

TRABAJO DE GRADO: EQUIPOS PARA ENSAYOS DE “TILT TEST” Y
“CARGA PUNTUAL”

CESAR ESTIBEN GAONA GAMA
EDWIN FERNANDO RODRIGUEZ QUINTERO



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TUNJA

2019

TRABAJO DE GRADO: EQUIPOS PARA ENSAYOS DE “TILT TEST” Y
“CARGA PUNTUAL”

CESAR ESTIBEN GAONA GAMA
EDWIN FERNANDO RODRIGUEZ QUINTERO

Proyecto de grado en modalidad “Tesis” presentado como requisito para obtener
el título de Ingeniero Civil

Asesor Disciplinar
José Rodrigo Méndez Zuluaga
Ingeniero Civil, Especialista en Geotecnia

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2019

Nota de aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Tunja, 15 de Octubre de 2019

Dedicado a mis padres
José Belarmino Gaona Daza y María Alcira Gama Sosa,
quienes con su esfuerzo, apoyo, paciencia, amor y confianza
me han dado el impulso para salir adelante
y cumplir mis metas.
Cesar Estiben Gaona Gama

Para mis papás
Luis Fernando Rodríguez y Nurian Quintero Pulido
quienes son mi ejemplo a seguir
y participes de este sueño.
Edwin Fernando Rodríguez Quintero

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, al ingeniero José Rodrigo Méndez Zuluaga por transmitirnos su conocimiento y experiencia. A la empresa Roymen Ingeniería quién con sus aportes permitió la realización de este proyecto.

A la ingeniera Heidy Madeleine Arévalo Algarra por su orientación y dedicación en la parte constructiva de este escrito.

Al doctor Javier Eduardo Becerra por sus aportes y enseñanzas sobre temas necesarios para la investigación.

Al arquitecto Luis Alberto Rodríguez Quintero por su colaboración y orientación al proyecto.

A Jhon Fredy Hernández y José Guillermo Vargas, laboratoristas de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás seccional Tunja, quienes aportaron su experiencia en la obtención de muestras y ejecución de los ensayos.

A todas las personas que hicieron parte en algunas de las actividades ejecutadas y motivaron a continuar con este gran reto.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	15
ABSTRACT	16
INTRODUCCIÓN	17
1. PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN	19
1.1. Descripción del problema	19
1.2. Delimitación del problema	22
1.2.1. Espacial	22
1.2.2. Temporal	23
1.3. Planteamiento del problema	24
1.3.1. Pregunta general	24
1.3.2. Preguntas específicas	24
2. JUSTIFICACIÓN	25
3. OBJETIVOS	27
3.1. OBJETIVO GENERAL	27
3.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS	27
4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	28
4.1. ESTADO DEL ARTE	28
4.1.1. Diseño de equipo para el ensayo de tilt test	28
4.1.2. Ensayo de Tilt Test (prueba de inclinación)	30
4.1.3. Diseños de equipo para el ensayo de carga puntual	32
4.1.4. Ensayo de Carga Puntual.	34
4.2. ANTECEDENTES	37
4.2.1. Diseños de equipo y aplicación del ensayo de tilt test	37
4.2.2. Diseño de equipo y aplicación del ensayo de carga puntual	41
4.3. MARCO TEORICO	44
4.3.1. Ensayo de tilt test	44
4.3.1.1. Resistencia al corte de las discontinuidades sin relleno (τ):	45
4.3.1.2. Resistencia al corte de las discontinuidades meteorizadas y no meteorizadas (τ)	45

4.3.1.4. Ángulo de fricción residual (ϕ_r)	47
4.3.1.5. Ángulo de fricción básico en s	48
4.3.2. Ensayo de carga puntual	49
4.3.2.1. Índice de resistencia a carga puntual <i>IS50</i>	49
4.3.2.2. Correlaciones más conocidas para determinar el <i>IS50</i>	52
4.3.3. Diseño de equipos	53
4.3.3.1. Aspectos generales para el diseño del equipo de tilt test	53
4.3.3.2. Aspectos generales para el diseño del equipo de carga puntual	53
4.4. MARCO NORMATIVO	55
4.4.1. Norma ASTM D 5731 – 16 “Método de prueba estándar para la determinación del índice de resistencia de la carga puntual de la roca y la aplicación a las clasificaciones de la resistencia de la roca.	55
4.4.2. Método sugerido por ISRM para determinar el ángulo de fricción básico por medio de tilt test.	56
5. MATERIALES, EQUIPOS Y MÉTODOS	57
5.1. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN	57
5.2. METODOLOGÍA	57
5.3. MATERIALES	59
5.4. EQUIPOS	60
5.4.1. Dispositivos electrónicos	60
5.4.2. Equipos, herramientas y dispositivos usados en la construcción de los equipos.	60
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	69
6.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE EQUIPOS	69
6.1.1. Diseño y construcción para equipo de tilt test	69
6.1.1.1. Diseño de equipo de tilt test	69
6.1.1.2. Construcción equipo de tilt test	73
6.1.1.3. Diseño de equipo de carga puntual	74
6.1.1.4. Construcción equipo de carga puntual	82
6.2. Ficha técnica, manual de operación de los equipos y guía para REALIZACIÓN DE los ensayos.	84
6.2.1. Ficha técnica equipo de tilt test	84

6.2.2.	Manual de operación equipo de tilt test	85
6.2.3.	Guía de ensayo de tilt test	86
6.2.4.	Ficha técnica equipo de carga puntual	86
6.2.5.	Manual de operación equipo de carga puntual	87
6.2.6.	Guía de ensayo de carga puntual	88
6.3.	VERIFICACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS	88
6.3.1.	Obtención de muestras	88
6.3.2.	Ensayos de tilt test	91
6.3.2.1.	Ensayo en núcleos de roca	91
6.3.3.	Ensayo de carga puntual	95
	CONCLUSIONES	98
	RECOMENDACIONES	100
	GLOSARIO	102
	BIBLIOGRAFIA	103
	ANEXOS	107

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág
Gráfica 1. Diagrama de cortante para el eje	70
Gráfica 2. Diagrama de momento para el eje	70
Gráfica 3. Diagrama de cortante viga superior del marco de carga.	75
Gráfica 4. Diagrama de momentos viga superior marco de carga.	76
Gráfica 5. Diagrama de cortante viga inferior del marco de carga.	78
Gráfica 6. Diagrama de momentos viga inferior marco de carga.	79

LISTA DE ECUACIONES

	Pág
Ecuación 1. Resistencia al corte en discontinuidades.	45
Ecuación 2. Resistencia al corte de la discontinuidad meteorizada.	45
Ecuación 3. Coeficiente de rugosidad de la junta (JRC)	46
Ecuación 4. Ángulo de fricción residual.	47
Ecuación 5. Ángulo de fricción básico en superficies de roca (contacto superficial)	47
Ecuación 6. Ángulo de fricción básico núcleos de roca (contacto lineal)	48
Ecuación 7. Índice de resistencia a carga puntual corregido.	49
Ecuación 8. Factor de corrección por tamaño.	49
Ecuación 9. Factor de corrección para especímenes estándar con diámetro igual a 50 mm.	50
Ecuación 10. Índice de resistencia a carga puntual no corregido.	50
Ecuación 11. Diámetro equivalente para ensayo diametral	50
Ecuación 12. Diámetro equivalente para ensayo axial, en bloque o en forma irregular.	50
Ecuación 13. Área de la sección transversal mínima	51
Ecuación 14. Correlación entre el I_{S50} y σ_{ci} Deer & Miller 1972.	52
Ecuación 15. Correlación entre el I_{S50} y σ_{ci} ISRM 1972.	52
Ecuación 16. Ecuaciones de equilibrio	54
Ecuación 17. Esfuerzo normal.	54
Ecuación 18. Esfuerzo cortante promedio.	55

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Ángulos de fricción básicos de algunas rocas.	39
Tabla 2. Ángulos de fricción básico obtenidos a partir del ensayo de compresión triaxial.	40
Tabla 3. Resistencia a la compresión simple de algunas rocas.	43
Tabla 4. Rangos de resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa sana.	44
Tabla 5. Dimensiones de las probetas.	48
Tabla 6. Clasificación de material rocoso en base al Is50.	51
Tabla 7. Normas de materiales usados.	56
Tabla 8. Materiales usados en la construcción de los equipos	59
Tabla 9. Dispositivos importantes	60
Tabla 10. Equipos usados.	61
Tabla 11. Equipos usados para extracción y adecuación de muestras.	67
Tabla 12. Resultados para el diseño del eje.	70
Tabla 13. Resultados para diseño sistema hidráulico equipo de carga puntual.	74
Tabla 14. Resultados de diseño de la viga superior.	76
Tabla 15. Resultados de diseño de parantes.	77
Tabla 16. Resultados de diseño de viga inferior.	79
Tabla 17. Resultados de diseño de tensores.	80
Tabla 18. Ficha técnica del equipo de tilt test.	85
Tabla 19. Ficha técnica para el equipo de carga puntual.	87
Tabla 20. Número de identificación roca, tipos de roca y muestras para ensayos.	88
Tabla 21. Procesos de extracción y adecuación de núcleos, bloques y fragmentos irregulares de roca.	89
Tabla 22. Ejecución de ensayos de tilt test en núcleos de roca (Roca 1-7).	92
Tabla 23. Resultados obtenidos para diferentes tipos de roca en el ensayo de tilt test.	93
Tabla 24. Resultados obtenidos para diferentes tipos de roca en el ensayo de carga puntual.	96

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Mesa de inclinación manual.	29
Figura 2. Mesa de inclinación motorizada.	29
Figura 3. Mesa de inclinación electrónico	29
Figura 4. Mesa basculante manual metálica.	29
Figura 5. Dimensiones de los testigos para prueba de tilt test.	31
Figura 6. Tipos de pruebas para ensayo de tilt test.	32
Figura 7. a) Equipo de carga puntual analógico, b) equipo de carga puntual digital.	33
Figura 8. Equipo para ensayo de carga puntual Marca ControlsGroup.	34
Figura 9. Máquina digital para ensayo de carga puntual.	34
Figura 10. Roturas en testigos válidas y nulas.	35
Figura 11. Formas regulares e irregulares para el ensayo de carga puntual.	36
Figura 12. Perfiles tipo para determinar el JRC (Barton y Choubey 1977).	46
Figura 13. Diagrama de cuerpo libre para eje del equipo de tilt test.	69
Figura 14. Dimensiones generales equipo Tilt Test en vista 3D.	72
Figura 15. Vista frontal equipo de Tilt Test.	72
Figura 16. Vista posterior equipo Tilt test.	72
Figura 17. Vista lateral derecha equipo carga puntual.	73
Figura 18. Vista lateral izquierda equipo carga puntual.	73
Figura 19. Diagrama de cuerpo libre de viga superior.	75
Figura 20. Parantes marco de carga.	77
Figura 21. Diagrama de cuerpo libre para viga inferior.	78
Figura 22. Diagrama de cuerpo libre de los sensores.	80
Figura 23. Dimensiones generales equipo carga puntual en vista 3D.	81
Figura 24. Vista modelo 3D equipo de carga puntual.	81
Figura 25. Vista frontal equipo carga puntual.	81
Figura 26. Vista lateral derecha equipo carga puntual.	82
Figura 27. Vista lateral izquierda equipo carga puntual.	82

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág
Fotografía 1. Laboratorio de geotecnia Universidad Santo Tomás seccional Tunja	22
Fotografía 2. Taller metalmecánico empresa ROYMEN INGENIERIA.	23
Fotografía 3. Equipo de tilt test.	73
Fotografía 4. Equipo de carga puntual.	82

LISTA DE ANEXOS

	Pág
Anexo 1. Diseño y construcción equipo de tilt test	107
Anexo 2. Diseño y construcción equipo de carga puntual	107
Anexo 3. Presupuesto y materiales de los equipos de tilt test y carga puntual	107
Anexo 4. Manual de operación y guía de ensayo tilt test.	107
Anexo 5. Manual de operación y guía de carga puntual	107
Anexo 6. Ensayos de tilt test	107
Anexo 7. Ensayos de carga puntual	107

RESUMEN

En los estudios concernientes a la rama de la mecánica de rocas, se requiere de equipos especializados que permitan la ejecución de ensayos y pruebas en campo. Dos de estos ensayos son el de carga puntual y tilt test, los cuales permiten determinar de manera rápida datos para estimar el índice de resistencia a carga puntual de la matriz rocosa y el ángulo de fricción básico de la roca. Por tanto, se implementó el diseño y construcción de los equipos de tilt test y carga puntual, para realizar investigaciones en campo o en laboratorio, con respecto a parámetros de resistencia que influyen en el comportamiento mecánico los macizos rocosos. En primer lugar, se recolectó información sobre los ensayos y equipos para su desarrollo, se elaboraron los diseños de los equipos de tilt test y carga puntual y posteriormente se dió la construcción. Para cada uno de ellos se elaboró un manual, ficha técnica y la guía de ensayo. Finalmente se verificó el funcionamiento de los equipos por medio de la ejecución de los ensayos correspondientes, se logró observar que varias de las muestras analizadas se encuentran dentro de rangos establecidos por otras investigaciones. Al diseñar los equipos los factores de seguridad fueron óptimos, estos logran establecerse bajo aspectos técnicos, económicos y de calidad, lo que permite concluir que son confiables para ser usados en estudios e investigaciones.

