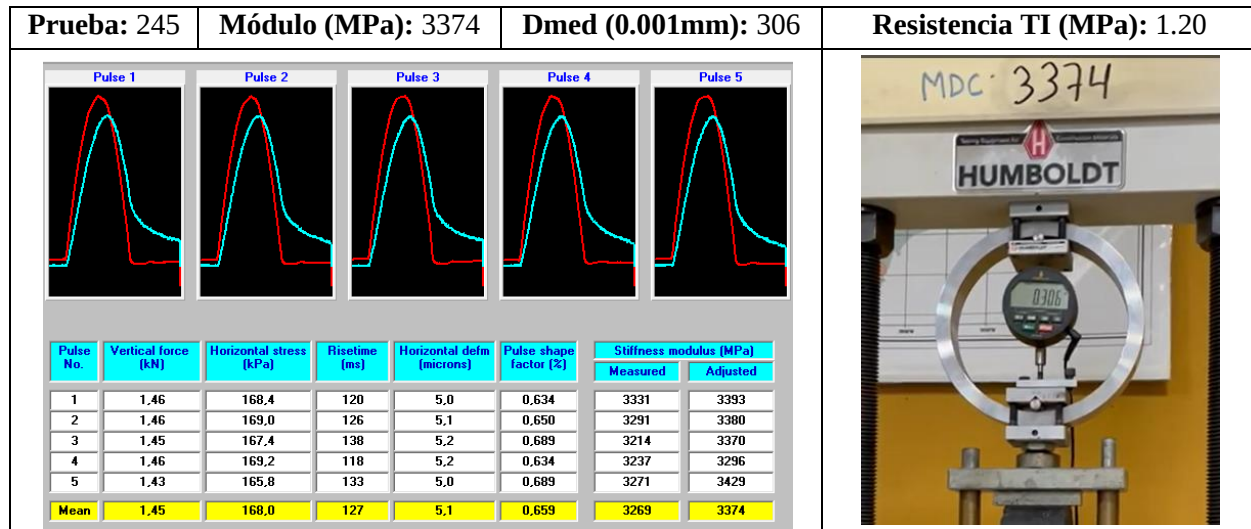
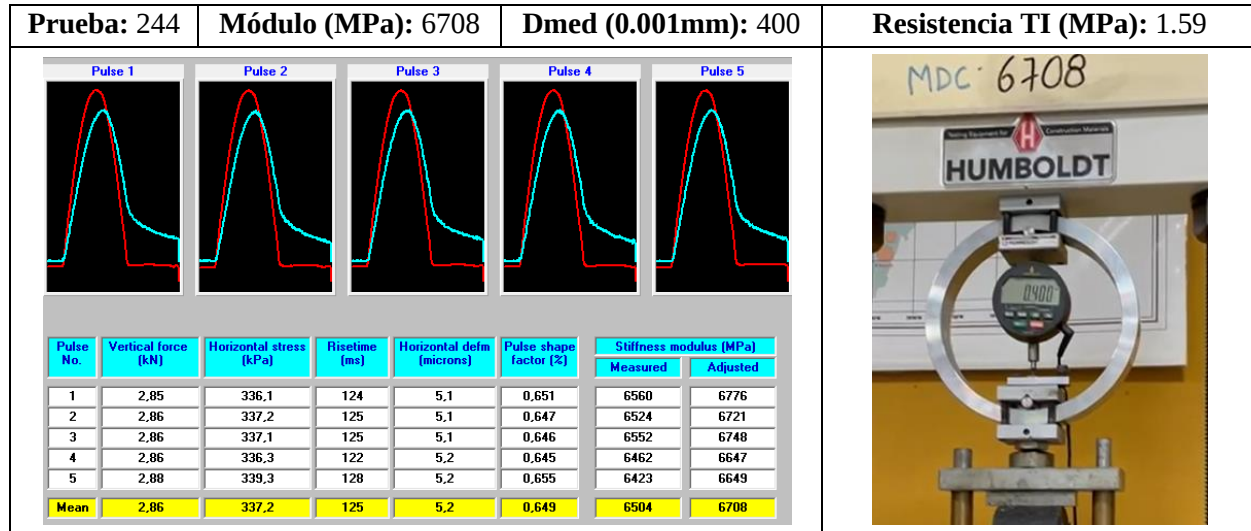


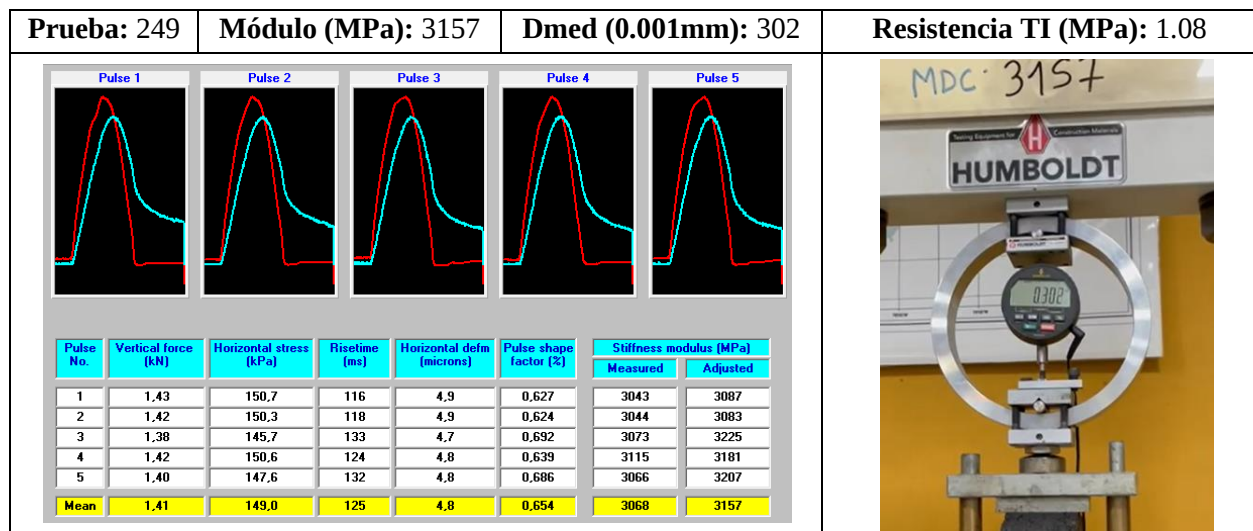
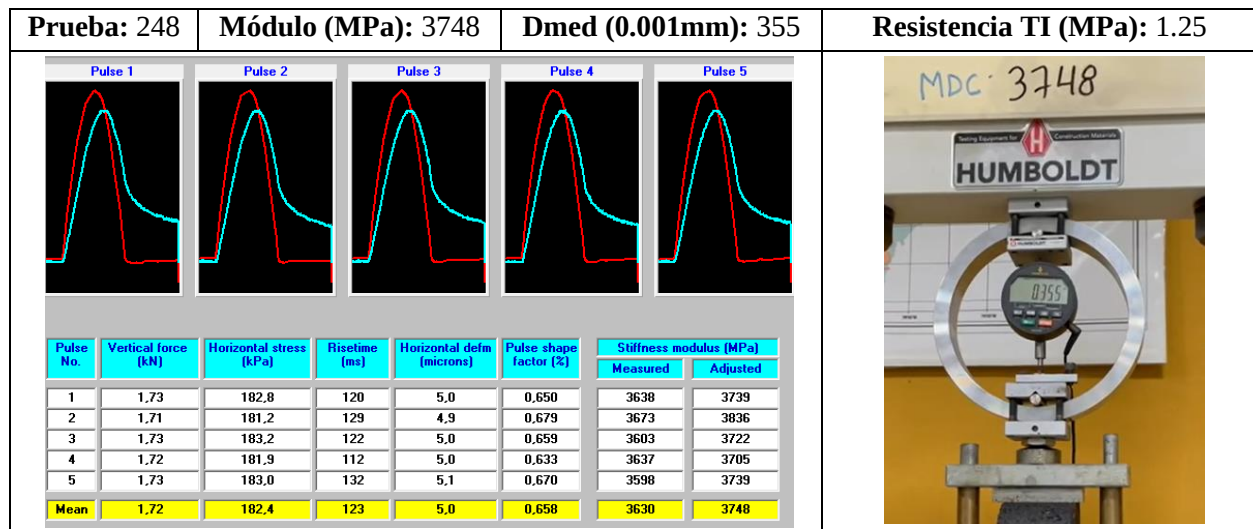
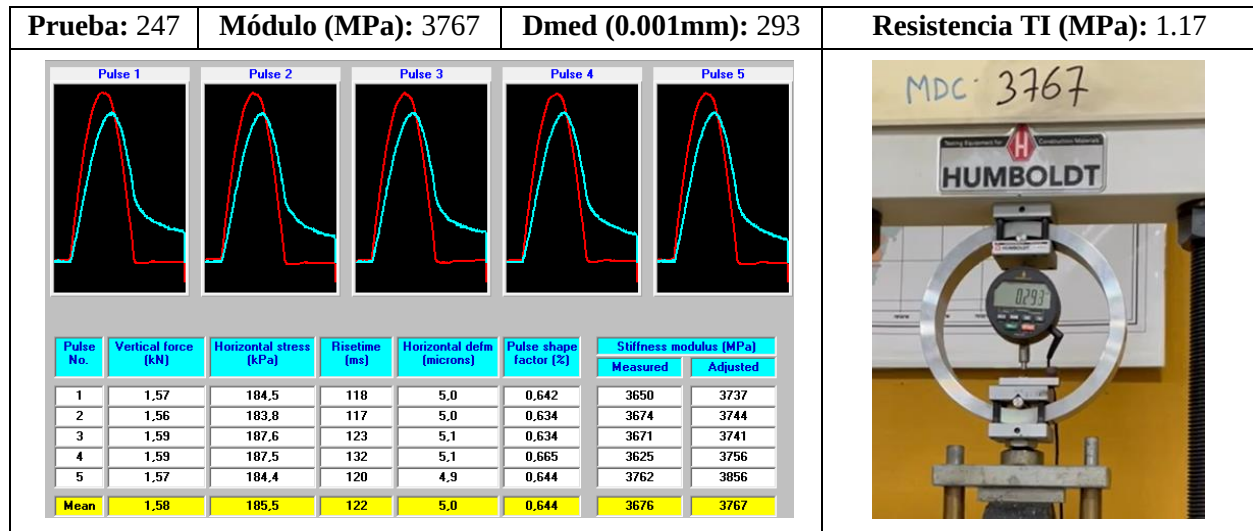