Palabras Clave: Mecánica de rocas, índice de resistencia a carga puntual, ángulo básico, macizo rocoso.

ABSTRACT

In studies concerning the branch of rock mechanics, specialized equipment is required that allows the execution of field trials and tests. Two of these tests are the one of punctual load and tilt test, which allow to quickly determining data to estimate the index of resistance to punctual load of the rock matrix and the basic friction angle of the rock. Therefore, the design and construction of tilt test and point loading equipment was implemented, to carry out field or laboratory research, with respect to resistance parameters that influence the rocky massif's mechanical behavior. First, information was collected on the tests and equipment for its development, the designs of the tilt test and point loading equipment were developed, and then the construction was given. For each one of them, a manual, technical sheet, and the test guide were elaborated. Finally, the operation of the equipment was verified through the execution of the corresponding tests, it was observed that several of the analyzed samples are within the ranges established by other investigations. When designing the equipment, the safety factors were optimal; these are established under technical, economic and quality aspects, which allows concluding that they are reliable for use in studies and research.

Keywords: Rock mechanics, point load resistance index, Basic angle, rock mass.

INTRODUCCIÓN

Las ingenierías, así como otras disciplinas, generalmente tienen como objetivo mitigar problemas y/o necesidades. Por medio, de la implementación y aplicación de ciencias teóricas y prácticas que permiten formular planes de solución y satisfacción. En consecuencia, algunos de estos planes, concluyen en la creación de un producto que puede llegar a ser un equipo, máquina, estructura, entre otros. En el caso de que se demande uno de los mencionados específicamente, se ven implicados procesos de diseño, fabricación, ensamble y demás según su finalidad. Las especificaciones de cada proceso como del producto, básicamente se apoyan en las características, dimensionamiento y a su vez en condiciones, limitaciones y recursos¹.

En la ingeniería civil y otras ciencias, donde se involucra la rama de la geotecnia, se da el estudio del comportamiento mecánico de las rocas y macizos rocosos². Para esto se requiere de ensayos de campo entre los que se encuentra: el ensayo de tilt test (prueba de inclinación), que permite determinar el ángulo de fricción básico, parámetro necesario para la evaluar la resistencia al corte en discontinuidades. El ensayo de carga puntual permite determinar el índice de resistencia a carga puntual, el cual se correlaciona y como resultado se obtiene la resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa³. Para la ejecución de estos ensayos, se debe disponer de equipos adecuados, que deben cumplir con requerimientos y especificaciones técnicas estipuladas en sus normas correspondientes⁴.

¹ Cfr. BUDYNAS, Richard y NISBETT, J. Keit. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Octava Edición. México: McGraw Hill, 2011.

² Cfr. RAMÍREZ, Pedro y ALEJANO, Leandro. *Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes*, 2004, 3. Disponible en: <http://oa.upm.es/14183/>

³ Cfr. GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis et al. *Ingeniería Geológica*. (Madrid: Pearson Educación, 2002).

⁴ Cfr. BUDYNAS y NISBETT. Opc. cit., pág 4-12.

La presente investigación se direccionó al diseño y construcción de los equipos para realizar los ensayos de tilt test y carga puntual, considerando en primer lugar las necesidades prácticas de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás seccional Tunja (USTA Tunja), en la que se identifica que no se cuenta con los equipos para realizar los ensayos de tilt test y carga puntual. En segundo lugar, las necesidades académicas y profesionales referentes al fortalecimiento del conocimiento y aplicación de los ensayos en proyectos de ingeniería civil. Por otra parte, debido a la ausencia de producción de equipos y/o tecnología a nivel local, lo cual genera restricciones de acceso, disponibilidad y distribución. Todo esto con la finalidad de aportar al desarrollo de estudios relacionados con la mecánica de rocas e impulsar la producción de equipos para esta y otras disciplinas afines.

La metodología se enfocó, en determinar una medida de solución para las necesidades identificadas. A través, de la implementación de técnicas o métodos de investigación como el descriptivo y explicativo. Se inició por la recolección de información de los ensayos de tilt test y carga puntual, así como de los equipos usados, con el fin de ampliar el conocimiento y establecer una solución a la problemática. Fundamentado en lo anterior, se optó por definir el diseño para cada equipo, aplicando conceptos de la mecánica de materiales, normas, códigos de diseño y seguridad según los requerimientos de cada uno de los ensayos. Se tomaron en cuenta consideraciones de diseño técnicas, económicas y de calidad.

Posteriormente, se ejecutaron las actividades para la construcción de los equipos y simultáneamente se obtuvieron muestras de distintos tipos de roca, para ser analizadas al finalizar la construcción de cada equipo, con el fin de garantizar la funcionalidad de cada uno. Esta investigación se estructura en primer lugar con la problemática a tratar, seguido de la justificación y sus objetivos, luego con la ampliación de una revisión bibliográfica en los aspectos teóricos y normativos de los ensayos, así como también de los equipos. Por último, se presentan los resultados obtenidos para la investigación seguido de conclusiones y recomendaciones.

1. PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La mecánica de rocas, es una rama de la geotecnia, fundamental para obras subterráneas y de superficie, ligadas no solo a la ingeniería civil sino también a la ingeniería de minas, geológica y de petróleos⁵. Requiere del uso de equipos especializados para la ejecución de ensayos de laboratorio o campo⁶, a través de los cuales, se determinan propiedades mecánicas y físicas para el estudio del comportamiento del macizo rocoso mediante su descripción, clasificación y caracterización⁷. En términos generales, a nivel internacional se cuenta con normatividad o métodos estandarizados por diferentes organizaciones como la ISRM y la ASTM, entre otras. De igual manera, con la tecnología y equipos para la ejecución de ensayos con su correspondiente información técnica.

El acceso a los equipos e información es limitado, en cuanto a aspectos de tipo técnico, económico y de disposición⁸. Debido a la probabilidad de que sus demandantes presenten inconvenientes de adquisición por diferentes razones. Una de ellas es no contar con fabricantes locales, por ende, es preciso efectuar una importación directa o a través de intermediarios. Otras pueden ser: que el poder adquisitivo no sea suficiente, que las especificaciones de los equipos para los ensayos no se ajusten a las requeridas, no tener acceso libre a información normativa, que contenga especificaciones de los ensayos y de los equipos. En definitiva, la diversidad de razones que limitan el acceso a los recursos se revelan en función de las condiciones de los demandantes y del territorio o región.

⁵ Cfr. SUÁREZ, Ludger, *Descripción del macizo rocoso. Introducción a la ingeniería de rocas de superficie y subterránea*. (Universidad Nacional de Colombia, 2015). Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/330834433_Descripcion_del_macizo_rocoso_introduccion_a_la_ingenieria_de_rocas_de_superficie_y_subterranea

⁶ UTEST, «Roca equipo de prueba.», *UTEST Equipo para ensayos en materiales* <<http://www.utest.com.tr/es/26084/ROCA>> [accedido 27 septiembre 2019].

⁷ Cfr. GONZÁLEZ DE VALLEJO et al. Opc. cit., pág. 117-230

⁸ Cfr. SUÁREZ, Ludger. Opc., cit. pág 1-26

A pesar de que en América desde la década de los cincuenta, se empezó a discutir sobre la mecánica de rocas y también a aplicarla como disciplina para diferentes tipos de proyectos u obras civiles y de minería⁹, en la actualidad aún se presentan déficits en países como Ecuador, Paraguay, Uruguay, inclusive México y algunos de Centroamérica, en cuanto a los avances de la mecánica de rocas. De igual modo, en lo relacionado al impulso y desarrollo de la producción de equipos de campo y laboratorio utilizados para el estudio de macizos rocosos. Acorde con lo anterior, se evidencia grosso modo que dichos países no presentan avances en cuanto a este campo de la geotecnia. No obstante, es importante aclarar que estos como los demás países de Suramérica en su mayoría adquieren equipos de tecnología extranjera para la ejecución de ensayos¹⁰.

En Colombia se tienen, ejecutan y proyectan distintos tipos de obras (de transporte, de minería, estructurales, entre otros) en las que es necesaria la aplicación de la mecánica de rocas. Pero, se evidencian falencias que de manera directa o indirecta perjudican el desarrollo y aplicación de esta rama de la geotecnia en el país. En primer lugar, se parte de la necesidad de promover conocimiento, emplear formación avanzada y además impulsar la investigación¹¹. Para lo cual, el sector de la educación superior debe ampliar su cobertura y al mismo tiempo promover la construcción y/o adecuación de espacios teóricos y prácticos, actualizar y adquirir equipos de laboratorio¹².

En segundo lugar, se tiene la falta de fabricantes de equipos de mecánica de rocas, lo que induce a adquirir equipos del exterior distribuidos por empresas que tienen sucursales de venta o simplemente sirven de intermediarios con el productor.

⁹ Cfr. RAMÍREZ y ALEJANO. Opc., cit. pág 11

¹⁰ Cfr. SUÁREZ, Ludger. Opc., cit., pág 22

¹¹ Cfr. MISAS, Gabriel. *La Educación Superior En Colombia. Análisis y Estrategias Para Su Desarrollo.*, Facultad de Ciencias Humanas Universidad Nacional de Colombia, 2004. Recuperado de: http://www.colombiaaprende.edu.co/html/investigadores/1609/articles-73081_archivo.pdf

¹² Cfr. SUE, Sistema Universitario Estatal. Desfinanciamiento de La Educación Superior En Colombia. La Realidad de La Crisis En El Sistema de Financiación de Las Universidades Estatales. *Sistema Universitario Estatal*, 2012, 287–330. Disponible en: <https://doi.org/10.1787/9789264180710-12-es>.

Finalmente es preciso indicar, que las empresas y los intermediarios que ofrecen los equipos, solo se encuentran en ciudades principales como Bogotá, Medellín y Cali. Por otra parte, los costos de los equipos que ofrecen son muy elevados y además las especificaciones técnicas en determinados casos no se ajustan a las solicitadas por el cliente.

En los laboratorios de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás seccional Tunja, se encuentran equipos óptimos para elaborar ensayos de las áreas de materiales, geotecnia, pavimentos, estructuras e hidráulica, también equipos para estudios de topografía y fotogrametría. Pero en lo que se refiere a los equipos de mecánica de rocas del área de geotecnia, se evidencia que no posee el equipo para realizar el ensayo de tilt test, mediante el cual se establece el ángulo de fricción básico, parámetro esencial para estimar la resistencia al corte en discontinuidades¹³. Igualmente no se tiene el equipo para realizar el ensayo de carga puntual, con el que se obtiene un índice de resistencia, correlacionable para determinar la resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa¹⁴.