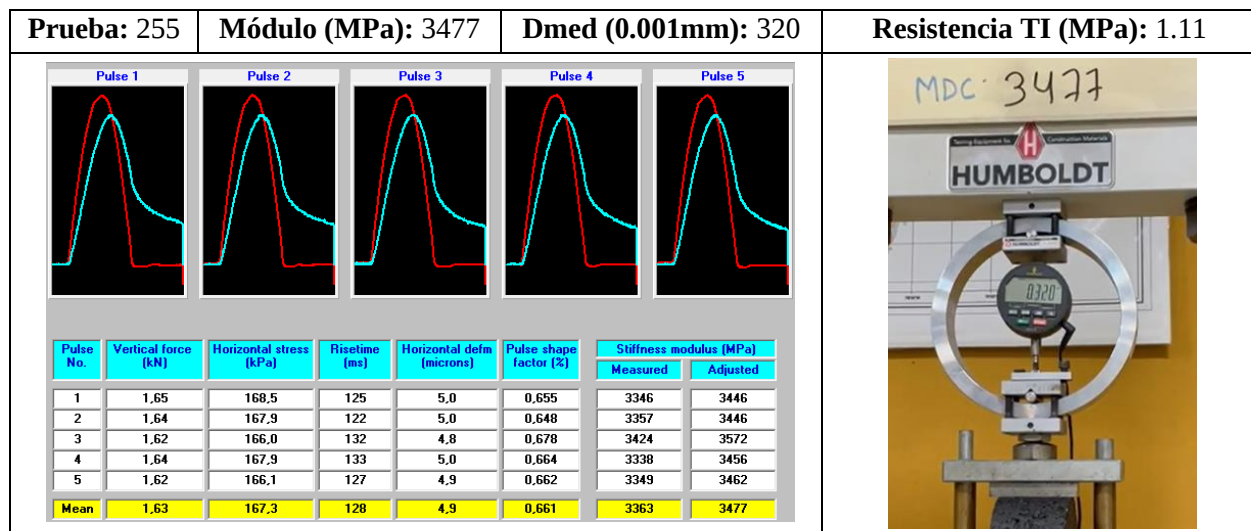
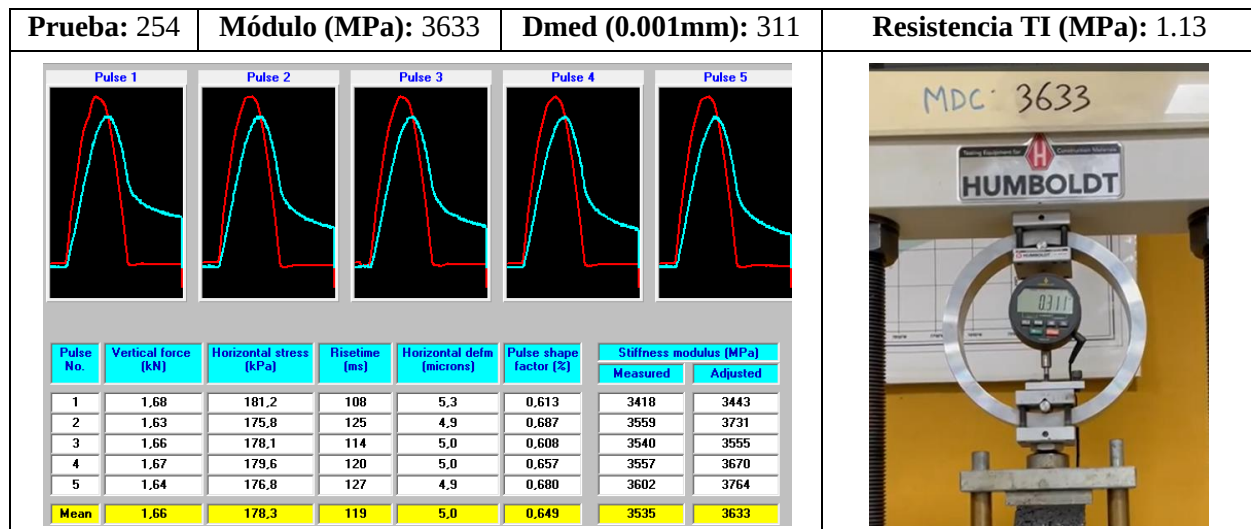
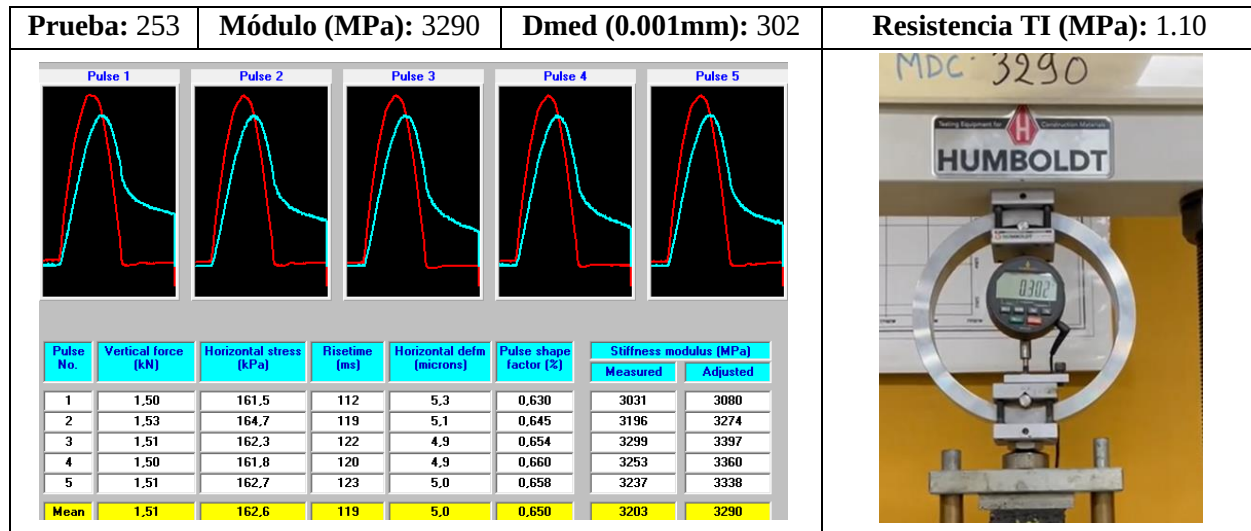


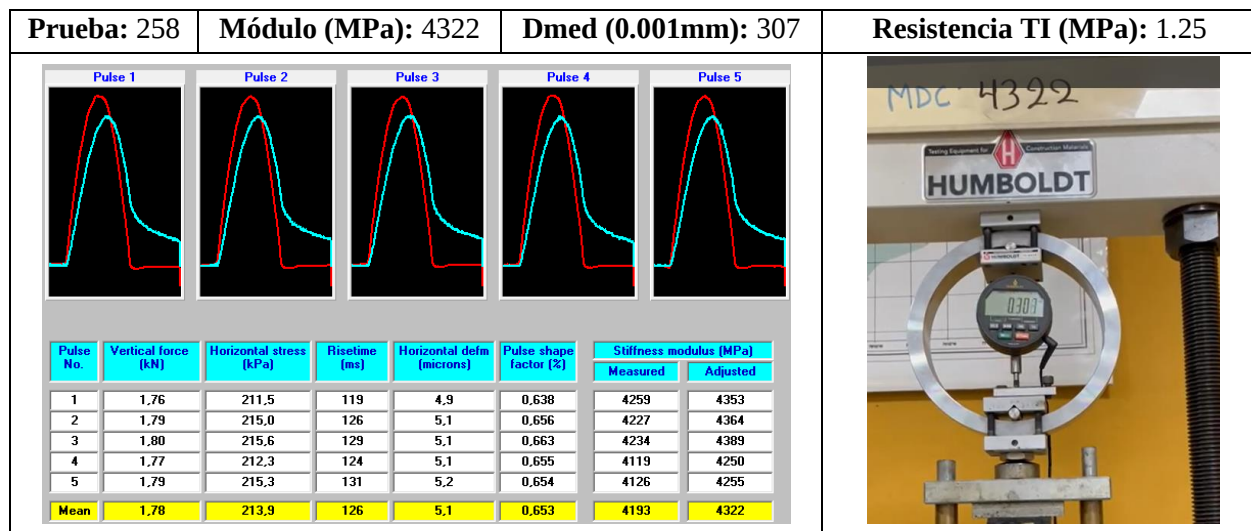
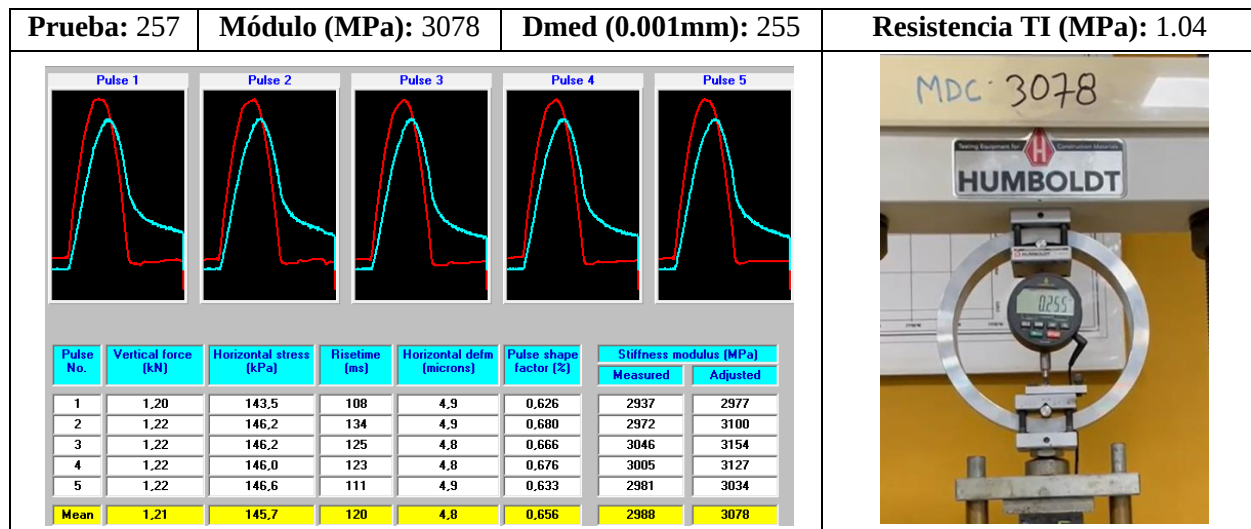
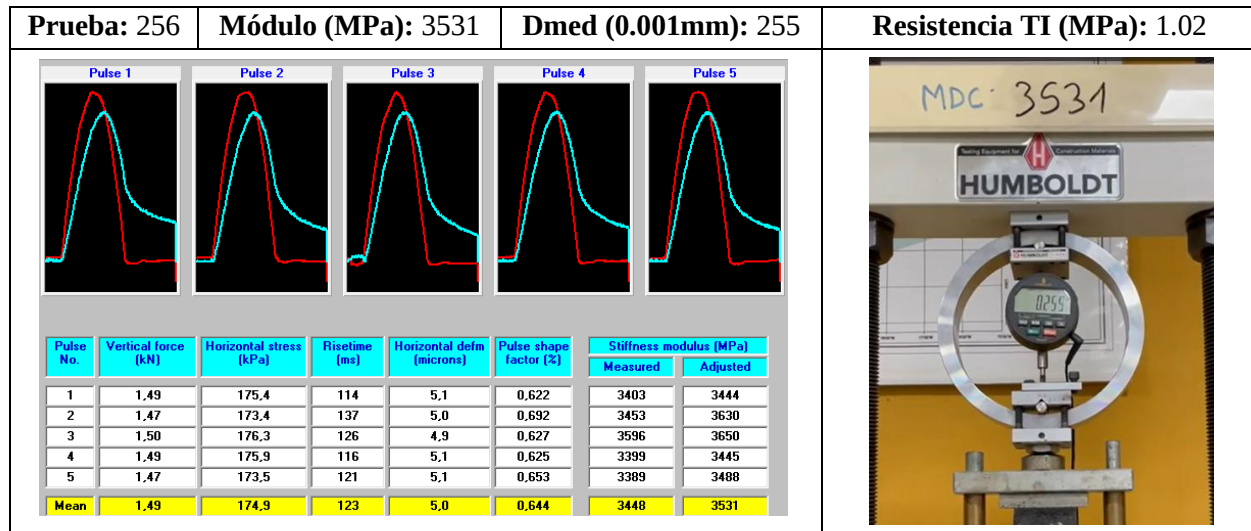


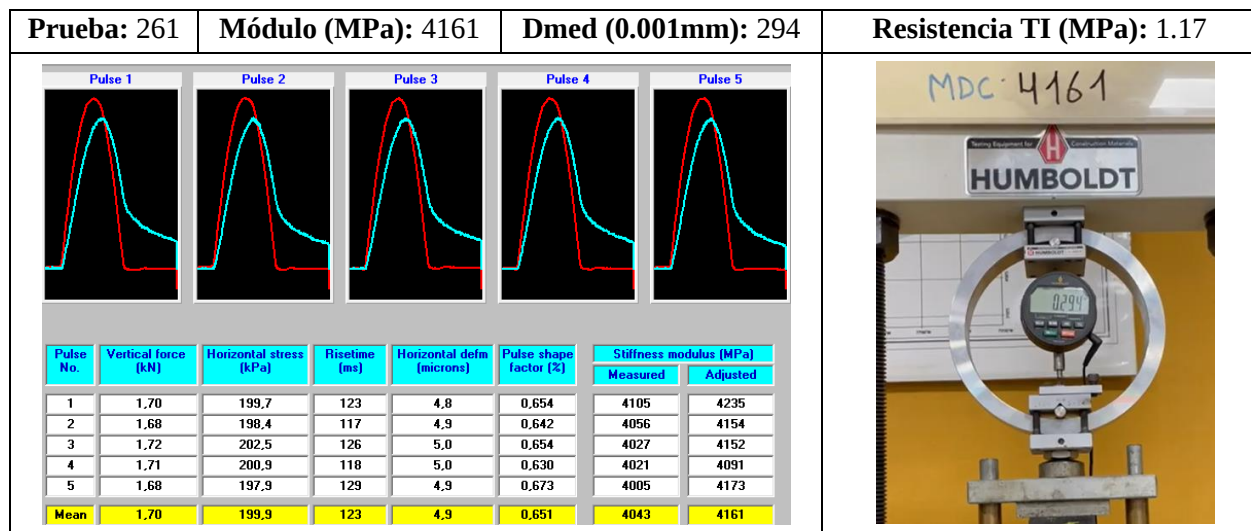
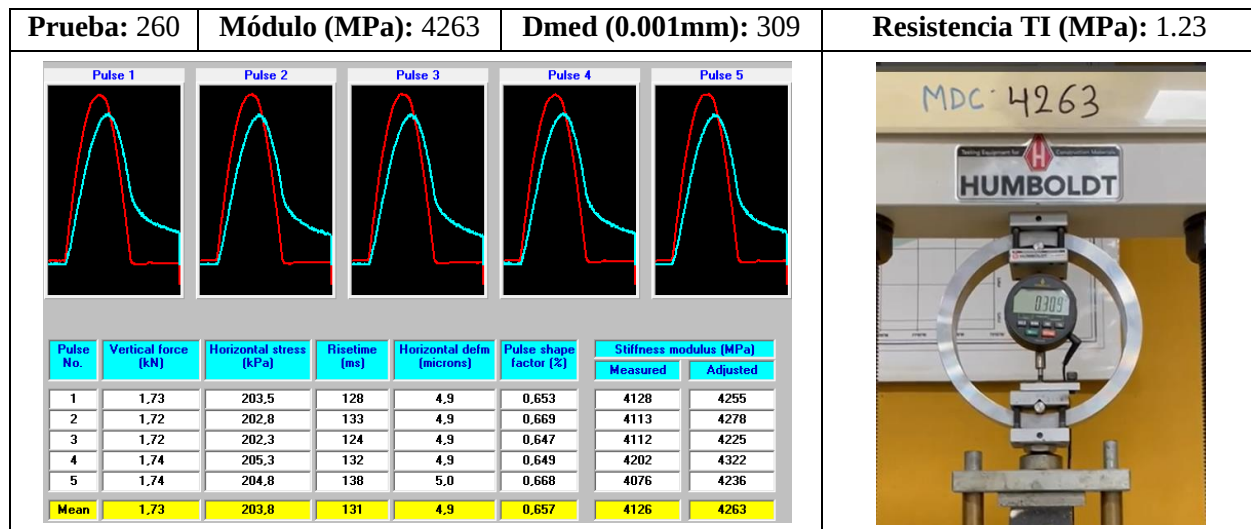
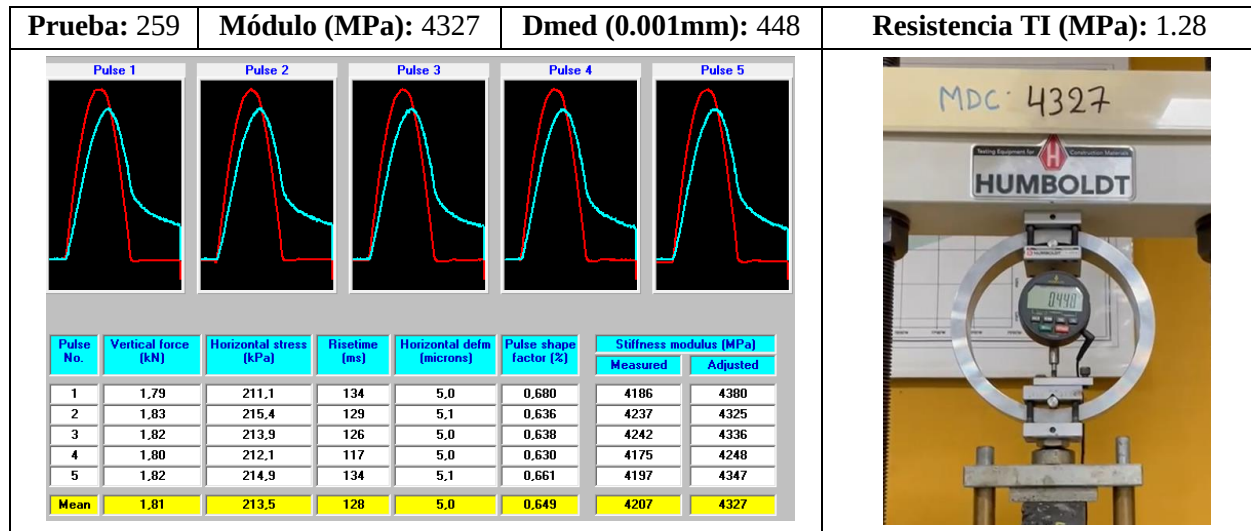
Prueba: 250	Módulo (MPa): 3925	Dmed (0.001mm): 330	Resistencia TI (MPa): 1.16																																																										
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5 <table><thead><tr><th rowspan="2">Pulse No.</th><th rowspan="2">Vertical force (kN)</th><th rowspan="2">Horizontal stress (kPa)</th><th rowspan="2">Risetime (ms)</th><th rowspan="2">Horizontal defm (microns)</th><th rowspan="2">Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>1.75</td><td>182.5</td><td>118</td><td>4.5</td><td>0.636</td><td>3990</td><td>4073</td></tr><tr><td>2</td><td>1.76</td><td>183.0</td><td>126</td><td>4.7</td><td>0.651</td><td>3856</td><td>3968</td></tr><tr><td>3</td><td>1.76</td><td>183.3</td><td>114</td><td>4.8</td><td>0.620</td><td>3796</td><td>3840</td></tr><tr><td>4</td><td>1.74</td><td>180.7</td><td>126</td><td>4.8</td><td>0.665</td><td>3770</td><td>3908</td></tr><tr><td>5</td><td>1.75</td><td>181.9</td><td>131</td><td>4.9</td><td>0.667</td><td>3696</td><td>3835</td></tr><tr><td>Mean</td><td>1.75</td><td>182.3</td><td>123</td><td>4.7</td><td>0.648</td><td>3822</td><td>3925</td></tr></tbody></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)		Measured	Adjusted	1	1.75	182.5	118	4.5	0.636	3990	4073	2	1.76	183.0	126	4.7	0.651	3856	3968	3	1.76	183.3	114	4.8	0.620	3796	3840	4	1.74	180.7	126	4.8	0.665	3770	3908	5	1.75	181.9	131	4.9	0.667	3696	3835	Mean	1.75	182.3	123	4.7	0.648	3822	3925	MDC 3925 HUMBOLDT 0.330
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)							Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																	
			Measured	Adjusted																																																									
1	1.75	182.5	118	4.5	0.636	3990	4073																																																						
2	1.76	183.0	126	4.7	0.651	3856	3968																																																						
3	1.76	183.3	114	4.8	0.620	3796	3840																																																						
4	1.74	180.7	126	4.8	0.665	3770	3908																																																						
5	1.75	181.9	131	4.9	0.667	3696	3835																																																						
Mean	1.75	182.3	123	4.7	0.648	3822	3925																																																						

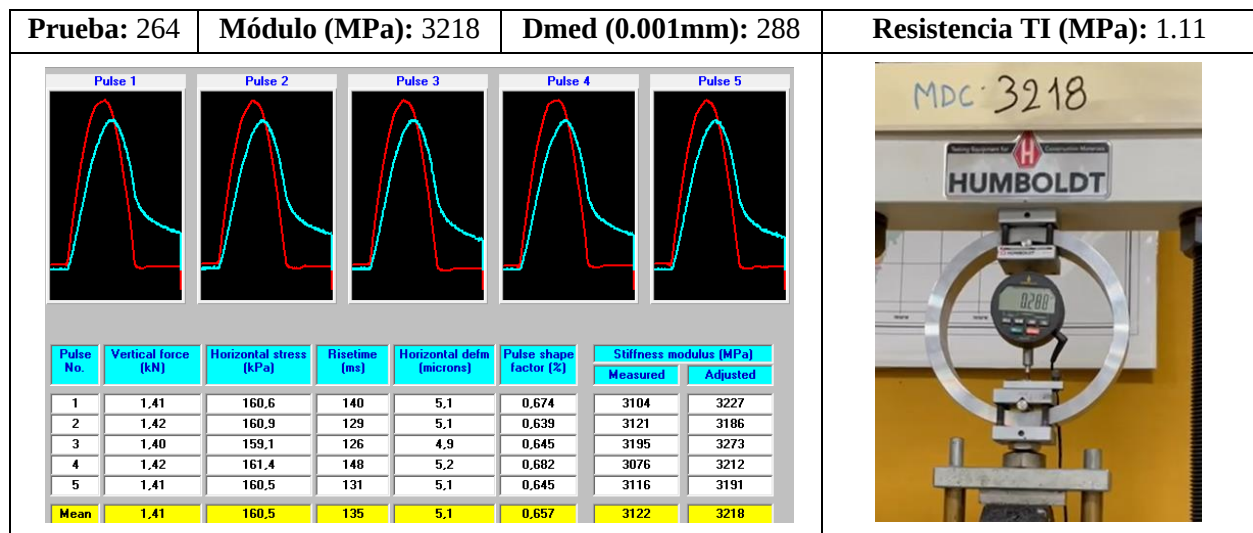
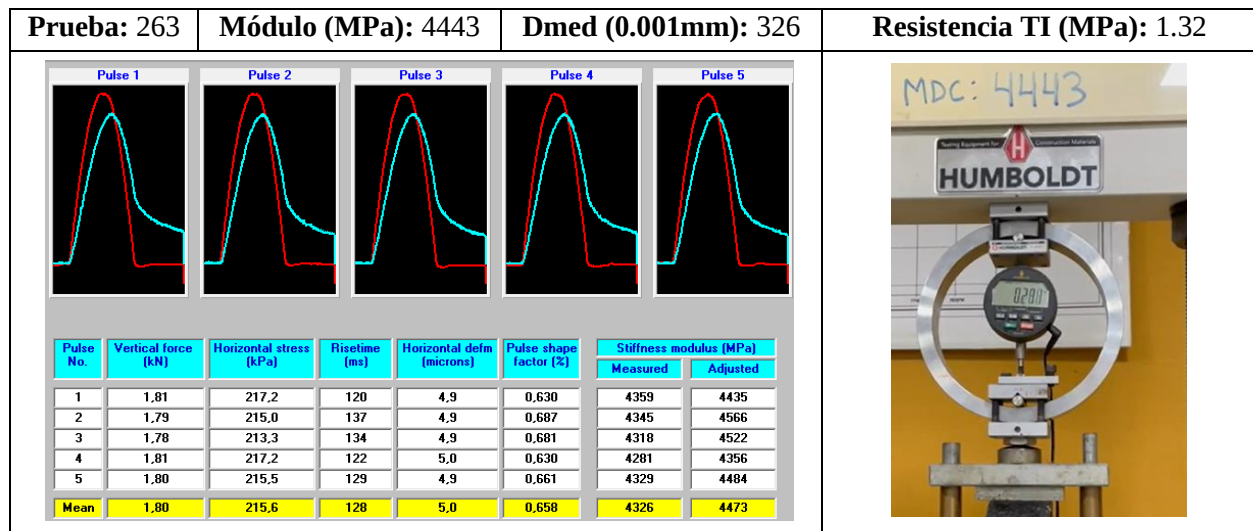
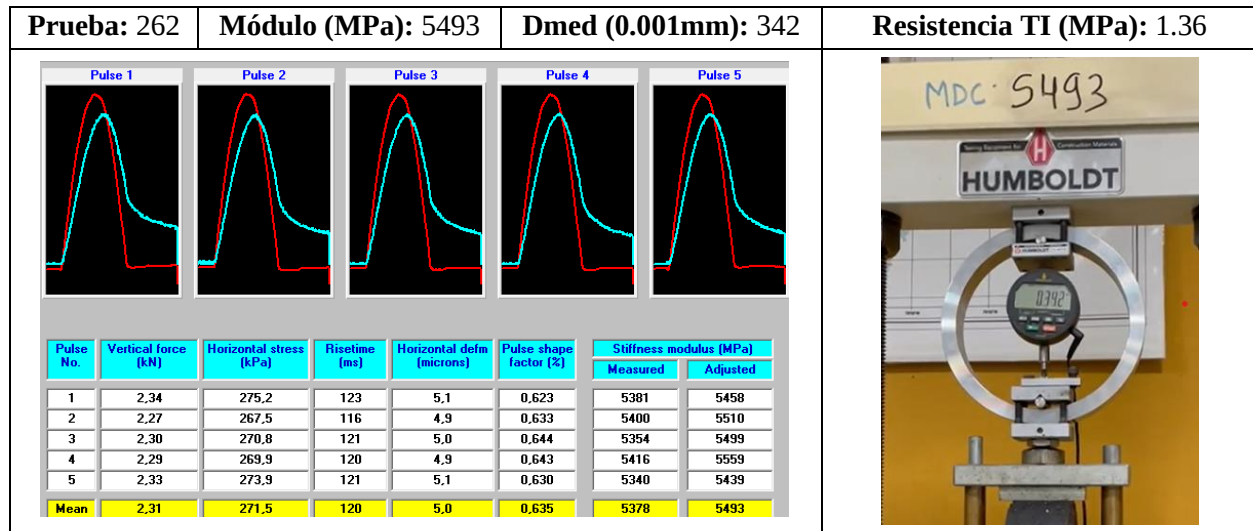
Prueba: 251	Módulo (MPa): 3764	Dmed (0.001mm): 331	Resistencia TI (MPa): 1.17																																																																
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5 <table><thead><tr><th>Pulse No.</th><th>Vertical force (kN)</th><th>Horizontal stress (kPa)</th><th>Risetime (ms)</th><th>Horizontal defm (microns)</th><th>Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus [MPa]</th></tr><tr><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>1.76</td><td>182.7</td><td>129</td><td>5.1</td><td>0.659</td><td>3550</td><td>3666</td></tr><tr><td>2</td><td>1.76</td><td>182.7</td><td>120</td><td>4.9</td><td>0.634</td><td>3713</td><td>3784</td></tr><tr><td>3</td><td>1.76</td><td>183.4</td><td>128</td><td>4.9</td><td>0.655</td><td>3683</td><td>3797</td></tr><tr><td>4</td><td>1.76</td><td>183.2</td><td>129</td><td>5.0</td><td>0.658</td><td>3626</td><td>3744</td></tr><tr><td>5</td><td>1.74</td><td>180.5</td><td>128</td><td>4.9</td><td>0.672</td><td>3679</td><td>3828</td></tr><tr><td>Mean</td><td>1.75</td><td>182.5</td><td>127</td><td>5.0</td><td>0.656</td><td>3650</td><td>3764</td></tr></tbody></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus [MPa]								Measured	Adjusted	1	1.76	182.7	129	5.1	0.659	3550	3666	2	1.76	182.7	120	4.9	0.634	3713	3784	3	1.76	183.4	128	4.9	0.655	3683	3797	4	1.76	183.2	129	5.0	0.658	3626	3744	5	1.74	180.5	128	4.9	0.672	3679	3828	Mean	1.75	182.5	127	5.0	0.656	3650	3764	MDC-3764 HUMBOLDT 0.331
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus [MPa]																																																													
						Measured	Adjusted																																																												
1	1.76	182.7	129	5.1	0.659	3550	3666																																																												
2	1.76	182.7	120	4.9	0.634	3713	3784																																																												
3	1.76	183.4	128	4.9	0.655	3683	3797																																																												
4	1.76	183.2	129	5.0	0.658	3626	3744																																																												
5	1.74	180.5	128	4.9	0.672	3679	3828																																																												
Mean	1.75	182.5	127	5.0	0.656	3650	3764																																																												