Las situaciones expuestas desde lo global hasta lo local, en el contenido de la descripción del problema, han motivado al planteamiento de este proyecto de investigación. Así pues, éste se enfocó al diseño y construcción de los equipos portátiles para ensayos de tilt test y carga puntual faltantes en los laboratorios de la facultad de ingeniería civil de la USTA Tunja y necesarios en empresas dedicadas a ejecutar labores de geotecnia. Esto permitirá concebir avances no solo de nivel académico sino también profesional en materia de la mecánica de rocas y sus aplicaciones a distintos tipos de obras que se proyecten en la región o en el país. Por otra parte, se logra una transformación referente a conocimiento, capacidades

¹³ Cfr. ALEJANO, Leandro ... Ignacio PÉREZ, «ISRM Suggested method for determining the basic friction angle of planar rock surfaces by means of Tilt Tests», *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51.12 (2018), 3853-59 <<https://doi.org/10.1007/s00603-018-1627-6>>.

¹⁴ Cfr. SUÁREZ, Ludger. Opc., cit., pág 362-364

y técnicas, comprobando que no siempre es necesaria la adquisición de equipos provenientes del exterior.

1.2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Espacial

El proyecto de investigación se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Santo Tomás seccional Tunja sede campus (Av. Universitaria calle 48 No. 1-235 este), específicamente en el laboratorio de geotecnia (fotografía 1), además en espacios de consulta y préstamo de material bibliográfico, así como también de acceso a equipos informáticos. La adquisición de materiales, accesorios y dispositivos de medición tuvo lugar en establecimientos específicos en los que se distribuyen dichos productos. Todas las actividades relacionadas al proceso de construcción de los equipos se desarrollaron en el taller metalmecánico de la empresa ROYMEN INGENIERIA (Calle 62 No. 11 -26 Barrio Asis -Tunja) (fotografía 2).

Fotografía 1. Laboratorio de geotecnia Universidad Santo Tomás seccional Tunja



Fuente: Autores
Fecha: 25/02/2019

Fotografía 2. Taller metalmecánico empresa ROYMEN INGENIERIA.



Fuente: Autores
Fecha: 25/02/2019

1.2.2. Temporal

Se realiza el proyecto desde la aprobación por parte del comité de grado el día 19 de septiembre de 2018. A partir de esta fecha, se ejecutaron tareas de fortalecimiento de información bibliográfica, seguido del planteamiento, programación y realización de actividades correspondientes a diseño de equipos, adquisición de materiales, componentes y dispositivos de medición. Con respecto a la construcción de los equipos, en primer lugar, se construyó el equipo tilt test, en este se realizaron actividades de fabricación de elementos o piezas, ensambles de verificación, aplicación de pintura y ensamble final.

En segundo lugar, se construyó el equipo de carga puntual y las actividades corresponden a las mismas del primero. Simultáneamente a los procesos y actividades ya mencionados, se obtuvieron las muestras o especímenes de roca, conforme a las especificaciones y condicionantes de cada ensayo. Finalmente, se

realizaron los ensayos con las muestras previamente obtenidas con el objetivo de verificar el funcionamiento idóneo de cada uno de los equipos. Por otra parte, se continuaron desarrollando actividades respectivas para la presentación del proyecto de investigación, hasta la fecha de entrega del libro al director de trabajo de grado en septiembre de 2019 y posteriormente a la facultad de ingeniería civil en el mes de octubre de 2019.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1. Pregunta general

¿Cómo contribuir al desarrollo de la mecánica de rocas, en cuanto al fortalecimiento de conocimiento teórico y práctico, implementando el uso de recursos disponibles a nivel local para la producción de los equipos de tilt test y carga puntual?

1.3.2. Preguntas específicas

- ¿En relación al planteamiento de diseño de los equipos de tilt test y carga puntual, cuáles son las consideraciones a aplicar, de manera que en el proceso de construcción no se presenten inconvenientes?
- ¿Cómo brindar información técnica y de operación de los equipos de tilt test y carga puntual, así como de especificaciones y procedimiento para realizar los correspondientes ensayos?
- ¿De qué manera se puede garantizar la funcionalidad de los equipos de tilt test y carga puntual?

2. JUSTIFICACIÓN

Debido a las restricciones para adquirir los equipos e información técnica, de manera directa o indirecta se afecta el desarrollo de la mecánica de rocas en diferentes regiones. Los aportes de Suramérica para el avance de la mecánica de rocas no han sido muy significativos en cuanto a estudios, investigaciones y desarrollo de tecnología. Para finales del 2008 según la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM), la participación de esta región fue tan solo del 2% la cual disminuyó gradualmente hasta el año 2015, la región europea aportó el 52%, seguido por Asia, Norteamérica, Asia Austral y África¹⁵.

En los proyectos u obras en los que se involucra la mecánica de rocas, la aplicación de ensayos de laboratorio o campo es importante, ya que estos comprometen actividades de estudio, análisis, diseño, construcción o intervención ¹⁶. La ejecución de los ensayos requiere de equipos especializados¹⁷, que contribuyen a la descripción, clasificación y caracterización del macizos rocosos, mediante la determinación de propiedades mecánicas y físicas¹⁸. Actualmente en Colombia no se cuenta con fabricantes de este tipo de equipos, por ende, sus demandantes deben adquirir equipos de procedencia extranjera, aun cuando aquí se pueden adecuar instalaciones para su producción debido a que se posee o se puede adquirir la instrumentación necesaria.

De acuerdo a la necesidad que se evidencia en el laboratorio de mecánica de rocas de la Facultad de Ingeniería Civil de la USTA Tunja, así como de las diferentes dificultades de acceso ya sean económicas, técnicas o de disponibilidad. Se decide diseñar y construir los equipos para realizar los ensayos de campo o laboratorio para el estudio de macizos rocosos, conocidos como: tilt test, este permite

¹⁵ Cfr. SUÁREZ, Ludger. Op., cit p. 25

¹⁶ Cfr. Universidad Central de Venezuela, «Microcurrículo asignatura Mecánica de Rocas. Universidad Central de Venezuela.», 2006, 1-5. Recuperado de: [http://saber.ucv.ve/bitstream/123456789/16211/12/MECANICA DE ROCAS.pdf](http://saber.ucv.ve/bitstream/123456789/16211/12/MECANICA%20DE%20ROCAS.pdf)

¹⁷ UTEST.

¹⁸ Cfr. GONZÁLEZ DE VALLEJO et al. Opc. cit., pág. 117-230

determinar el ángulo de fricción básico, parámetro para estimar el coeficiente de rugosidad de la junta (JRC)¹⁹, y a su vez la resistencia al corte en discontinuidades²⁰. A través del ensayo de carga puntual se logra obtener el índice de resistencia a carga puntual, el cual se puede correlacionar para obtener la propiedad mecánica de resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa²¹.

Con la elaboración de los equipos de tilt test y carga puntual, a nivel educativo se logra generar un impacto humano, ya que se benefician los estudiantes de la facultad de ingeniería civil de la USTA Tunja en cuanto al desarrollo del conocimiento teórico - práctico aplicable en su vida profesional. En referencia a lo anterior, se genera un impacto social, puesto que con la disponibilidad de profesionales capacitados y equipos se puede generar desarrollo en infraestructura. En cuanto a aspectos ambientales el equipo de tilt test no genera impactos negativos ya que no usa energía y su operación es manual, por su parte el equipo de carga puntual concibe impactos mínimos debido a que puede requerir de energía y lubricantes, pero en pequeñas proporciones en comparación con otros equipos o maquinaria, su operación también es manual.

En relación con la producción de los equipos de tilt test y carga puntual, localmente se genera un progreso en aspectos tecnológicos, logrando no solo el impulso de la producción de equipos utilizados para estudios de mecánica de rocas sino también de otras disciplinas. Por otra parte, cabe mencionar que la accesibilidad a los equipos es mucho más factible debido a que el costo en comparación con equipos de importación es menor. Además, los materiales utilizados para su fabricación son de excelente calidad y cumplen con especificaciones técnicas.

¹⁹ Cfr. GONZÁLEZ DE VALLEJO et al. Opc., cit., pág 186

²⁰ Cfr. ALEJANO et al. Opc., cit., pág 3853-3859

²¹ Cfr. SUÁREZ. Opc., cit., pág 361-364

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir los equipos de tilt test y carga puntual para realizar investigación en campo o laboratorio con respecto a parámetros de resistencia que influyen en los estudios de la mecánica de rocas.

3.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Establecer el diseño de los equipos de tilt test y carga puntual, en base a consideraciones relacionadas con aspectos técnicos, económicos y de calidad, los cuales precisen especificaciones óptimas para su construcción.
- Elaborar ficha técnica y manual de operación de los equipos, además de la guía para la realización de los ensayos.
- Verificar el funcionamiento de los equipos, a través de la ejecución de ensayos; inicialmente el de tilt test para estimar ángulos de fricción y posteriormente el de carga puntual para determinar índices de resistencia en diferentes tipos de roca.

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1. ESTADO DEL ARTE

4.1.1. Diseño de equipo para el ensayo de tilt test

Existe una variedad de diseños de equipos para realizar el ensayo de tilt test. Sin embargo, los diseños son empíricos, los cuales a partir de investigaciones realizadas se han adecuado de tal manera que los datos que se obtengan mediante estos sean más exactos. Existen varios tipos de mesas de inclinación como: las manuales, motorizadas, electrónicas y basculantes manuales como se muestra en las figuras 1 a 4. Todas ellas coinciden en que constan de un sistema de nivelación, plataforma de inclinación y sistema de medición del ángulo de inclinación. La diferencia es el sistema de operación, ya que unas son manuales y otras cuentan con sistemas automáticos^{22, 23, 24, 25}.

²² Cfr. DÍAZ, Mario y RODRÍGUEZ, Jean. Estudio de la estabilidad de taludes en roca entre los kilómetros 95 al 97 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca. *Universidad Privada del Norte* (Universidad Privada del Norte, 2018).

²³ Cfr. ARZÚA, Javier ... GONZÁLEZ, Javier. Efecto del paso del tiempo y del desgaste sobre los resultados del ensayo de inclinación para la obtención del ángulo de fricción básico de una roca. *Universidad de Vigo*, 2015. Accedido 30 de Julio de 2019 en: <https://www.interempresas.net/Mineria/Articulos/132417-Efecto-paso-tiempo-desgaste-resultados-ensayo-inclinacion-obtencion-angulo-friccion.html>

²⁴ Cfr. PÉREZ, Ignacio ... ARZÚA, Javier. Efecto del desgaste de la roca y de la velocidad de ensayo en la determinación mediante tilt test del ángulo de fricción básico de juntas en roca. *Ingeniería Civil*, 2017, 43-52. Recuperado de: <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/490/463>

²⁵ Cfr. ULUSAY, Resat y HASAN, Karakul. Assessment of basic friction angles of various rock types from Turkey under dry, wet and submerged conditions and some considerations on tilt testing. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75.4 (2016), 1683-99 Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/s10064-015-0828-4>

Figura 1. Mesa de inclinación manual.



Figura 2. Mesa de inclinación motorizada.



Fuente:
<http://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/12738>

Fuente:
<https://www.interempresas.net/Mineria/Articulos/132417-Efecto-paso-tiempo-desgaste-resultados-ensayo-inclinacion-obtencion-angulo-friccion.html>

Figura 3. Mesa de inclinación electrónico



Figura 4. Mesa basculante manual metálica.



Fuente:
<http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/490/463>

Fuente:
<https://doi.org/10.1007/s10064-015-0828-4>

4.1.2. Ensayo de Tilt Test (prueba de inclinación)

El ensayo Tilt Test o prueba de inclinación es una metodología que se usa para determinar el ángulo de fricción básico. Sin embargo, esta no es definitiva a causa de que la definición de dicho ángulo no está completamente determinada. El ángulo de fricción básico es un parámetro importante para determinación de la resistencia al corte en juntas de discontinuidades que no contengan relleno y que no presenten meteorización²⁶. Este ensayo permite el deslizamiento de un bloque sobre otro bloque con la superficie aserrada. El punto en el que se produce un desplazamiento de más del 10% de longitud medido de forma gradual se le llama ángulo de fricción básico, el cual es un parámetro que se puede obtener en campo o en laboratorio y sirve como base para determinar la resistencia al corte de discontinuidades²⁷.

Existen diferentes métodos para ejecutar el ensayo que dependen de la geometría de las muestras o especímenes a analizar, este ensayo es rápido, sencillo y económico²⁸. Se puede llevar a cabo con un par de especímenes de superficie planar, con tres núcleos, entre otros. Para los de geometría rectangular planar se tienen las expresiones de altura (h); longitud (l); ancho (w), donde la relación l/h debe ser mayor a 4 y a su vez los núcleos deben contener un diámetro mayor o igual a 50 mm donde la relación longitud/diámetro debe ser mayor o igual a 2²⁹ (Ver figura 5).

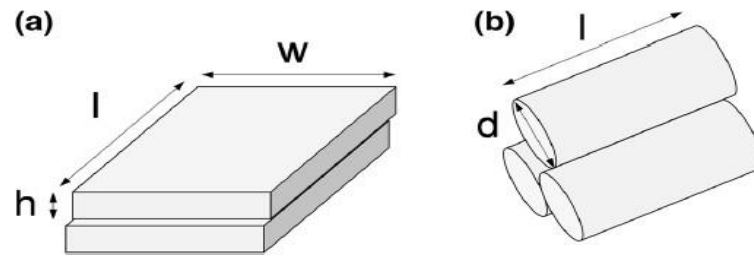
²⁶ Cfr. PÉREZ, Ignacio ... ARZÚA, Javier. Efecto del desgaste de la roca y de la velocidad de ensayo en la determinación mediante tilt test del ángulo de fricción básico de juntas en roca. *Ingeniería Civil*, 2017, 43-52. Recuperado de: <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/490/463>

²⁷ Cfr. ARZÚA, Javier ... GONZÁLEZ, Javier. Efecto del paso del tiempo y del desgaste sobre los resultados del ensayo de inclinación para la obtención del ángulo de fricción básico de una roca. *Universidad de Vigo*, 2015. Accedido 30 julio 2019, en: <https://www.interempresas.net/Mineria/Articulos/132417-Efecto-paso-tiempo-desgaste-resultados-ensayo-inclinacion-obtencion-angulo-friccion.html>.

²⁸ Cfr. DÍAZ, Mario y RODRÍGUEZ, Jean. Estudio de la estabilidad de taludes en roca entre los kilómetros 95 al 97 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca. *Universidad Privada del Norte* (Universidad Privada del Norte, 2018). Recuperado de: <http://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/12738>

²⁹ Cfr. ALEJANO, Leandro ... PÉREZ, Ignacio. ISRM Suggested method for determining the basic friction angle of planar rock surfaces by means of Tilt Tests., *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51.12 (2018), 3853-59. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1627-6>.

Figura 5. Dimensiones de los testigos para prueba de tilt test.



Fuente:

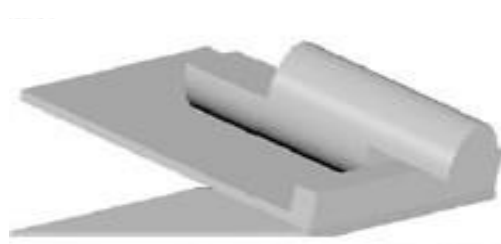
https://www.researchgate.net/publication/328595765_ISRM_Suggested_Method_for_Determining_the_Basic_Friction_Angle_of_Planar_Rock_Surfaces_by_Means_of_Tilt_Tests

Por otra parte, Barton propuso que el ángulo de fricción básico de un material rocoso se logra obtener por medio del ensayo de tilt test sobre cuerpos de prueba que sean sanos, planos, secos y aserrados en laboratorio, y que el ángulo a determinar de una placa sobre otra es el que se da en el momento del deslizamiento de la placa o cuerpo de prueba superior³⁰. Para Stimpson, las muestras para el ensayo resulta más sencillo cortarlas de manera cilíndrica en contradicción con lo que indicaba Barton (con una geometría rectangular o en placas), por tanto se propuso la prueba con tres cilindros o testigos permitiendo que cada uno de ellos se deslizara paralelamente a la posición de los otros dos cilindros en la parte inferior y así medir el ángulo de inclinación en el momento del deslizamiento³¹. La posición que deben tener las muestras al momento de elaborar el ensayo se muestra en la figura 6.

³⁰ Cfr. BARTON, Nick. The shear strength of rock and rock joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*, 13 (1976), 1-24.

³¹ Cfr. STIMPSON, B. A suggested technique for determining the basic friction Angle of Rock Surfaces Using Core., *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 18 (1981), 63-65.

Figura 6. Tipos de pruebas para ensayo de tilt test.



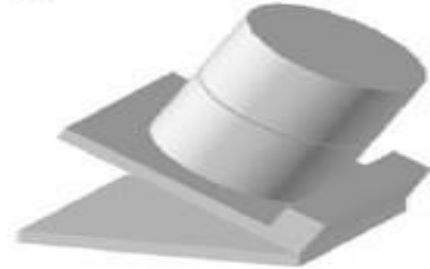
a. Prueba cilíndrica cortada longitudinalmente.



b. Pruebas realizadas en especímenes de base cuadrada.



c. Prueba tipo Stimpson.



d. Prueba con discos.

Fuente: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00603-012-0265-7>

En conclusión, la prueba de inclinación (tilt test) es el método más fácil y simple para determinar el ángulo de fricción básico. Donde a menudo se usan aparatos de prueba simple que se operan manualmente y que se puede realizar en campo o en laboratorio³². Para Cruden y Hu el ángulo de fricción interno o básico de las discontinuidades del macizo rocoso es esencial para evaluar estabilidad de taludes en los macizos rocosos y una de las maneras de obtenerlo es por medio del ensayo de tilt test³³.

4.1.3. Diseños de equipo para el ensayo de carga puntual.

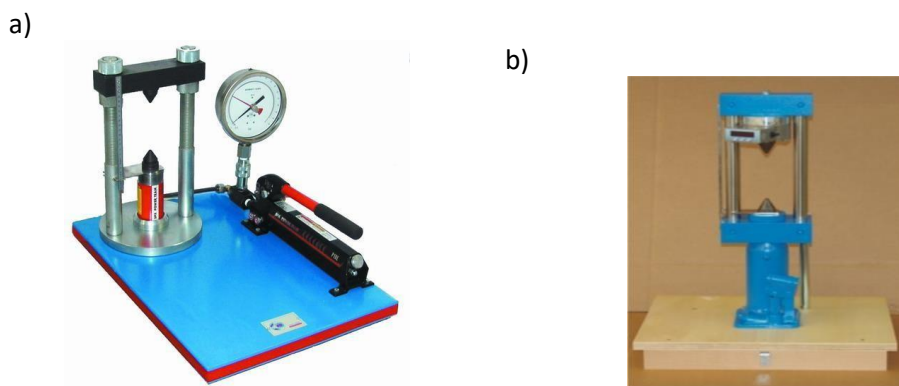
³² Cfr. HYUN, Jang ... BO-AN, Jang. Determination of the basic friction angle of rock surfaces by Tilt Tests», *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51.4 (2018), 989-1004. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1388-7>

³³ Cfr. HU, Xian-Qin y CRUDEN, D., *A portable tilting table for on-site test of the friction angles of discontinuities in rock masses* (Paris: International Association of Engineering Geology, 1992).

Para el ensayo de carga puntual se encuentran diversos tipos de modelos del equipo. Los cuales, coinciden en algunas partes del diseño debido a los requerimientos del ensayo. Los modelos se diferencian principalmente por su tecnología, que va enlazada con la precisión, capacidad, dimensiones, calidad y otros parámetros propios de los componentes de ensamble. Los siguientes modelos o diseños, pertenecen a distintos fabricantes que los han adecuado de tal manera que cumplan con la normatividad del ensayo (ASTM D5731 - 16), para determinar el índice de resistencia de la roca.

Se encuentran dos tipos de equipos usados para este ensayo, el primero de ellos es el equipo de carga puntual con manómetros los cuales pueden ser digitales o análogos, cómo se observan en la figura 7^{34, 35}. De igual manera están los equipos digitales que cuentan con transductor de presión, medidor de separación entre puntas cónicas, marco de prueba, gato hidráulico y bomba manual³⁶, en la figura 8 y 9 se encuentran algunos modelos.

Figura 7. a) Equipo de carga puntual analógico, b) equipo de carga puntual digital.



Fuente:

http://www.gisiberica.com/CARGA_PUNTUAL/Carga%20puntual.htm

³⁴ Cfr. G.I.S Ibérica. Equipo de carga puntual analógico. *GIS Ibérica*, 2010. Accedido 19 agosto 2019, en: http://www.gisiberica.com/CARGA_PUNTUAL/eca080.htm

³⁵ Cfr. G.I.S Ibérica. Equipo de carga puntual (manómetro digital). *GIS Ibérica*, 2010. Accedido 19 agosto 2019, en: http://www.gisiberica.com/CARGA_PUNTUAL/eca79.htm

³⁶ Cfr. CONTROLSGROUP. Digital rock strength index apparatus 100 kN cap. *Controlsgroup*, 2019. Accedido 19 agosto 2019, en: <https://www.controls-group.com/spa/meceaacutenica-de-rocas-testing-equipment/digital-rock-strength-index-apparatus-100-kn-cap.php>

Figura 8. Equipo para ensayo de carga puntual Marca ControlsGroup.



Fuente: <https://www.controls-group.com/spa/meceaacutenica-de-rocas-testing-equipment/digital-rock-strength-index-apparatus-100-kn-cap.php>

Figura 9. Máquina digital para ensayo de carga puntual.



Fuente: <https://www.pinzuar.com.co/pinzuar/es/productos/suelos/máquina-digital-ensayos-carga-puntual/>

4.1.4. Ensayo de Carga Puntual.

Denominado Point Load Text (PLT), la cual es una investigación que se desarrolla en campo o en laboratorio dependiendo del equipo. A su vez, es uno de los ensayos que permite analizar o estudiar la matriz rocosa, en lo que se refiere a la propiedad mecánica de resistencia de compresión simple de fragmentos de roca irregulares o testigos cilíndricos, por medio del índice de resistencia I_s correlacional. Este ensayo no es idóneo para determinar la resistencia a la compresión simple por medio del índice correlacionar de rocas blandas. El ensayo cómo tal consiste en romper una muestra por medio de dos puntas cónicas metálicas activadas por una prensa portátil³⁷.

La resistencia a la compresión simple de una roca es un parámetro común para establecer criterios de rotura y comportamiento geomecánico de un macizo

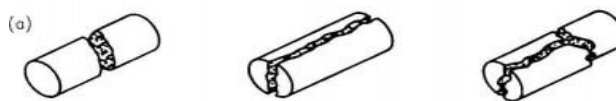
³⁷ Cfr. GONZÁLEZ DE VALLEJO et al. Opc. cit., pág 348.

rocoso³⁸. El ensayo de carga puntual se puede llevar a cabo en campo o en laboratorio, con base a cuatro tipos de ensayo:

- Cilíndrica de Franklin
- Cilíndrica de Louis
- Irregular o Lump test
- Correlaciones con Is50

En la figura 10 se especifican algunos tipos de falla o rotura de las muestras para que sean válidas o nulas.

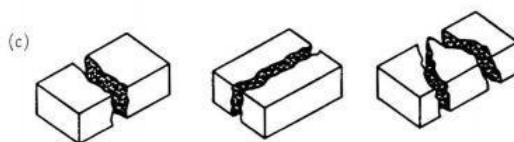
Figura 10. Roturas en testigos válidas y nulas.