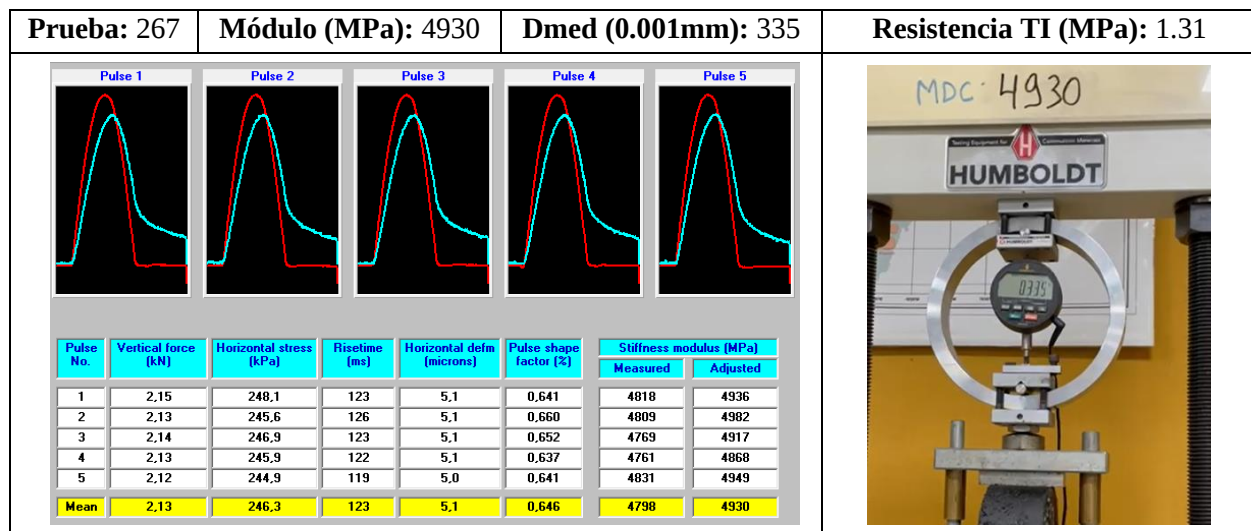
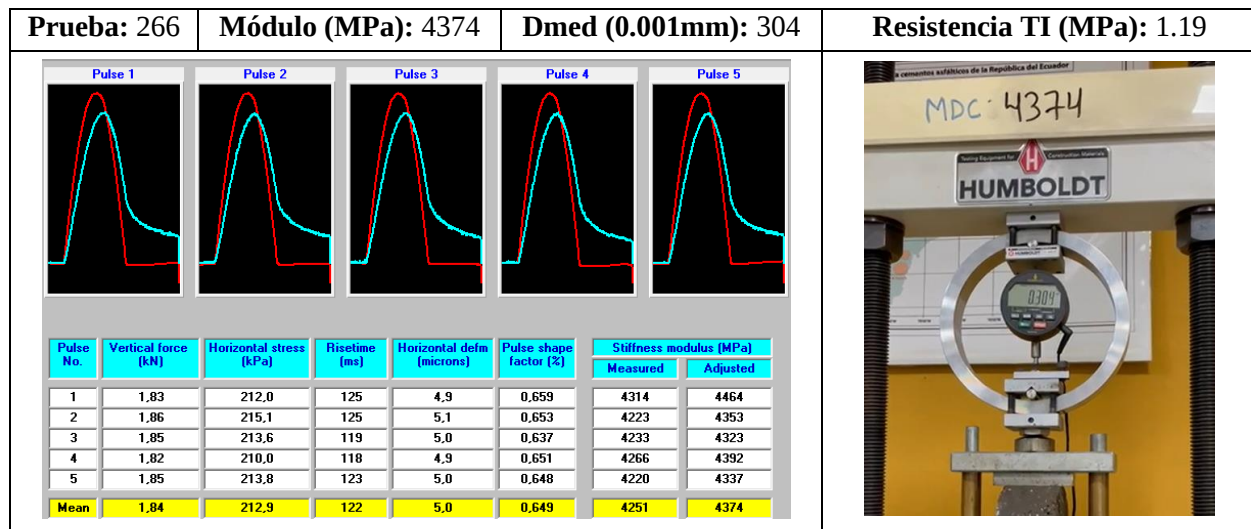
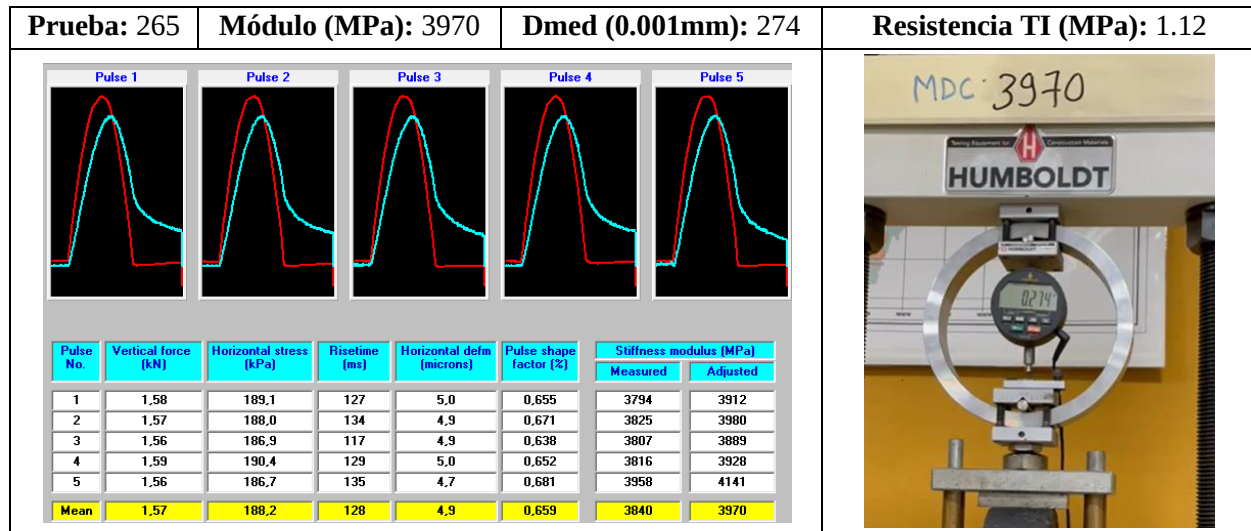
Prueba: 252	Módulo (MPa): 2840	Dmed (0.001mm): 309	Resistencia TI (MPa): 1.07																																																																
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5 <table><thead><tr><th>Pulse No.</th><th>Vertical force (kN)</th><th>Horizontal stress (kPa)</th><th>Risetime (ms)</th><th>Horizontal defm (microns)</th><th>Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>1.42</td><td>145.6</td><td>128</td><td>5.4</td><td>0.633</td><td>2692</td><td>2739</td></tr><tr><td>2</td><td>1.38</td><td>140.8</td><td>132</td><td>5.1</td><td>0.674</td><td>2759</td><td>2866</td></tr><tr><td>3</td><td>1.40</td><td>143.0</td><td>140</td><td>5.0</td><td>0.644</td><td>2825</td><td>2890</td></tr><tr><td>4</td><td>1.36</td><td>139.0</td><td>121</td><td>5.0</td><td>0.652</td><td>2755</td><td>2831</td></tr><tr><td>5</td><td>1.41</td><td>143.8</td><td>127</td><td>5.1</td><td>0.632</td><td>2826</td><td>2874</td></tr><tr><td>Mean</td><td>1.39</td><td>142.4</td><td>130</td><td>5.1</td><td>0.647</td><td>2772</td><td>2840</td></tr></tbody></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)								Measured	Adjusted	1	1.42	145.6	128	5.4	0.633	2692	2739	2	1.38	140.8	132	5.1	0.674	2759	2866	3	1.40	143.0	140	5.0	0.644	2825	2890	4	1.36	139.0	121	5.0	0.652	2755	2831	5	1.41	143.8	127	5.1	0.632	2826	2874	Mean	1.39	142.4	130	5.1	0.647	2772	2840	MDC 2840 HUMBOLDT 0.309
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																													
						Measured	Adjusted																																																												
1	1.42	145.6	128	5.4	0.633	2692	2739																																																												
2	1.38	140.8	132	5.1	0.674	2759	2866																																																												
3	1.40	143.0	140	5.0	0.644	2825	2890																																																												
4	1.36	139.0	121	5.0	0.652	2755	2831																																																												
5	1.41	143.8	127	5.1	0.632	2826	2874																																																												
Mean	1.39	142.4	130	5.1	0.647	2772	2840																																																												







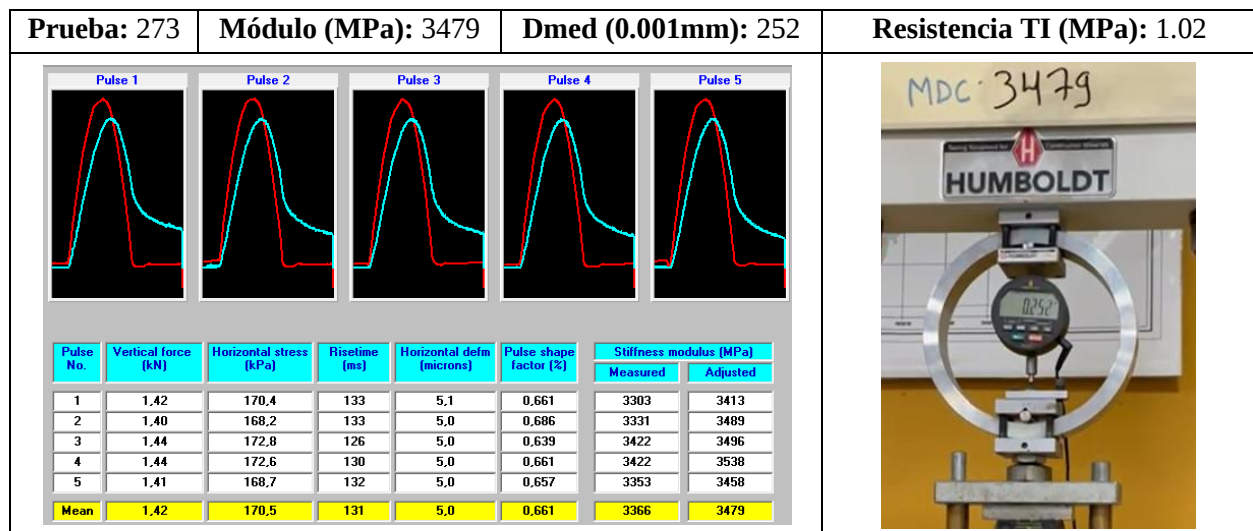
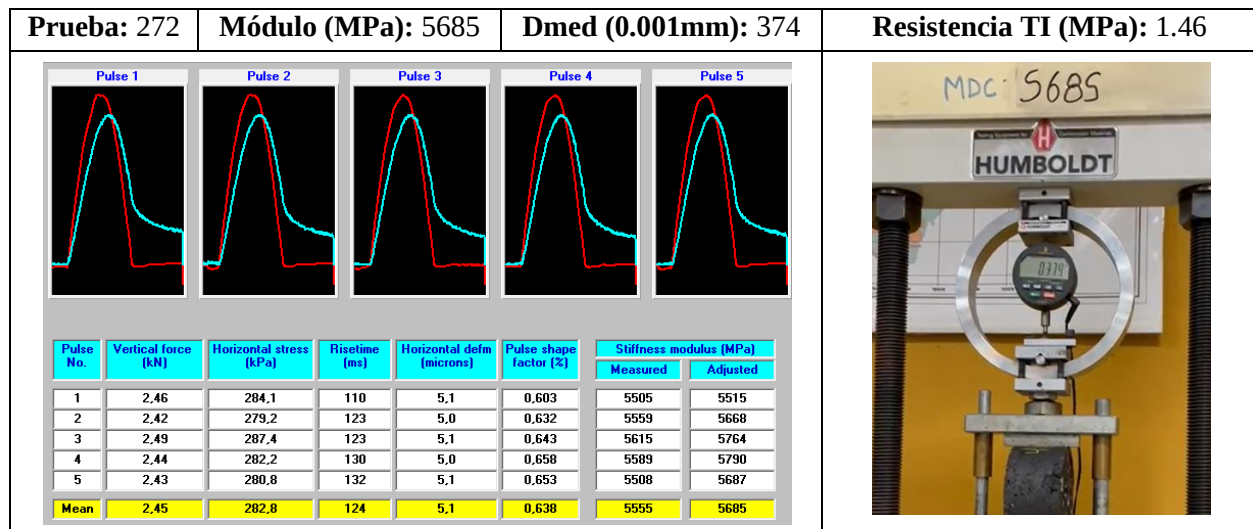
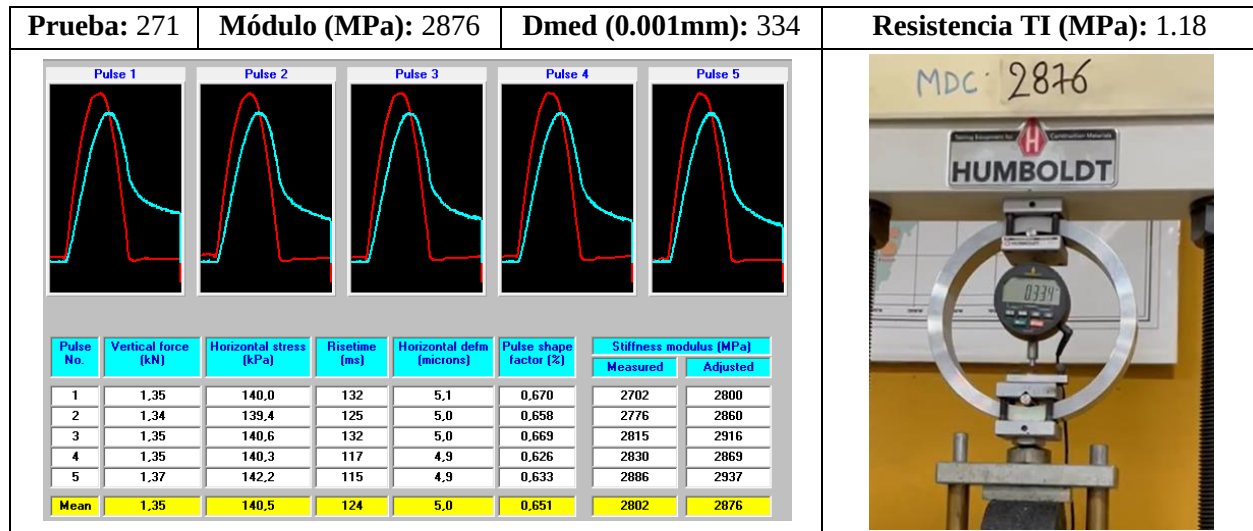


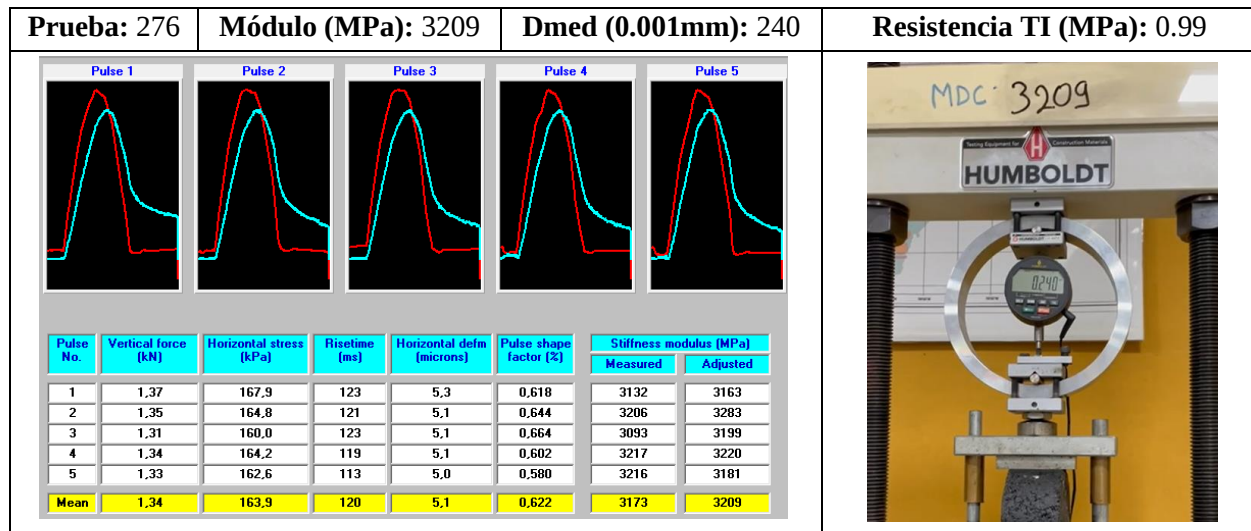
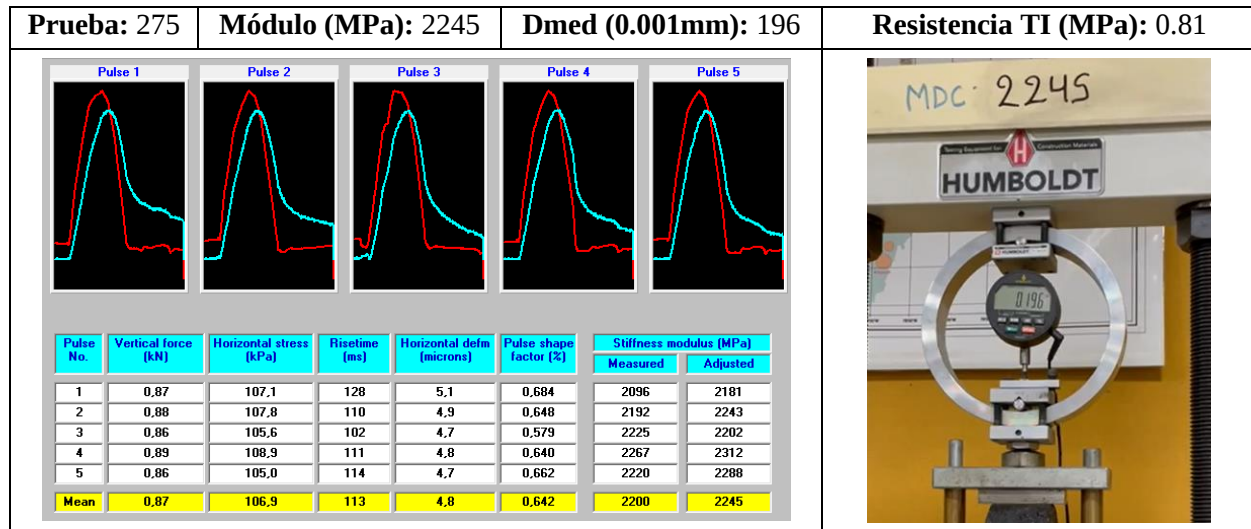
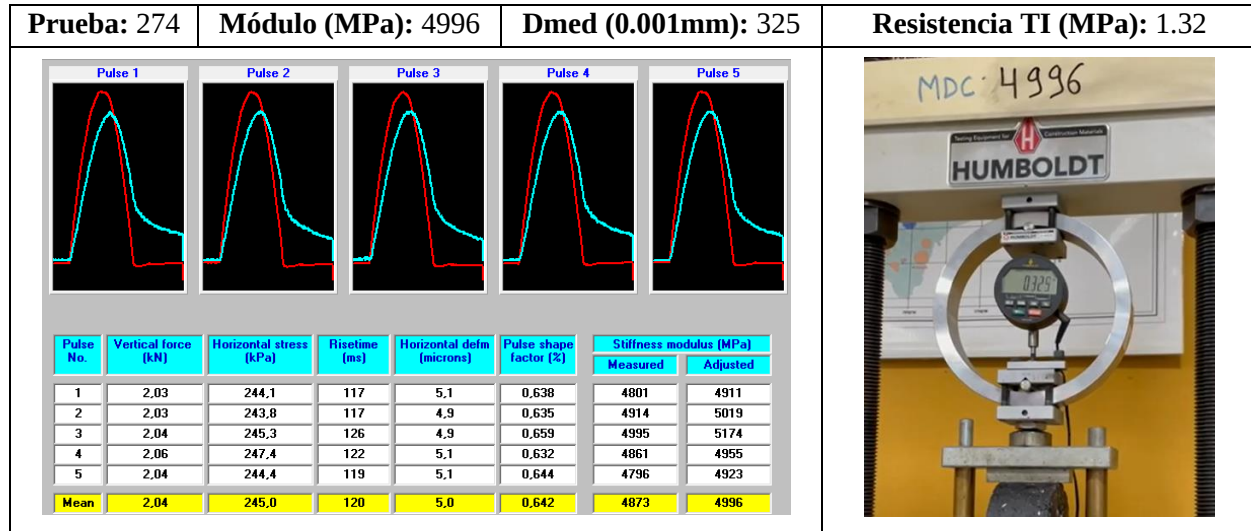


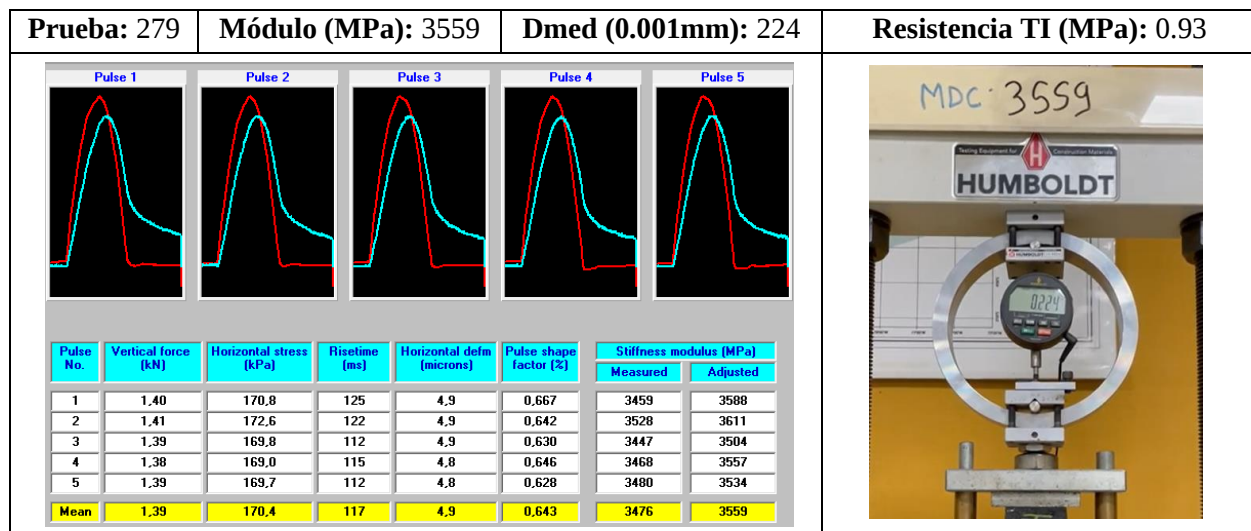
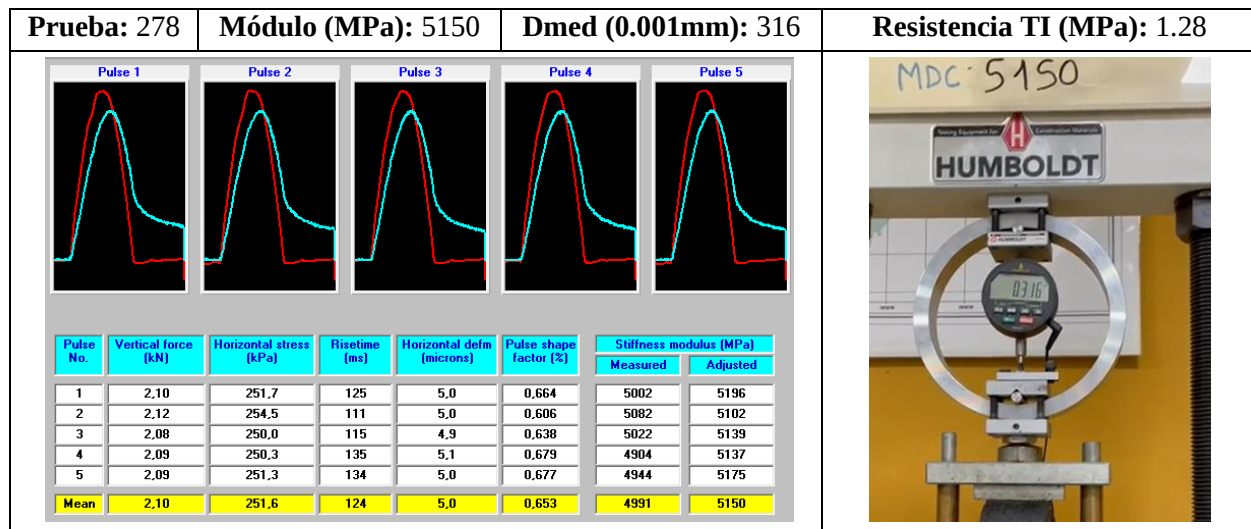
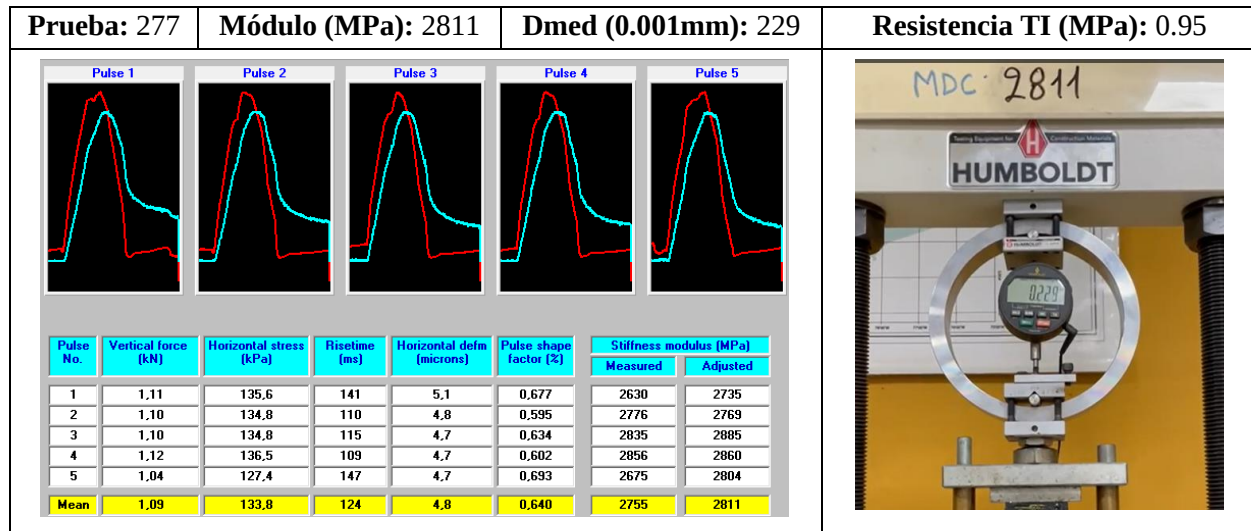
Prueba: 268	Módulo (MPa): 4440	Dmed (0.001mm): 288	Resistencia TI (MPa): 1.13																																																																
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5 <table><thead><tr><th>Pulse No.</th><th>Vertical force (kN)</th><th>Horizontal stress (kPa)</th><th>Risetime (ms)</th><th>Horizontal defm (microns)</th><th>Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>1.81</td><td>209,6</td><td>126</td><td>4,8</td><td>0,660</td><td>4331</td><td>4483</td></tr><tr><td>2</td><td>1.82</td><td>210,2</td><td>130</td><td>4,9</td><td>0,673</td><td>4275</td><td>4456</td></tr><tr><td>3</td><td>1.80</td><td>208,6</td><td>125</td><td>4,8</td><td>0,658</td><td>4334</td><td>4481</td></tr><tr><td>4</td><td>1.81</td><td>208,8</td><td>123</td><td>4,8</td><td>0,651</td><td>4292</td><td>4421</td></tr><tr><td>5</td><td>1.81</td><td>209,1</td><td>117</td><td>4,9</td><td>0,636</td><td>4272</td><td>4361</td></tr><tr><td>Mean</td><td>1.81</td><td>209,2</td><td>124</td><td>4,8</td><td>0,656</td><td>4301</td><td>4440</td></tr></tbody></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)								Measured	Adjusted	1	1.81	209,6	126	4,8	0,660	4331	4483	2	1.82	210,2	130	4,9	0,673	4275	4456	3	1.80	208,6	125	4,8	0,658	4334	4481	4	1.81	208,8	123	4,8	0,651	4292	4421	5	1.81	209,1	117	4,9	0,636	4272	4361	Mean	1.81	209,2	124	4,8	0,656	4301	4440	MDC 4440 HUMBOLDT 0.288
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																													
						Measured	Adjusted																																																												
1	1.81	209,6	126	4,8	0,660	4331	4483																																																												
2	1.82	210,2	130	4,9	0,673	4275	4456																																																												
3	1.80	208,6	125	4,8	0,658	4334	4481																																																												
4	1.81	208,8	123	4,8	0,651	4292	4421																																																												
5	1.81	209,1	117	4,9	0,636	4272	4361																																																												
Mean	1.81	209,2	124	4,8	0,656	4301	4440																																																												