(a) Ensayos diametrales validos



(b) Ensayos axiales validos



(c) Ensayo de bloque valido

³⁸ Cfr. BURBANO, Danny y GARCÍA, Tania. Estimación empírica de la resistencia a compresión simple a partir del ensayo de carga puntual en rocas anisótropas (esquistos y pizarras). *FIGEMPA; Investigación y Desarrollo*, 2.7 (2016), 13-16. Disponible en: <http://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/RevFIG/article/download/862/870/>

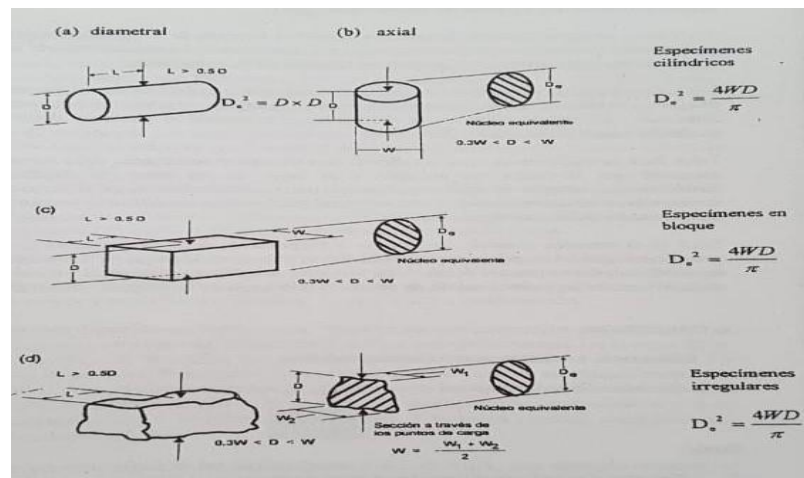


(d) ensayo diametral nulo, (e) ensayo axial nulo

Fuente: <http://hdl.handle.net/10251/10526>

El número de muestras a ensayar por el método de Lump test cómo mínimo puede ser veinte (20), donde la muestra no debe ser menor a 30 mm ni más de 85 mm, con una dimensión preferiblemente de 50 mm. De igual manera, se debe verificar que la muestra esté libre de irregularidades abruptas que generan concentración de esfuerzos y que sean semejantes a la observada en la figura 11. Por último, se tiene las correlaciones I_{s50} que busca una relación entre el índice de carga puntual con la resistencia a la compresión simple por medio del factor K_{50} el cual varía entre quince y veinticinco (15 y 25) para todas las rocas en general y para rocas anisótropas entre diez y cincuenta (10 y 50) ^{39,40}.

Figura 11. Formas regulares e irregulares para el ensayo de carga puntual.



Fuente: ⁴¹ Pág 170.

³⁹ Cfr. Ibíd., pág 358.

⁴⁰ Cfr. CORREA, Alvaro. *Caracterización de rocas. Ensayos de laboratorio*. (Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2000).

⁴¹ CORREA, Alvaro. *Caracterización de rocas. Ensayos de laboratorio*. (Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2000).

4.2. ANTECEDENTES

4.2.1. Diseños de equipo y aplicación del ensayo de tilt test

- Antecedentes de equipos

Los equipos que se han diseñado y construido para realizar el ensayo de tilt test, han presentado algún tipo de incertidumbre en los resultados, a causa de esto, se han desarrollado investigaciones para determinar un diseño óptimo que controle diferentes aspectos. Es necesario recalcar, que cuando se habla de diseño óptimo no se hace referencia a un diseño estándar, sino a un diseño que mitigue cada uno de los aspectos que pueden alterar los resultados o datos que se obtengan con el equipo. La velocidad del ensayo para varios investigadores ha sido un aspecto de estudio, que depende del diseño del equipo y a su vez de la operatividad. Sin embargo, Arzúa y González, controlaron las pruebas con una velocidad de 0,4 °/s con el equipo de mesa de inclinación en la investigación del paso del tiempo y el desgaste para determinar el ángulo de fricción básico. Adicionalmente se contemplaron la alteración de los datos ante las posibles vibraciones del equipo⁴².

En la investigación realizada por Pérez y Arzúa sobre el desgaste de la roca y la velocidad del ensayo, se especifica que el equipo de mesa inclinada con diseño sencillo, permite realizar el ensayo a distintos tipos de geometrías, así mismo, de dimensiones que van en relación a las muestras que se posean. En cuanto a lo relacionado con las velocidades del ensayo, afirma que se pueden usar dispositivos de medición controlada. Sin embargo la velocidad con la que se realiza la prueba no afecta de manera significativa los resultados⁴³. Por tanto para los equipos eléctricos sin problemas de vibraciones o movimientos sugiere unas velocidades entre 10° y 20° por minuto, por otra parte para equipos operados manualmente se recomienda una velocidad entre 5° a 10° por minuto⁴⁴. El diseño del equipo debe

⁴² Cfr. ARZÚA et al. Opc. cit <https://www.interempresas.net/Mineria/Articulos/132417-Efecto-paso-tiempo-desgaste-resultados-ensayo-inclinacion-obtencion-angulo-friccion.html>

⁴³ Cfr. PÉREZ et al. Opc., cit, pág 45-48

⁴⁴ Cfr. ALEJANO et al. Opc., cit, pág 3854-3859

permitir realizar el ensayo de tilt test a distintas geometrías, dentro de las que se pueden encontrar geometrías rectangulares cuadradas y/o cilíndricas⁴⁵.

- Antecedentes de ensayo

El proyecto de efecto de desgaste de roca y de la velocidad del ensayo en la determinación mediante tilt test del ángulo de fricción básico de juntas en roca, principalmente se basó en el estudio del efecto de desgaste que se puede presentar debido a las repeticiones que se realizan sobre la misma superficie de roca, teniendo en cuenta la velocidad de rotación. Para llevar a cabo la elaboración del ensayo hicieron 5 repeticiones por cada tilt test, cada ensayo compuesto por 20 tilt test que constituyen 5 series con velocidades distintas. Como resultado se tiene que la velocidad de rotación en rangos de 2 a 25 °/min no afecta significativamente la obtención del ángulo de fricción básico, a su vez el desgaste presenta una desviación estándar lineal lo que se ajusta a un comportamiento normal. Por otra parte, abre un campo de estudio sobre la posible influencia de los cortes con sierras para las muestras en la obtención del ángulo de fricción básico⁴⁶.

La investigación comparison of different techniques of tilt testing and basic friction angle variability assessment, elaboró una comparación de los ángulos de fricción de distintos tipos de roca obtenidos por medio de cuatro métodos. La prueba de tipo Stimpson (tres muestras cilíndricas), ensayo realizado sobre una muestra cilíndrica cortada longitudinalmente, prueba realizada en losas de base cuadrada y pruebas con disco. Como resultados se tienen que no se deben hacer las pruebas con especímenes pequeños, que las pruebas de inclinación en generatrices no son adecuadas para obtener el ángulo de fricción básico en discontinuidades, se deben considerar repeticiones de acuerdo para la determinación del ángulo de fricción básico si la mediana de este se encuentra a $\pm 3^\circ$ ⁴⁷.

⁴⁵ Cfr. GARCÍA. Opc., cit, pág 50.

⁴⁶ Cfr. PÉREZ et al. Opc., cit, pág 45-51

⁴⁷ Cfr. ALEJANO, GONZÁLEZ, y MURALHA. Opc., cit., pág 1026 -1033

Por último, se presenta la investigación sobre el “Efecto del paso del tiempo y del desgaste sobre los resultados del ensayo de inclinación para la obtención del ángulo de fricción básico de una roca” cuyo objetivo principal era considerar el desgaste que se puede presentar al realizar las pruebas de inclinación y también el paso del tiempo en que se realizan las pruebas. A lo cual se llegaron a las conclusiones basadas en los resultados que el desgaste si es un parámetro a tener en cuenta ya que al realizar repeticiones por la fricción que se presenta en las muestras estas van soltando partículas de roca las cuales si no se limpian alteran los valores que se puedan obtener. Por otra parte, el paso del tiempo no afecta el valor del ángulo de fricción si las muestras se conservan en ambientes sin presencia de humedad⁴⁸.

Hay diversas investigaciones en cuanto al ensayo de tilt test así como de los resultados obtenidos, cómo se evidencia en las siguientes tablas que tiene una compilación de resultado del ángulo de fricción básico de distintas rocas (tabla 1)⁴⁹. Por otra parte, existen otras compilaciones, sin embargo en la tabla 2 se muestran ángulos de fricción básicos obtenidos de investigaciones desde 1968 a 1999^{50,51}.

Tabla 1. Ángulos de fricción básicos de algunas rocas.

Clase de roca	Tipo de roca	Ángulo de fricción básico ϕ_b (°)
Sedimentarias	Caliza	33-40
	Marga	---
	Arenisca	25-35
	Limolita	27-31
	Esquistos	27
Metamórficas	Gneis	23-33
	Mármol	25-35
	Cuarcita	48
Ígneas	Basalto	31-38

⁴⁸ Cfr. ARZÚA et al. Opc., cit. <http://www.interempresas.net/Mineria/Articulos/132417-Efecto-paso-tiempo-desgaste-resultados-ensayo-inclinacion-obtencion-angulo-friccion.html>

⁴⁹ Cfr. RAMÍREZ Y ALEJANO. Opc., cit., pág 66.

⁵⁰ Cfr. GONZÁLEZ DE VALLEJO et al. Opc., cit., pág 158-159.

⁵¹ Cfr. GONZÁLEZ DE VALLEJO et al. Opc., cit., pág 159.

	Gabro	---
	Granito	29-35

Fuente: Modificada de RAMÍREZ, Pedro y ALEJANO, Leandro. Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes, 2004, pág 66.

Tabla 2. Ángulos de fricción básico obtenidos a partir del ensayo de compresión triaxial.

Roca	Angulo de fricción básico (°)
Andesita	45
Arenisca	30 - 50
Basalto	48 - 55
Caliza	35 - 50
Caliza margosa	30
Cuarcita	40 - 55
Diabasa	40 - 50
Diorita	50 - 55
Dolomia	25 - 35
Esquisto	25 - 30*
	20 - 30*
Gabro	35
Gneiss	30 - 40
Granito	45 - 58
Grauvaca	45 - 50
Mármol	35 - 45
Lutita	40 - 60
	15 - 25*
Pizarra	40 - 55
	15 - 30*
Yeso	30
* ángulos de fricción en superficies de laminación	

Fuente: Modificada de GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis et al., *Ingeniería Geológica*. (Madrid: Pearson Educación, 2002), pág 159.

4.2.2. Diseño de equipo y aplicación del ensayo de carga puntual

- Antecedentes de equipo de carga puntual

Los diseños que se encuentran del equipo de carga puntual coinciden en varios componentes, donde los diseños varían según el fabricante. Estos los adecuan, ya sea, en la parte estructural del equipo en lo relacionado a materiales constructivos y optimizan o ajustan el sistema de medición o también el sistema de aplicación de carga. Lo que genera una capacidad de acuerdo al dimensionamiento general del equipo. En la mayoría de los casos son portátiles de fácil manejo y funcionales de acuerdo a sus características. La rigidez que presentan depende principalmente del diseño preestablecido en el que se seleccionan los materiales para su fabricación y ensamble⁵².

Dentro del diseño se debe contemplar que la norma ASTM D5137 - 16, preestablece los componentes que debe poseer el equipo de carga puntual, así como algunas características. A su vez, indica que el equipo debe ser resistente a vibraciones y golpes con el fin de que las lecturas no se alteren. El sistema de operación lo define el fabricante, quien también se encarga de establecer los procesos de calibración y mantenimiento. Algunos componentes y características que debe poseer el equipo son⁵³:

- Sistema de carga: Debe contener una apertura de bastidor para rocas grandes y pequeñas que se encuentren dentro de un rango de 30 a 100mm, capacidad para fallar rocas fuertes. El marco de carga debe estar diseñado de tal manera que no presente deformaciones y además debe poseer unos rodillos o puntas cónicas.