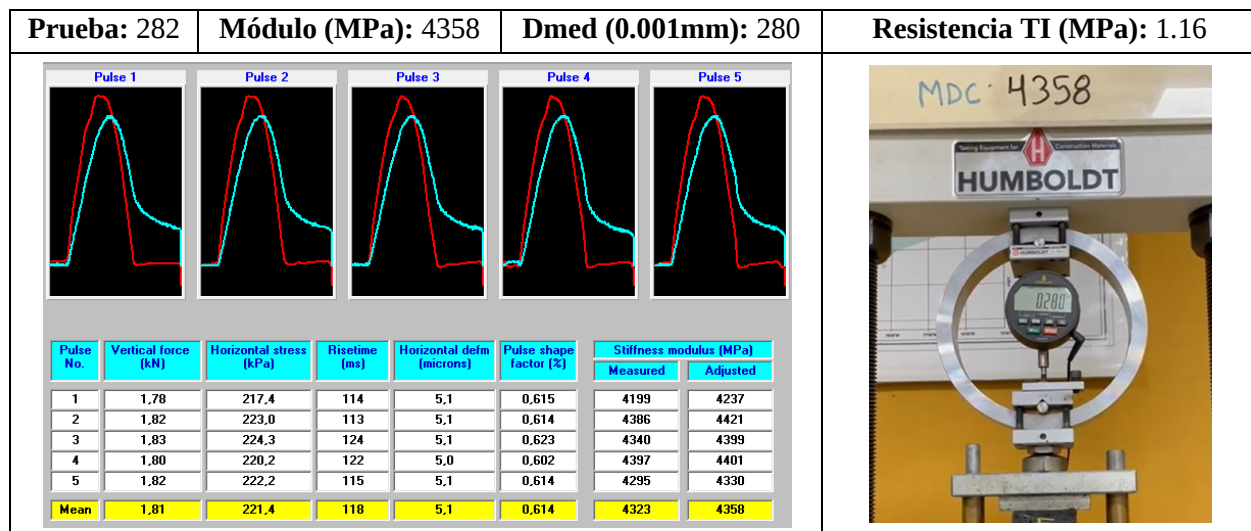
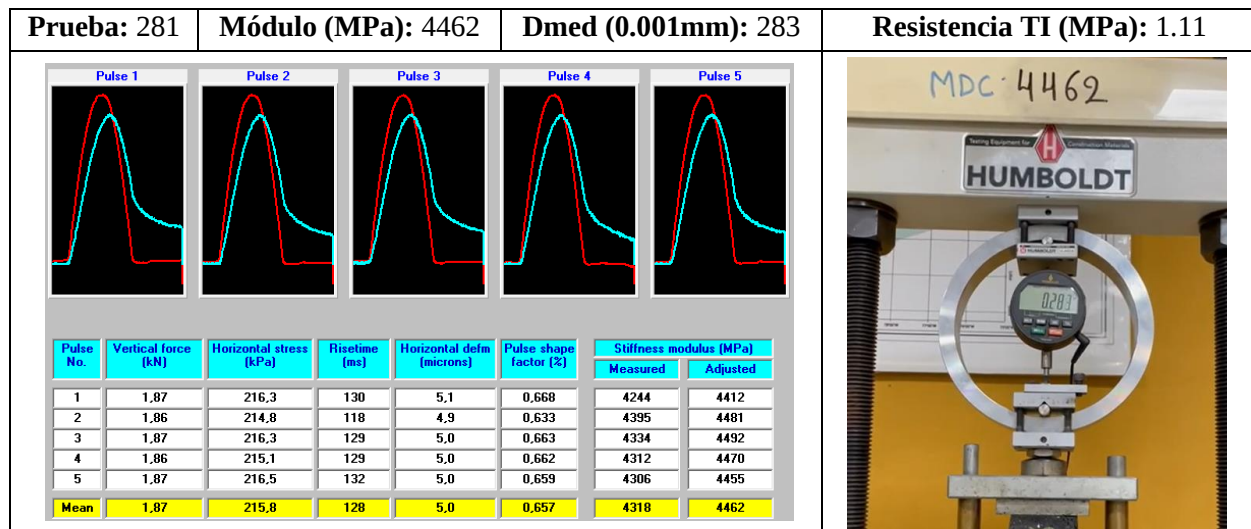
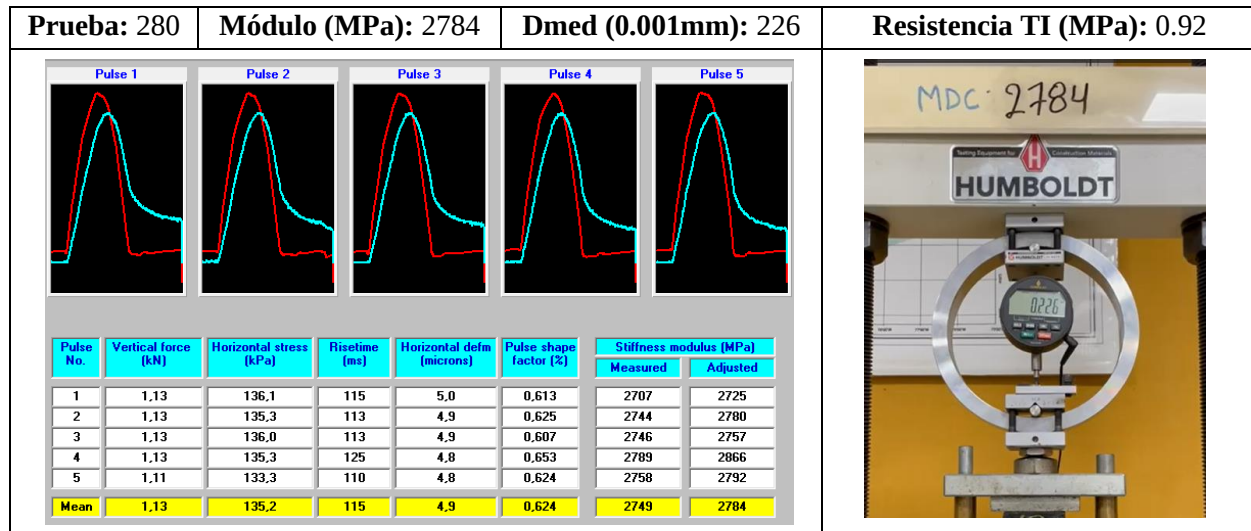
Prueba: 269	Módulo (MPa): 3003	Dmed (0.001mm): 300	Resistencia TI (MPa): 1.04																																																																
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5 <table><thead><tr><th>Pulse No.</th><th>Vertical force (kN)</th><th>Horizontal stress (kPa)</th><th>Risetime (ms)</th><th>Horizontal defm (microns)</th><th>Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>1.44</td><td>147.4</td><td>130</td><td>5.0</td><td>0.659</td><td>2933</td><td>3024</td></tr><tr><td>2</td><td>1.45</td><td>148.0</td><td>123</td><td>5.0</td><td>0.665</td><td>2915</td><td>3016</td></tr><tr><td>3</td><td>1.45</td><td>148.4</td><td>130</td><td>5.1</td><td>0.669</td><td>2889</td><td>2995</td></tr><tr><td>4</td><td>1.45</td><td>147.9</td><td>118</td><td>5.0</td><td>0.635</td><td>2914</td><td>2967</td></tr><tr><td>5</td><td>1.45</td><td>148.5</td><td>131</td><td>5.1</td><td>0.673</td><td>2901</td><td>3012</td></tr><tr><td>Mean</td><td>1.45</td><td>148.0</td><td>126</td><td>5.1</td><td>0.660</td><td>2910</td><td>3003</td></tr></tbody></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)								Measured	Adjusted	1	1.44	147.4	130	5.0	0.659	2933	3024	2	1.45	148.0	123	5.0	0.665	2915	3016	3	1.45	148.4	130	5.1	0.669	2889	2995	4	1.45	147.9	118	5.0	0.635	2914	2967	5	1.45	148.5	131	5.1	0.673	2901	3012	Mean	1.45	148.0	126	5.1	0.660	2910	3003	MDC 3003 HUMBOLDT 0.300
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																													
						Measured	Adjusted																																																												
1	1.44	147.4	130	5.0	0.659	2933	3024																																																												
2	1.45	148.0	123	5.0	0.665	2915	3016																																																												
3	1.45	148.4	130	5.1	0.669	2889	2995																																																												
4	1.45	147.9	118	5.0	0.635	2914	2967																																																												
5	1.45	148.5	131	5.1	0.673	2901	3012																																																												
Mean	1.45	148.0	126	5.1	0.660	2910	3003																																																												