⁵² Cfr. COTECNO. Aparato portátil de prueba de carga puntual. *Cotecno*, 2019. Accedido 19 agosto 2019, en: <https://www.cotecno.cl/nuestros-productos/aparato-portatil-de-prueba-de-carga-puntual/>

⁵³ Cfr. ASTM D5731 - 16. Método de prueba estándar para la determinación del índice de resistencia de la roca y la aplicación a las clasificaciones de la resistencia de la roca. *ASTM International*, 2016. Accedido 3 julio 2019, en: <https://www.astm.org/Standards/D5731.htm>

- Sistema de medición de carga: la medición de carga se realiza por medio de un dispositivo de celda de carga o sensor de presión y/o incluso manómetros.
- Sistema de distancia entre puntas: reglilla para medir distancia entre puntas

La investigación adelantada por estudiantes de la Universidad del Azuay titulada “Construcción de la quina de Franklin, pruebas y correlación con ensayos de laboratorio en compresión de rocas”, donde el objetivo general fue construir la máquina de Franklin o también conocida como equipo de carga puntual, la cual permitiera obtener el índice de resistencia de la roca para luego ser correlacionado a partir de ensayos de compresión simple. Para su diseño previo se tuvieron en cuenta los esfuerzos, y deformaciones que el equipo podría presentar al momento de realizar la prueba, para determinar los materiales que ofrecieran la rigidez necesaria del equipo. Por otra parte, se consideraron aspectos de la capacidad del gato hidráulico de tal manera que este fuera acorde con el diseño estructural⁵⁴.

- Antecedentes ensayo de carga puntual

Cómo se puede observar en el libro titulado “Descripción del macizo rocoso” de Ludger O. Suárez-Burgoa, el ensayo fue propuesto inicialmente de manera sistemática por Broch y Franklin en 1950 en el que se determina el índice de resistencia de la roca la cual puede estar húmeda o seca, se usa solo para muestras cilíndricas que tengan un diámetro aproximado de 50 mm. Como complementarios se tiene la prueba cilíndrica de Louis en la que simplemente se realiza una corrección del diámetro, otro es la prueba Lump test que también se hace una corrección de las distancias entre las puntas cónicas del equipo según la irregularidad de muestra. Por último, en el libro se tiene una compilación de investigaciones que se han realizado a distintos tipos de rocas en las que se

⁵⁴ Cfr. QUEVEDO, José y REYES, Johanna. Construcción de la “Máquina de Franklin”, pruebas y correlación con ensayos de laboratorio en compresión de rocas. (Universidad del Azuay, 2019). Recuperado de: <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/8954>

evidencia la relación que existe entre la resistencia a la compresión simple con el índice de carga puntual a través de correlaciones⁵⁵.

En conclusión, la información encontrada con respecto al ensayo de carga puntual es muy amplia. Se evidencia la importancia del ensayo en el campo de la mecánica de rocas. Este ensayo ha sido objeto de estudio, análisis, relación y correlación en distintos aspectos que tienen que ver principalmente con la descripción, clasificación y caracterización del macizo rocoso. En la tabla 3, se presentan valores de resistencia a la compresión simple de distintos tipo de rocas, compiladas de distintas investigaciones⁵⁶.

Tabla 3. Resistencia a la compresión simple de algunas rocas.

Clase de roca	Tipo de roca	Resistencia la compresión simple (Mpa)
Sedimentarias	Caliza	50 – 200
	Marga	5 – 15
	Arenisca	50 – 150
	Limolita	5 – 200
	Esquistos	50 – 100
Metamórficas	Gneis	100 – 200
	Mármol	100 – 200
	Cuarcita	200 – 400
Ígneas	Basalto	100 – 300
	Gabro	100 – 300
	Granito	100 – 200

Fuente: Modificada de RAMÍREZ, Pedro y ALEJANO, Leandro. Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes, 2004, pág 66.

A partir de la determinación del índice de resistencia a carga puntual y correlacionándolo con la resistencia a la compresión simple se puede clasificar la roca, cómo se observa en la tabla 4 ^{57, 58}.

⁵⁵ Cfr. SUÁREZ. Opc., cit., pág 358-365

⁵⁶ Cfr. RAMÍREZ Y ALEJANO. Opc., cit., pág 66.

⁵⁷ Cfr. GONZÁLEZ DE VALLEJO et al. Opc., cit., pág 130.

⁵⁸ Cfr. GONZÁLEZ DE VALLEJO et al. Opc., cit., pág 130.

Tabla 4. Rangos de resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa sana.

Roca	Resistencia a la compresión simple (kg/cm ²)	Resistencia a la compresión simple (Mpa)
Andesita	1000 - 5000	98,1 - 490,5
Anfibolita	2100 - 5300	206,01 - 519,93
Anhidrita	800 - 1300	78,48 - 127,53
Arenisca	300 - 2350	29,43 - 230,535
Basalto	600 - 3500	58,86 - 343,35
Caliza	500 - 2000	49,05 - 196,2
Cuarcita	1000 - 5000	98,1 - 490,5
Diabasa	1300 - 3650	127,53 - 358,065
Diorita	1200 - 3350	117,72 - 328,635
Dolerita	1000 - 3500	98,1 - 343,35
Dolomía	500 - 3500	49,05 - 343,35
Esquisto	200 - 1600	19,62 - 156,96
Gabro	1800 - 3000	176,58 - 294,3
Gneis	500 - 2500	49,05 - 245,25
Granito	500 - 3000	49,05 - 294,3
Grauvaca	800 - 2200	78,48 - 215,82
Limolita	350 - 2500	34,335 - 245,25
Lutita	100 - 900	9,81 - 88,29
Marga	200 - 900	19,62 - 88,29
Mármol	600 - 2500	58,86 - 245,25
Pizarra	300 - 2000	29,43 - 196,2
Sal	50 - 300	4,905 - 29,43
Toba	100 - 460	9,81 - 45,126
Yeso	100 - 400	9,81 - 39,24

Fuente: Modificada de GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis et al., *Ingeniería Geológica*. (Madrid: Pearson Educación, 2002), pág 130.

4.3. MARCO TEORICO

4.3.1. Ensayo de tilt test

4.3.1.1. Resistencia al corte de las discontinuidades sin relleno (τ): Barton estableció un método empírico para determinar la resistencia al corte de las discontinuidades sin ningún tipo de relleno. En la cual, se tiene en cuenta el ángulo de fricción básico de la, que se obtiene por medio de la ejecución de una prueba de inclinación o tilt test⁵⁹. Para determinar esta resistencia se debe aplicar la ecuación 1.

$$\tau = \sigma_n + [\phi_b + JRC * \log_{10} (\frac{JCS}{\sigma_n})] \quad (1)$$

Donde:

τ : Resistencia al corte de la discontinuidad

σ_n : Esfuerzo normal aplicado en la discontinuidad

ϕ_b : Ángulo de fricción básico

JRC : Coeficiente de rugosidad de la junta

JCS : Resistencia a la compresión de la superficie de la junta

4.3.1.2. Resistencia al corte de las discontinuidades meteorizadas y no meteorizadas (τ): Choubey y Barton modificaron el criterio para determinar la resistencia al corte sin relleno (ecuación 1), ya que por medio de este criterio se puede determinar dicha resistencia en discontinuidades meteorizadas y no meteorizadas quedando una expresión en la que se incluye el ángulo residual que se encuentra en relación al ángulo de fricción básico de la roca (ecuación 2)⁶⁰.

$$\tau = \sigma_n + [\phi_r + JRC * \log_{10} (\frac{JCS}{\sigma_n})] \quad (2)$$

⁵⁹ Cfr. ULUSAY y KARAKUL. Opc., cit., pág 2

⁶⁰ Cfr. Ibíd., pág 2.

Donde:

τ : Resistencia al corte de la discontinuidad

σ_n : Esfuerzo normal aplicado en la discontinuidad

ϕ_r : Ángulo de fricción residual

JRC : Coeficiente de rugosidad de la junta

JCS : Resistencia a la compresión de la superficie de la junta

4.3.1.3. Coeficiente de rugosidad de la junta (JRC)

Este coeficiente (ecuación 3) depende principalmente de la rugosidad que presenta las paredes de la discontinuidad, varía en una escala de 1-20 (figura 12). Este se obtiene a partir de la determinación del ángulo de fricción básico. A su vez, es un parámetro para determinar la resistencia al corte en discontinuidades^{61, 62, 63}.

Figura 12. Perfiles tipo para determinar el JRC (Barton y Choubey 1977).



Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis et al., *Ingeniería Geológica*. (Madrid: Pearson Educación, 2002), pág 130.

⁶¹ Cfr. GONZÁLEZ DE VALLEJO et al. Opc., cit., pág 186.

⁶² Cfr. GONZÁLEZ DE VALLEJO et al. Opc., cit., pág 186.

⁶³ Cfr. GONZÁLEZ DE VALLEJO et al. Opc., cit., pág 186.

$$JRC = \frac{\beta - \phi_r}{\log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)_{ensayo}} \quad (3)$$

Donde:

JRC : Coeficiente de rugosidad de la junta

β : Ángulo de inclinación de la configuración al momento del deslizamiento

ϕ_r : Ángulo de fricción residual

JCS : Resistencia a la compresión de la superficie de la junta

σ_n : Esfuerzo normal aplicado en la discontinuidad

4.3.1.4. Ángulo de fricción residual (ϕ_r): Este se determina para rocas alteradas generalmente meteorizadas. Su valor tiende a ser más bajo que el ángulo de fricción básico. Este se da en relación al ángulo básico, determinado por medio de la ecuación 4⁶⁴.

$$\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20 \left(\frac{r}{R} \right) \quad (4)$$

Donde:

ϕ_r : Ángulo de fricción residual

ϕ_b : Ángulo de fricción básico

r : Numero de rebote del martillo Schmidt registrado para superficies meteorizadas y húmedas

R : Numero de rebote del martillo Schmidt registrado para superficies aserradas, no meteorizadas de la misma roca

⁶⁴ Cfr. Ibíd., pág 185.

4.3.1.5. Ángulo de fricción básico en superficies de roca (ϕ_b): Este es para bloques de roca o superficies planas (contacto superficial). Se calcula a través del promedio de 5 repeticiones, cómo se evidencia en la ecuación 5⁶⁵.

$$\phi_b = \text{mediana } \beta_{i=1,\dots,5} \quad (5)$$

Donde:

β : Ángulo de inclinación de la configuración al momento del deslizamiento

ϕ_b : Ángulo de fricción básico

- Núcleos de roca: el ángulo de fricción (ϕ_b), para núcleos de roca se calcula a utilizando la ecuación 6⁶⁶:

$$\phi_b = \text{mediana} \left[\arctan \left(\frac{\sqrt{3}}{2} * \tan \beta_{i=1,\dots,5} \right) \right] \quad (6)$$

Donde:

β : Ángulo de inclinación de la configuración al momento del deslizamiento

ϕ_b : Ángulo de fricción básico

Las probetas o muestras deben cumplir con ciertas dimensiones según su geometría, las cuales se especifican en la tabla 5⁶⁷.

Tabla 5. Dimensiones de las probetas.

Muestra cilíndrica con corte longitudinal		Altura (a)	2*d
		Diámetro (d)	54 mm
Muestras de base cuadrada	Probeta grande	Ancho (a)	100 mm
		Largo (l)	100 mm
		Espesor (e)	40 mm
		Ancho (a)	50 mm

⁶⁵ Cfr. ALEJANO et al. Opc. cit., pág 3853-3859

⁶⁶ Cfr. Ibíd., pág 3853-3859

⁶⁷ Cfr. ALEJANO, GONZÁLEZ, y MURALHA. Opc. cit., pág 5-6.

	Probeta pequeña	Largo (l)	50 mm
		Espesor (e)	20 mm
Muestras cilíndricas propuesta por Stimpson (tres muestras cilíndricas)		Altura (a)	2*d
		Diámetro (d)	54 mm
Muestras con geometría de disco		Altura (a)	27 mm
		Diámetro (d)	54 mm

Fuente: Autores

4.3.2. Ensayo de carga puntual

Este ensayo se puede realizar por medio de cuatro métodos. Para muestras cilíndricas se hace uso de los métodos conocidos como Franklin y Louis. Por otra parte para muestras irregulares se hace uso del método de Lump test o el método de correlaciones I_{S50}

4.3.2.1. Índice de resistencia a carga puntual I_{S50}

- Método de Franklin

Por medio del ensayo de carga puntual se determina una de las variables para calcular el índice de resistencia de carga puntual corregido, usando la ecuación 7⁶⁸.

$$I_{S50} = F * I_s \quad (7)$$

Donde:

I_{S50} : Índice de resistencia a carga puntual

F : Factor de corrección por tamaño

El factor de corrección por tamaño se obtiene usando la ecuación 8⁶⁹.

$$F = \left(\frac{De}{50}\right)^{0,45} \quad (8)$$

⁶⁸ Cfr. CORREA. Opc., cit., pág 174

⁶⁹ Cfr. Idid., pág 173.

Donde:

F : Factor de corrección por tamaño.

De : Diámetro equivalente de la muestra

En el caso de los especímenes que se encuentran cercanos al tamaño estándar de 50 mm, se usa la ecuación 9⁷⁰.

$$F = \sqrt{\frac{De}{50}} \quad (9)$$

Donde:

F : Factor de corrección por tamaño.

De : Diámetro equivalente de la muestra

Se debe determinar el índice de carga puntual no corregida, usando la ecuación 10⁷¹.

$$Is = \frac{P}{De^2} \quad (10)$$

Donde:

P : La carga de rotura aplicada por el equipo al testigo

De : Diámetro equivalente de la muestra

Para el diámetro equivalente en los especímenes se usa la ecuación 11, con respecto a la parte diametral. Para las muestras axiales, en bloque o en formas irregulares se usa la ecuación 12⁷².

$$De^2 = D^2 \quad (11)$$

Donde:

⁷⁰ Cfr. Idid., pág 173.

⁷¹ Cfr. Idid., pág 173.

⁷² Cfr. Idid., pág 173.

De^2 : Diámetro equivalente de la muestra.

D : Diámetro

$$De^2 = \frac{4A}{\pi} \quad (12)$$

Donde:

De^2 : Diámetro equivalente de la muestra.

A : Área

El área de la sección transversal del espécimen o muestra, se da en relación a la distancia entre las dos puntas, para determinar esto se usa la ecuación 13⁷³.

$$A = WD \quad (13)$$

Donde:

A : Área

W : Ancho

D : Diámetro

El valor obtenido se corrige a un valor normalizado (I_{s50}) correspondiente a una muestra cilíndrica de 50 mm de diámetro, por medio de la ecuación 8. En caso que el diámetro sea próximo a 50 mm el exponente de la ecuación es igual a 0.5⁷⁴. A partir del índice de carga puntual simple normalizado o corregido se logra clasificar el material rocoso (ver tabla 6)⁷⁵.

Tabla 6. Clasificación de material rocoso en base al I_{s50} .

CLASIFICACIÓN	I_{s50}
Muy alta resistencia	>8

⁷³ Cfr. Idid., pág 174.

⁷⁴ Cfr. Ibíd., pág 359.

⁷⁵ Cfr. Ibíd., pág 358.

Alta resistencia	4 a 8
Mediana resistencia	2 a 4
Baja resistencia	1 a 2
Muy baja resistencia	< 1

Fuente: SUÁREZ, Ludger. *Descripción del macizo rocoso. Introducción a la ingeniería de rocas de superficie y subterránea*. (Universidad Nacional de Colombia, 2015). Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/330834433_Descripcion_del_macizo_rocoso_introduccion_a_la_ingenieria_de_rocas_de_superficie_y_subterranea. Pág 358

Para el ensayo en las muestras irregulares se deben tener en cuenta aspectos de forma y tamaño cómo se pueden observar en la Figura 11 (d). Las muestras no deben presentar irregularidades considerables ya que estas pueden provocar diferentes tipos de concentración de esfuerzos⁷⁶.

4.3.2.2. Correlaciones más conocidas para determinar el I_{S50}

Las correlaciones entre el I_{S50} y σ_{ci} más conocidas son las de Deer & Miller, las cuales sirven para todos los tipos de rocas en general, la ecuación 14 muestra la correlación planteada. De igual manera, existen correlaciones implementadas por la ISRM, las cuales se observan en la ecuación 15^{77, 78}:

$$\sigma_{ci} = 23 I_{S50} \quad (14)$$

$$\sigma_{ci} = (20 \rightarrow 25) I_{S50} \quad (15)$$

Dónde:

σ_{ci} : Resistencia a la compresión simple o uniaxial

I_{S50} : Índice de resistencia a carga puntual normalizado

⁷⁶ Cfr. Ibíd., pág 363

⁷⁷ Cfr. SUÁREZ. Opc, cit., pág 363.

⁷⁸ Cfr. Ibíd., pág 364.

4.3.3. Diseño de equipos

El diseño de un equipo, máquina o estructura se basa principalmente en un plan para dar solución a una necesidad. Esto requiere de la aplicación de teorías o información que en algunos casos puede ser escasa y en otros excesiva. Para el diseño se deben tener en cuenta fases que son las que de manera iterativa, definen el diseño óptimo⁷⁹. Por otra parte, las consideraciones de diseño se deben aplicar de acuerdo a las características o requerimientos para dar solución a la necesidad. En la mayoría de los casos se tienen en cuenta consideraciones de funcionalidad, resistencia, seguridad, confiabilidad, fabricación, utilidad, costo, vida útil y otras que corresponden a las características propias de los equipos, máquinas o estructuras que se pretendan construir⁸⁰.

4.3.3.1. Aspectos generales para el diseño del equipo de tilt test

Con base en la literatura consultada y observando los diferentes tipos de diseños que se encuentran para realizar el ensayo de tilt test, el equipo debe contener un sistema de nivelación, plataforma para las muestras, sistema para desarrollar la inclinación y sistema para medir la inclinación.

4.3.3.2. Aspectos generales para el diseño del equipo de carga puntual

De acuerdo con la información del numeral 4.3.2., el equipo de carga puntual debe contener tres partes importantes, el sistema de carga, sistema de medición de carga y sistema de medición de distancia entre puntas, cómo lo estipula la ISRM D5731⁸¹.

4.3.3.3. Conceptos de diseño

⁷⁹ Cfr. BUDYNAS Y NISBETT. Opc., cit., pág 5-6

⁸⁰ Cfr. BUDYNAS Y NISBETT. Opc., cit., pág 5.

⁸¹ Cfr. ASTM D5731 - 16. Opc., cit., <https://www.astm.org/Standards/D5731>

Los métodos de estática en el análisis cómo en el diseño de equipos, máquinas o estructuras, permiten determinar las fuerzas a las que se someten los distintos elementos que los componen⁸². Los pasos que se deben llevar a cabo son:

- Diagrama de cuerpo libre: Permite analizar un equipo, máquina o estructura de una manera más sencilla. Consiste en aislar cada elemento y analizarlo por separado, para luego unificarlos y poder determinar el comportamiento de todo el sistema⁸³.
- Condiciones de Equilibrio: Se dan principalmente por las fuerzas ejercidas sobre un elemento. Permiten determinar las ecuaciones de equilibrio (ecuación 16) de acuerdo a las componentes que se identifiquen⁸⁴

$$\begin{aligned}\Sigma M &= 0 \\ \Sigma f &= 0\end{aligned}\tag{16}$$

Donde:

M : Momentos

f : Fuerzas

A partir de las ecuaciones de equilibrio se determinan reacciones, así cómo también fuerzas desconocidas. El desarrollo de las ecuaciones se dio principalmente en los diagramas de cuerpo libre.

- Esfuerzo normal: “Intensidad de fuerzas distribuidas a través de una sección dada. La resistencia del elemento que componga un sistema depende del tipo de material, la fuerza aplicada y del área de la sección transversal”, ver ecuación 17 ⁸⁵.

$$\sigma = \frac{P}{A}\tag{17}$$

⁸² Cfr. BEER, Ferdinand ... MAZUREK, David. *Mecánica De Materiales.*, Quinta edi (México: McGraw-Hill, 2009).

⁸³ Cfr. BUDYNAS Y NISBETT. Opc, cit., pág 68.

⁸⁴ Cfr. BEER et al. 9-10

⁸⁵ BEER et al. Opc., cit., pág 7.

Donde:

σ : Esfuerzo normal

P : Carga axial

A : Área sección transversal

- Esfuerzo cortante: Se presenta cuando se aplican fuerzas transversales. En este se presentan fuerzas internas en el plano de la sección, las cuales se conocen como fuerzas cortantes. La magnitud de la resultante es el cortante en la sección, por ende al dividirlo sobre el área de la sección transversal se obtiene el esfuerzo cortante promedio. Este tipo de esfuerzo generalmente se presenta en los pernos, pasadores y/o remaches que se usan generalmente para conectar diversos elementos, para determinar este esfuerzo se usa la ecuación 18⁸⁶.

$$\tau_{prom} = \frac{P}{A} = \frac{F}{A} \quad (18)$$

Donde:

τ_{prom} : Esfuerzo cortante promedio

P : Resultante fuerzas internas o cortante en la sección

A : Área de la sección transversal

4.4. MARCO NORMATIVO

- 4.4.1. Norma ASTM D 5731 – 16 “Método de prueba estándar para la determinación del índice de resistencia de la carga puntual de la roca y la aplicación a las clasificaciones de la resistencia de la roca.

La prueba de carga puntual es usada para determinar el índice de resistencia de carga puntual que se aplica en la clasificación de resistencia de las rocas. Las muestras de roca en forma de núcleo, bloques cortados o bultos irregulares, se

⁸⁶ Cfr. BEER et al. Op., cit., pág 9-11.

analizan por medio de la aplicación de carga concentrada a través de las placas cónicas truncadas. Los resultados obtenidos de la prueba dependen del trato de la muestra al realizar la prueba. Con este método se logra analizar muestras en forma de núcleos, bloques o bultos de roca con un diámetro de prueba de 30 a 85 mm. Se realiza en campo o en laboratorio, donde generalmente se elabora la prueba en campo porque la máquina es portátil, la preparación de la muestra es mínima y se analiza dentro de un período corto⁸⁷.

4.4.2. Método sugerido por ISRM para determinar el ángulo de fricción básico por medio de tilt test.

El objetivo del método sugerido por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM) es proporcionar un procedimiento de laboratorio para determinar el ángulo básico de fricción de la resistencia al corte de las discontinuidades de roca. La propuesta hace referencia a determinar el ángulo básico de fricción de manera estática con velocidades de inclinación constantes de la plataforma⁸⁸.

4.4.3. Otras normas para el desarrollo del proyecto están relacionadas con los materiales usados para la construcción de los equipos de tilt test y carga puntual⁸⁹.

Tabla 7. Normas de materiales usados.

AISI	American Iron and Steel Institute	AISI 304
		AISI 4140
ASTM	American Society of Testing Materials	ASTM A36
SAE	Society of Automotive Engineers	SAE 1045
AA	Aluminum Association	AA

Fuente: Autores

⁸⁷ Cfr. ASTM D5731 - 16. Método de prueba estándar para la determinación del índice de resistencia de la roca y la aplicación a las clasificaciones de la resistencia de la roca. *ASTM International*, 2016. Accedido 3 julio 2019 en: <https://www.astm.org/Standards/D5731.htm>

⁸⁸ Cfr. ALEJANO et al. Opc., cit., pág 3853-3859

⁸⁹ Cfr. BUDYNAS y NISBETT. Opc., cit., pág 12.