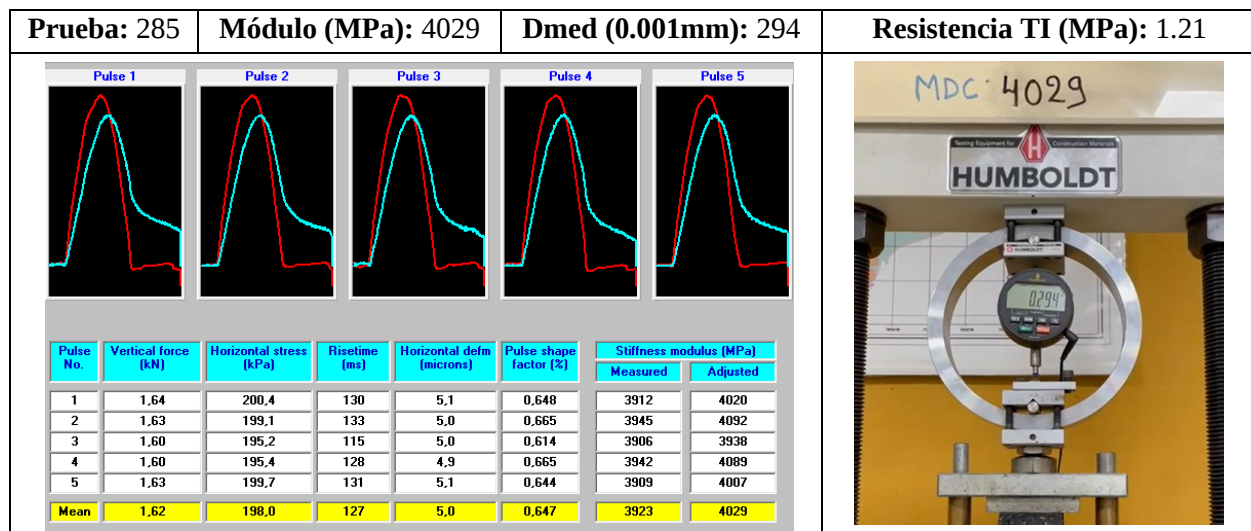
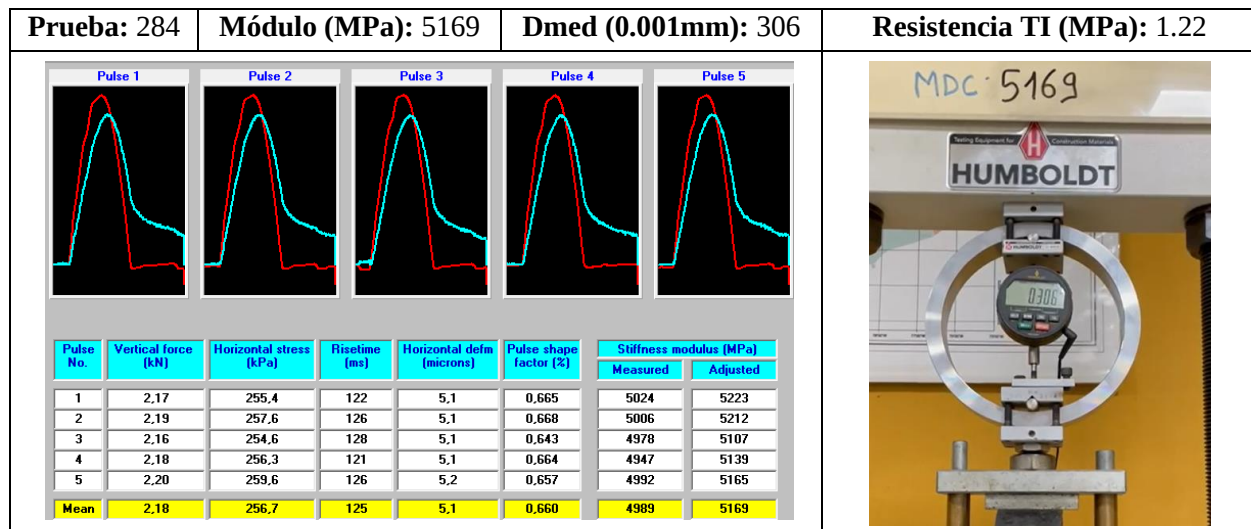
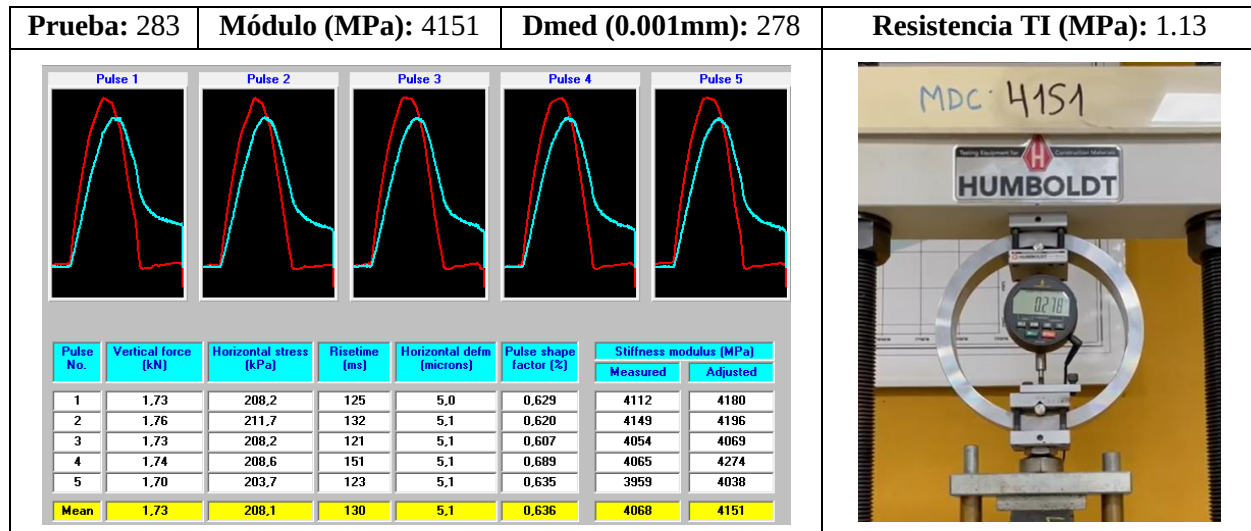
Prueba: 270	Módulo (MPa): 3158	Dmed (0.001mm): 320	Resistencia TI (MPa): 1.12																																																																
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5 <table><thead><tr><th>Pulse No.</th><th>Vertical force (kN)</th><th>Horizontal stress (kPa)</th><th>Risetime (ms)</th><th>Horizontal defm (microns)</th><th>Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>1.50</td><td>155.9</td><td>131</td><td>5.1</td><td>0.661</td><td>3056</td><td>3156</td></tr><tr><td>2</td><td>1.48</td><td>154.3</td><td>122</td><td>5.0</td><td>0.634</td><td>3080</td><td>3136</td></tr><tr><td>3</td><td>1.47</td><td>152.7</td><td>124</td><td>4.9</td><td>0.649</td><td>3077</td><td>3158</td></tr><tr><td>4</td><td>1.49</td><td>155.1</td><td>124</td><td>5.0</td><td>0.640</td><td>3074</td><td>3141</td></tr><tr><td>5</td><td>1.47</td><td>152.9</td><td>131</td><td>4.9</td><td>0.675</td><td>3074</td><td>3199</td></tr><tr><td>Mean</td><td>1.48</td><td>154.2</td><td>126</td><td>5.0</td><td>0.652</td><td>3072</td><td>3158</td></tr></tbody></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)								Measured	Adjusted	1	1.50	155.9	131	5.1	0.661	3056	3156	2	1.48	154.3	122	5.0	0.634	3080	3136	3	1.47	152.7	124	4.9	0.649	3077	3158	4	1.49	155.1	124	5.0	0.640	3074	3141	5	1.47	152.9	131	4.9	0.675	3074	3199	Mean	1.48	154.2	126	5.0	0.652	3072	3158	MDC 3158 HUMBOLDT 0.320
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																													
						Measured	Adjusted																																																												
1	1.50	155.9	131	5.1	0.661	3056	3156																																																												
2	1.48	154.3	122	5.0	0.634	3080	3136																																																												
3	1.47	152.7	124	4.9	0.649	3077	3158																																																												
4	1.49	155.1	124	5.0	0.640	3074	3141																																																												
5	1.47	152.9	131	4.9	0.675	3074	3199																																																												
Mean	1.48	154.2	126	5.0	0.652	3072	3158																																																												







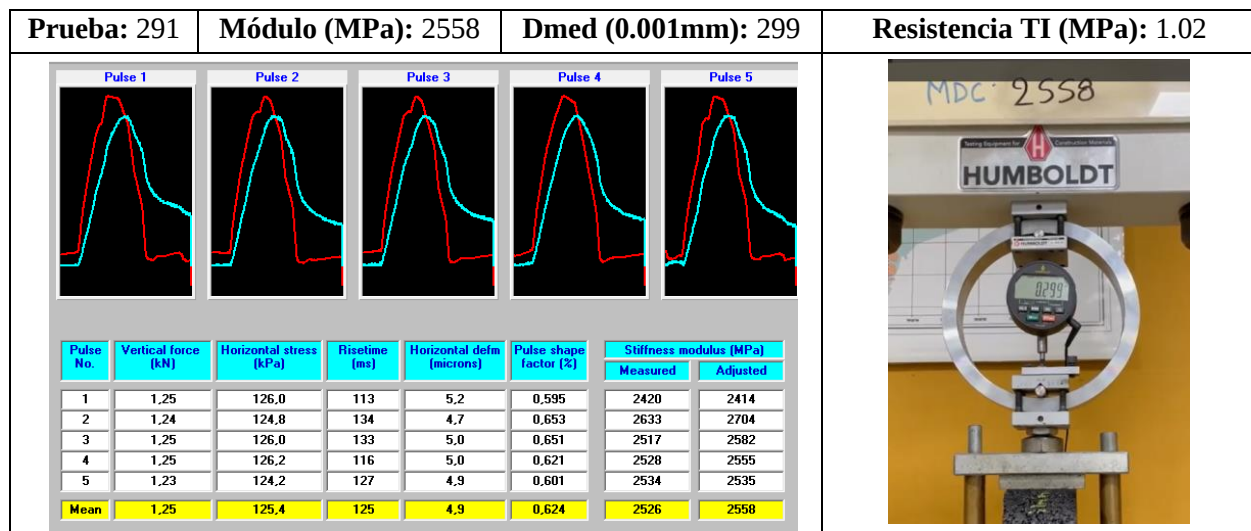
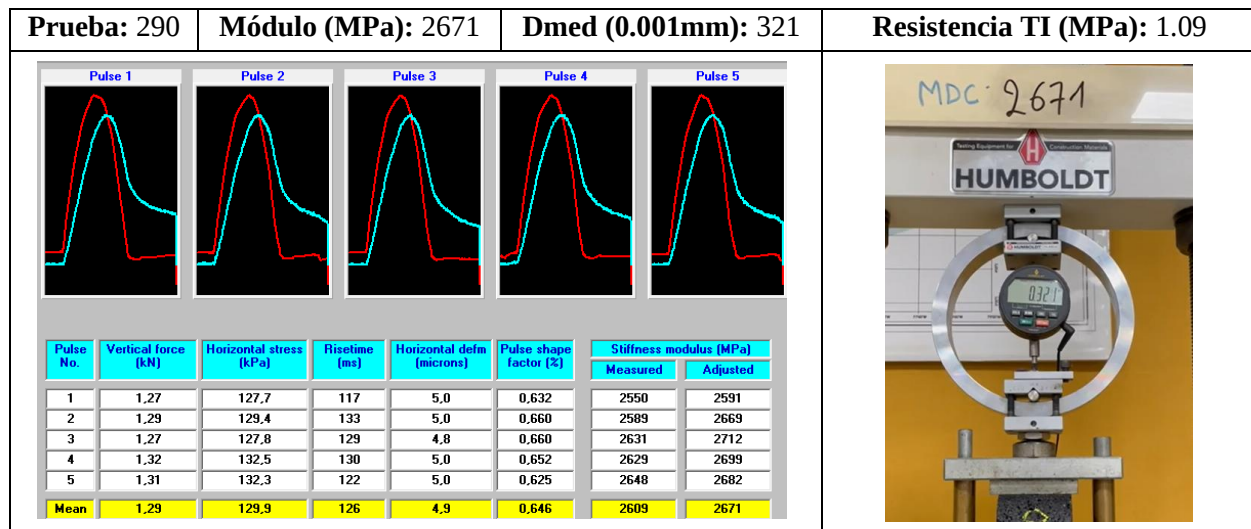
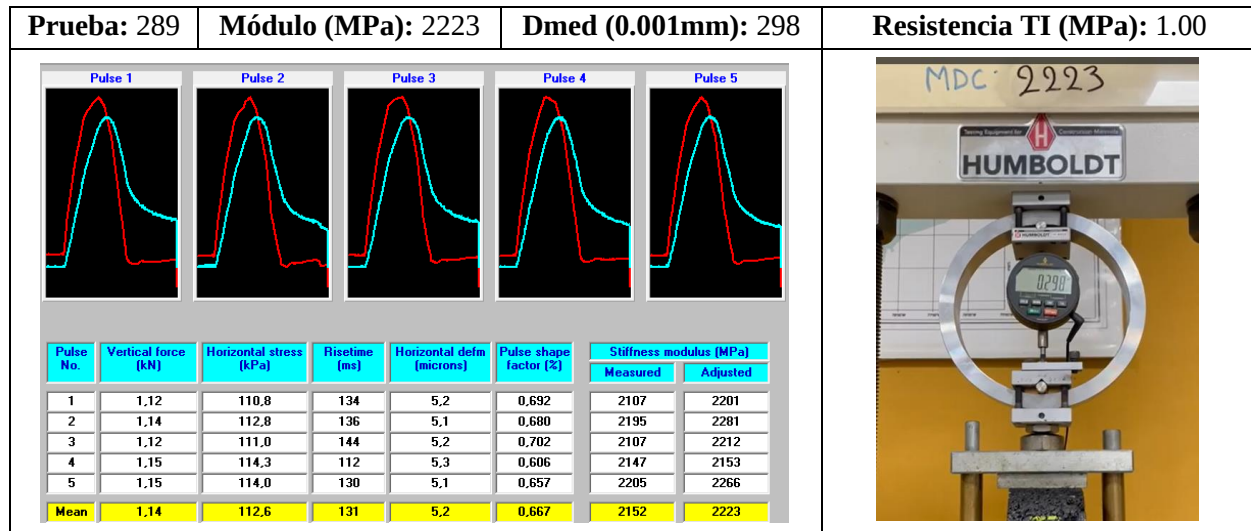




Prueba: 286	Módulo (MPa): 3545	Dmed (0.001mm): 289	Resistencia TI (MPa): 1.17																																																																
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5 <table><thead><tr><th>Pulse No.</th><th>Vertical force (kN)</th><th>Horizontal stress (kPa)</th><th>Risetime (ms)</th><th>Horizontal delm (microns)</th><th>Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>1.42</td><td>170,1</td><td>107</td><td>5,0</td><td>0.633</td><td>3391</td><td>3453</td></tr><tr><td>2</td><td>1.41</td><td>169,0</td><td>133</td><td>4,9</td><td>0.699</td><td>3447</td><td>3636</td></tr><tr><td>3</td><td>1.46</td><td>174,8</td><td>119</td><td>5,0</td><td>0.644</td><td>3441</td><td>3524</td></tr><tr><td>4</td><td>1.42</td><td>170,9</td><td>124</td><td>5,0</td><td>0.683</td><td>3423</td><td>3579</td></tr><tr><td>5</td><td>1.42</td><td>171,0</td><td>131</td><td>5,0</td><td>0.682</td><td>3382</td><td>3533</td></tr><tr><td>Mean</td><td>1.43</td><td>171,1</td><td>123</td><td>5,0</td><td>0.668</td><td>3417</td><td>3545</td></tr></tbody></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal delm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)								Measured	Adjusted	1	1.42	170,1	107	5,0	0.633	3391	3453	2	1.41	169,0	133	4,9	0.699	3447	3636	3	1.46	174,8	119	5,0	0.644	3441	3524	4	1.42	170,9	124	5,0	0.683	3423	3579	5	1.42	171,0	131	5,0	0.682	3382	3533	Mean	1.43	171,1	123	5,0	0.668	3417	3545	MDC 3545 HUMBOLDT 0.289
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal delm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																													
						Measured	Adjusted																																																												
1	1.42	170,1	107	5,0	0.633	3391	3453																																																												
2	1.41	169,0	133	4,9	0.699	3447	3636																																																												
3	1.46	174,8	119	5,0	0.644	3441	3524																																																												
4	1.42	170,9	124	5,0	0.683	3423	3579																																																												
5	1.42	171,0	131	5,0	0.682	3382	3533																																																												
Mean	1.43	171,1	123	5,0	0.668	3417	3545																																																												

Prueba: 287	Módulo (MPa): 2038	Dmed (0.001mm): 262	Resistencia TI (MPa): 0.88																																																																
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5 <table><thead><tr><th>Pulse No.</th><th>Vertical force (kN)</th><th>Horizontal stress (kPa)</th><th>Risetime (ms)</th><th>Horizontal defm (microns)</th><th>Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>1.01</td><td>100.0</td><td>122</td><td>5.2</td><td>0.657</td><td>1905</td><td>1956</td></tr><tr><td>2</td><td>0.99</td><td>98.1</td><td>115</td><td>4.8</td><td>0.654</td><td>2026</td><td>2078</td></tr><tr><td>3</td><td>1.02</td><td>100.9</td><td>129</td><td>5.1</td><td>0.680</td><td>1984</td><td>2059</td></tr><tr><td>4</td><td>0.99</td><td>98.2</td><td>112</td><td>5.0</td><td>0.645</td><td>1960</td><td>2001</td></tr><tr><td>5</td><td>1.00</td><td>99.1</td><td>122</td><td>4.9</td><td>0.670</td><td>2025</td><td>2093</td></tr><tr><td>Mean</td><td>1.00</td><td>99.3</td><td>120</td><td>5.0</td><td>0.661</td><td>1980</td><td>2038</td></tr></tbody></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)								Measured	Adjusted	1	1.01	100.0	122	5.2	0.657	1905	1956	2	0.99	98.1	115	4.8	0.654	2026	2078	3	1.02	100.9	129	5.1	0.680	1984	2059	4	0.99	98.2	112	5.0	0.645	1960	2001	5	1.00	99.1	122	4.9	0.670	2025	2093	Mean	1.00	99.3	120	5.0	0.661	1980	2038	MDC 2038 HUMBOLDT 0.262
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																													
						Measured	Adjusted																																																												
1	1.01	100.0	122	5.2	0.657	1905	1956																																																												
2	0.99	98.1	115	4.8	0.654	2026	2078																																																												
3	1.02	100.9	129	5.1	0.680	1984	2059																																																												
4	0.99	98.2	112	5.0	0.645	1960	2001																																																												
5	1.00	99.1	122	4.9	0.670	2025	2093																																																												
Mean	1.00	99.3	120	5.0	0.661	1980	2038																																																												

Prueba: 288	Módulo (MPa): 2548	Dmed (0.001mm): 299	Resistencia TI (MPa): 0.97																																																																
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5 <table><thead><tr><th>Pulse No.</th><th>Vertical force (kN)</th><th>Horizontal stress (kPa)</th><th>Risetime (ms)</th><th>Horizontal defm (microns)</th><th>Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>1.29</td><td>123,7</td><td>114</td><td>5,0</td><td>0,619</td><td>2437</td><td>2460</td></tr><tr><td>2</td><td>1.27</td><td>122,2</td><td>110</td><td>4,9</td><td>0,611</td><td>2488</td><td>2502</td></tr><tr><td>3</td><td>1.26</td><td>121,0</td><td>135</td><td>4,8</td><td>0,683</td><td>2497</td><td>2603</td></tr><tr><td>4</td><td>1.26</td><td>121,2</td><td>114</td><td>4,8</td><td>0,642</td><td>2517</td><td>2571</td></tr><tr><td>5</td><td>1.28</td><td>122,9</td><td>133</td><td>4,8</td><td>0,641</td><td>2552</td><td>2606</td></tr><tr><td>Mean</td><td>1,27</td><td>122,2</td><td>121</td><td>4,9</td><td>0,639</td><td>2498</td><td>2548</td></tr></tbody></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)								Measured	Adjusted	1	1.29	123,7	114	5,0	0,619	2437	2460	2	1.27	122,2	110	4,9	0,611	2488	2502	3	1.26	121,0	135	4,8	0,683	2497	2603	4	1.26	121,2	114	4,8	0,642	2517	2571	5	1.28	122,9	133	4,8	0,641	2552	2606	Mean	1,27	122,2	121	4,9	0,639	2498	2548	MDC 2548 HUMBOLDT 0.299
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																													
						Measured	Adjusted																																																												
1	1.29	123,7	114	5,0	0,619	2437	2460																																																												
2	1.27	122,2	110	4,9	0,611	2488	2502																																																												
3	1.26	121,0	135	4,8	0,683	2497	2603																																																												
4	1.26	121,2	114	4,8	0,642	2517	2571																																																												
5	1.28	122,9	133	4,8	0,641	2552	2606																																																												
Mean	1,27	122,2	121	4,9	0,639	2498	2548																																																												



Prueba: 292	Módulo (MPa): 2617	Dmed (0.001mm): 308	Resistencia TI (MPa): 1.05																																																										
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5 <table><thead><tr><th rowspan="2">Pulse No.</th><th rowspan="2">Vertical force (kN)</th><th rowspan="2">Horizontal stress (kPa)</th><th rowspan="2">Risetime (ms)</th><th rowspan="2">Horizontal defm (microns)</th><th rowspan="2">Pulse shape factor (%)</th><th colspan="2">Stiffness modulus (MPa)</th></tr><tr><th>Measured</th><th>Adjusted</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>1,25</td><td>125,9</td><td>135</td><td>5,1</td><td>0,685</td><td>2446</td><td>2550</td></tr><tr><td>2</td><td>1,26</td><td>126,6</td><td>143</td><td>5,0</td><td>0,684</td><td>2516</td><td>2624</td></tr><tr><td>3</td><td>1,25</td><td>126,1</td><td>138</td><td>4,9</td><td>0,688</td><td>2550</td><td>2664</td></tr><tr><td>4</td><td>1,29</td><td>129,7</td><td>119</td><td>5,0</td><td>0,610</td><td>2569</td><td>2582</td></tr><tr><td>5</td><td>1,25</td><td>126,1</td><td>137</td><td>4,9</td><td>0,682</td><td>2557</td><td>2665</td></tr><tr><td>Mean</td><td>1,26</td><td>126,9</td><td>134</td><td>5,0</td><td>0,670</td><td>2528</td><td>2617</td></tr></tbody></table>			Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)		Measured	Adjusted	1	1,25	125,9	135	5,1	0,685	2446	2550	2	1,26	126,6	143	5,0	0,684	2516	2624	3	1,25	126,1	138	4,9	0,688	2550	2664	4	1,29	129,7	119	5,0	0,610	2569	2582	5	1,25	126,1	137	4,9	0,682	2557	2665	Mean	1,26	126,9	134	5,0	0,670	2528	2617	MDC 2617 HUMBOLDT 0.308
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)							Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)																																																	
			Measured	Adjusted																																																									
1	1,25	125,9	135	5,1	0,685	2446	2550																																																						
2	1,26	126,6	143	5,0	0,684	2516	2624																																																						
3	1,25	126,1	138	4,9	0,688	2550	2664																																																						
4	1,29	129,7	119	5,0	0,610	2569	2582																																																						
5	1,25	126,1	137	4,9	0,682	2557	2665																																																						
Mean	1,26	126,9	134	5,0	0,670	2528	2617																																																						

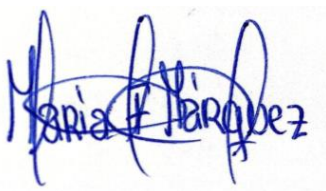
DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, María Fernanda Márquez Cueva, con C.C: 1105199887 autor(a) del trabajo de titulación: **Valoración de la prueba de tracción indirecta vinculada al módulo de rigidez para el control del agrietamiento en las mezclas asfálticas** previo a la obtención del grado de **MAGÍSTER EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de graduación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 17 de julio de 2026



f. _____
Nombre: María Fernanda Márquez Cueva
C.C: 1105199887

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE GRADUACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Valoración de la prueba de tracción indirecta vinculada al módulo de rigidez para el control del agrietamiento en las mezclas asfálticas		
AUTOR(ES) (apellidos/nombres):	Márquez Cueva María Fernanda		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES) (apellidos/nombres):	Ing. Alcívar Bastidas Stefany Esther Ing. Vila Romaní Rolando		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
UNIDAD/FACULTAD:	Sistema de Posgrado		
MAESTRÍA/ESPECIALIDAD:	Maestría en Ingeniería de la Construcción		
GRADO OBTENIDO:	Magíster en Ingeniería de la Construcción		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	17 de julio de 2026	No. DE PÁGINAS:	155
ÁREAS TEMÁTICAS:	Control del agrietamiento para capas de rodadura de hormigón asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta TI, vinculado a las exigencias para módulos de rigidez en Ecuador.		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Mezclas asfálticas, tracción indirecta, módulo de rigidez, agrietamiento, control de calidad.		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras): La presente investigación valora la prueba de tracción indirecta como herramienta para el control del agrietamiento en mezclas asfálticas, vinculándola directamente con el módulo de rigidez. El problema abordado radica en la necesidad de contar con ensayos más accesibles que permitan predecir el comportamiento mecánico y la tendencia al agrietamiento en el contexto vial ecuatoriano. El objetivo principal fue determinar y valorar la relación funcional existente entre la Resistencia a la Tracción Indirecta (RTI) y el Módulo de Rigidez (MRIG) a partir de un análisis estadístico robusto. La metodología empleó un enfoque experimental realizado en el Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, donde se analizaron 292 muestras provenientes de cinco plantas de producción distintas. Se aplicaron modelos de regresión y análisis de varianza mediante el software STATGRAPHICS® para validar la correlación entre ambas variables. Los resultados revelaron una relación lineal significativa, respaldada por un coeficiente de correlación de Pearson de 0,85 y un valor-P inferior a 0,05. Además, se establecieron parámetros de control para la RTI a 20°C: un rango satisfactorio (entre 1,05 y 1,20 MPa) y un rango tolerable (entre 0,95 y 1,30 MPa), vinculados a módulos de rigidez que garantizan un desempeño adecuado frente al agrietamiento. Se concluye que la RTI es un parámetro eficaz para el control de calidad rutinario, permitiendo identificar mezclas excesivamente rígidas y quebradizas, contribuyendo así a mejorar la durabilidad de las capas de rodadura en el país.			
ADJUNTO PDF:	☒ SI	☐ NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-0997213291	E-mail: mfm044@gmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN:	Nombre: Rommel Yela Acosta		
	Teléfono: +593 0995934871		
	E-mail: rommel.yela@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			