5. MATERIALES, EQUIPOS Y MÉTODOS

5.1. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

Por medio de la investigación, ya sea por procesos sistemáticos, críticos y empíricos, se logra dar solución a un problema en un estudio. Se tiene el enfoque cuantitativo y cualitativo, donde para el presente proyecto se cuenta con un enfoque cuantitativo. En este, se utiliza procesos de recolección de información para probar una hipótesis con base en mediciones numéricas, para que la información logre ser replicada y de igual manera probar teorías. Los estudios exploratorios, se aplican cuando el propósito de la investigación es indagar desde una perspectiva innovadora y el problema que se abarca es poco estudiado. Igualmente se aplican los estudios descriptivos, donde se especifican tanto propiedades como características de un objeto u otros para un respectivo análisis de estos⁹⁰. Con base en lo anterior, se dió la investigación en el enfoque investigativo cuantitativo y de igual manera, los estudios exploratorio y descriptivo de cada uno de los equipos.

5.2. METODOLOGÍA

Para el presente proyecto se dio en primer lugar la recolección de información sobre los ensayos de tilt test y carga puntual y de igual manera de los equipos usados para su desarrollo. En cuanto a los ensayos, se enfocó la búsqueda a campos de aplicación, aspectos relacionados a normatividad y procesos de ejecución. Para los equipos, no solo se orientó a la recolección de información técnica en la que se especifica componentes y características de cada uno de los equipos, sino también, a información asociada a costos y calidad. Es importante aclarar que para fortalecer el conocimiento fue necesario efectuar una revisión bibliográfica de obras derivadas de tipo científico que contienen aspectos teóricos e inspeccionar investigaciones en las que se han realizado los ensayos y se ha hecho uso de los equipos de tilt test y

⁹⁰ Cfr. HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto, *Metodología de la investigación.*, Sexta edic (México: McGraw-Hill Education, 2014).

carga puntual, para el estudio y análisis de un fenómeno u obra relacionado con el campo de la ingeniería civil, geológica o de minas.

Seguido a esto se elaboró el diseño de los equipos para ensayos de tilt test y carga puntual, el cual se orientó principalmente para dar solución a una necesidad. En este, se tuvo en cuenta parámetros de diseño especificados por la norma de cada ensayo. A su vez, también se aplicaron conceptos conexos a la mecánica de materiales, ciencia que permite analizar los materiales, así como los comportamientos ante sollicitaciones a los que estos se exponen. El diseño de cada equipo se estableció a partir de consideraciones de diseño cómo: transportabilidad, funcionalidad, seguridad, confiabilidad, forma, tamaño y mantenimiento, además de consideraciones técnicas, económicas y de calidad.

Luego del diseño de los equipos, se dio la construcción de estos para prueba de inclinación y carga puntual. Esta se llevó a cabo en las instalaciones de la empresa ROYMEN, la cual cuenta con personal calificado, con experiencia y amplio conocimiento en el diseño, construcción, ensamble, mantenimiento y reparación de equipos para estudios de suelos y rocas. Se emplearon técnicas y se desarrollaron actividades, que requerían del uso de herramientas y equipos especializados del sector metalmecánico. Los procesos ejecutados para construcción de cada equipo, van en relación a cada uno, sin embargo, los más usados generalmente fueron: adquisición de materiales, fabricación de piezas, transformación estética, ensamble de componentes e instalación de dispositivos de medición.

Para la prueba de cada uno de los equipos se obtuvo muestras de distintos tipos de roca con diferente ubicación geográfica, de acuerdo a las especificaciones de la normatividad correspondiente para cada ensayo, con la finalidad, de poderlas analizar en los equipos y de esta manera determinar propiedades mecánicas tanto de discontinuidades cómo de la matriz rocosa. La preparación de muestras con geometría regular, se efectuó en las instalaciones de la Universidad Santo Tomás Seccional Tunja, las muestras de geometría irregular no requirieron de una

preparación, pero, si de una selección considerando que estas deben cumplir con ciertos condicionantes en lo referente a dimensiones estándares.

Por último, se dio la verificación de procedimiento de uso y funcionamiento de los equipos mediante ejecución de ensayos. Para ello en primer lugar, en el proceso de construcción, indispensablemente se tuvo que realizar pruebas sencillas y/o elementales, principalmente de espacios, para garantizar la correcta adecuación de las muestras, con la finalidad de no tener que realizar correcciones después de terminados. En segundo lugar, se llevaron a cabo los ensayos de tilt test y carga puntual, haciendo uso de los equipos contruidos y de las muestras obtenidas, con el propósito de verificar no solo el procedimiento de uso, sino también el funcionamiento de los equipos y al mismo tiempo determinar parámetros de las propiedades mecánicas de las rocas que se eligieron para estudiar y analizar.

5.3. MATERIALES

Los materiales usados para el desarrollo del proyecto de investigación, fueron empleados para la producción de los equipos. Se designaron conforme a consideraciones de diseño y según la disponibilidad de los materiales a nivel local. En la tabla 8 se indican los tipos de materiales usados para la construcción de elementos de los equipos. A su vez, en la tabla 9 se mencionan los dispositivos instalados en cada equipo. De manera detallada en el anexo 3 se encuentran especificados los materiales que se utilizaron según los componentes.

Tabla 8. Materiales usados en la construcción de los equipos

MATERIALES	ELEMENTOS DE LOS EQUIPOS
- Acero 4140 AISI	Vigas, parantes y otros
- Acero A36	Lámina, platinas y barras
- Acero Inoxidable 304	Lámina, barras, tornillería y otros
- Acero 1045	Barras
- Acero 1020	

- Soldadura	
- Pinturas anticorrosivas	
- Pinturas	
- Pintura electrostática	

Fuente: Autores

Tabla 9. Dispositivos importantes

DISPOSITIVO	EQUIPO
- Celda de carga	Carga Puntual
- Indicador de carga	Carga Puntual
- Regleta	Carga Puntual
- Goniómetro	Tilt test
- Motoreductor	Tilt Test

Fuente: Autores

5.4. EQUIPOS

5.4.1. Dispositivos electrónicos

- Computador: Este se usó para llevar a cabo actividades de investigación y consulta de información, a través de internet, diseño y modelado de equipos, también para compilar información para el desarrollo del libro.
- Cámara: Con el uso de esta se obtuvo registro fotográfico en actividades de fabricación de piezas para los equipos de tilt test y carga puntual, para obtener imágenes de las muestras para analizar y otras actividades correspondientes al proyecto.

5.4.2. Equipos, herramientas y dispositivos usados en la construcción de los equipos.

Se utilizaron diferentes equipos, máquinas y herramientas para la construcción de los equipos de tilt test y carga puntual, en la tabla 10 están nombrados, descritos e ilustrados algunos de los más importantes. Así mismo, se mencionan otros equipos o elementos complementarios

Tabla 10. Equipos usados.

Equipo	Descripción	Fotografía
Torno italiano mono	Equipo utilizado para la transformación de la materia prima, principalmente aceros. Por medio de este se fabricaron diferentes piezas para el equipo de tilt test y carga puntual. Se ejecutaron distintas actividades en relación a su función algunas de estas fueron: desbastar, roscar, cortar, perforar, adecuar piezas entre otras. Funciona por medio de electricidad.	 Tomada por: Autores Fecha: 08/06/2019
Equipo de soldadura Lincoln AC 225 AMP	Equipo utilizado para la unión de piezas metálicas, mediante técnicas especializadas y estandarizadas de fundición de soldadura. Funciona por medio de electricidad. Contiene extensiones para masa y también para el sistema portaelectrodo. Este tiene dispositivos complementarios de protección personal como la Careta que pueden ser electrónicas o pasivas.	 Fuente: https://www.linio.com.co/p/equipo-soldadura-lincoln-ac-225amp-jrmb6y

Taladro de árbol industrial 5/8" x 13"	Equipo utilizado para perforación de mayor precisión en diferentes materiales, funciona por medio de electricidad. Para la perforación en materiales metálicos se debe hacer uso de otros dispositivos conocidos técnicamente como brocas para aceros, estas se presentan de distintas dimensiones.	 Tomada por: Autores Fecha: 08/06/2019
Taladro de rotación industrial 1/2"	Equipo eléctrico de manipulación móvil, se usa para perforación en diferentes materiales. Solo se debe usar para la perforación de piezas con espesores y calibres mínimos. Requiere de uso de brocas.	 Tomada por: Autores Fecha: 08/06/2019

Pulidora industrial de 7"	Equipos eléctricos de manipulación móvil, se usan para diferentes labores dentro de las que se destaca: corte, desbaste, lijado, limpieza de materiales. Para la ejecución de dichas labores en aceros se requiere de dispositivos adicionales generalmente discos de corte, de pulir, de lijar o copas de grata apropiados para el material, los cuales van presentando desgaste.	 Tomada por: Autores Fecha: 08/06/2019
Pulidora de 4 1/2"		 Tomada por: Autores Fecha: 08/06/2019

Brocas para metal	Son elementos o dispositivos para perforación de materiales metálicos. Existen de diferentes tamaños, ya sean en pulgadas o milimétricas. Estas se usan en equipos como tornos, taladras de árbol y taladros móviles. Cabe aclarar que el tamaño de broca a usar en cada equipo depende de la capacidad del mismo.	 Tomada por: Autores Fecha: 08/06/2019
Buriles para Torno	Son elementos que se usan para distintos trabajos de torno, como corte, desbaste, roscado, entre otros. Estos se clasifican según la ISO (International Organization for Standardization) y DIN (Deutsches Institut für Normung), normas que especifican la función de cada uno, así como sus características. Se usaron buriles dependiendo a la pieza que se pretendía fabricar.	 Tomada por: Autores Fecha: 08/06/2019

Prensa de banco 5" (a) y presas tipo C de hierro nodular 3" (b)	La prensa de banco es un equipo mediante el cual se sujetan de elementos para algún arreglo. Las prensas tipo C se usan para sujetar elementos y/o apoyarlos en otros. Las prensas usadas fueron: prensa de banco de 5" y prensas C nodulares de 3",4",5" y 6"	Tomada por: Autores Fecha: 08/06/2019
Compresor de 100 lts 145 psi	Equipo eléctrico para aplicación de pinturas anticorrosivas y esmaltes. Requiere de componentes adicionales cómo manguera y pistola de pintura con distintos tipos de boquillas.	Fuente: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-525407538-compresor-120-libras-50-litros-psi-2-salidas-de-aire-JM#position=2&type=item&tracking_id=273b6907-b573-45a4-9775-2422e55732a0

OTROS EQUIPOS, HERRAMIENTAS Y DISPOSITIVOS USADOS	
• Llaves expansivas • Llaves combinadas en pulgadas • Llaves de tubos • Llaves Bristol • Machuelos rocadore de distintos diámetros y maneral para machuelo • Escuadras • Reglas de medición metálicas • Copas para tuercas • Rache para copas • Hombresolo • Alicates	• Martillo • Centro punto o granete • Limas en acero • Nivel de gota • Flexómetro • Calibrador pie de rey • Prensa hidráulica • Esmeril • Rectificadora matriz motor tool • Entre otros, propios para ejecutar labores metalmecánicas.

Fuente: Autores.

5.4.2. Equipos utilizados para obtención de muestras, adecuación y medición

Para la extracción de muestras se requirió del uso de equipos especializados, así mismo para su adecuación. Estos se encuentran ilustrados y descritos en la tabla 11.

Tabla 11. Equipos usados para extracción y adecuación de muestras.

Equipo	Descripción	Fotografía
Extractor de núcleos	Equipo utilizado para extraer núcleos de roca, también es usado para extraer núcleos de concreto y asfalto. Se obtuvieron núcleos de distintos tipos de rocas, las cuales fueron adecuadas según las especificaciones de los ensayos de tilt test y carga puntual.	 Tomada por: Autores Fecha: 16/07/2019

Cortadora de núcleos y/o muestras de roca	Con este equipó se adecuaron las muestras de roca según los ensayos a realizar. Generalmente se utiliza para cortar y adecuar muestras de roca, esta requiere de un disco diamantado.	 Tomada por: Autores Fecha: 28/07/2019
--	--	--

Fuente: Autores.

Otros equipos o elementos utilizados para obtención de muestras, adecuación y medición se nombran a continuación:

- Calibrador pie de rey
- Flexómetro
- Regla metálica
- Martillo
- Cincel
- Marcador

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

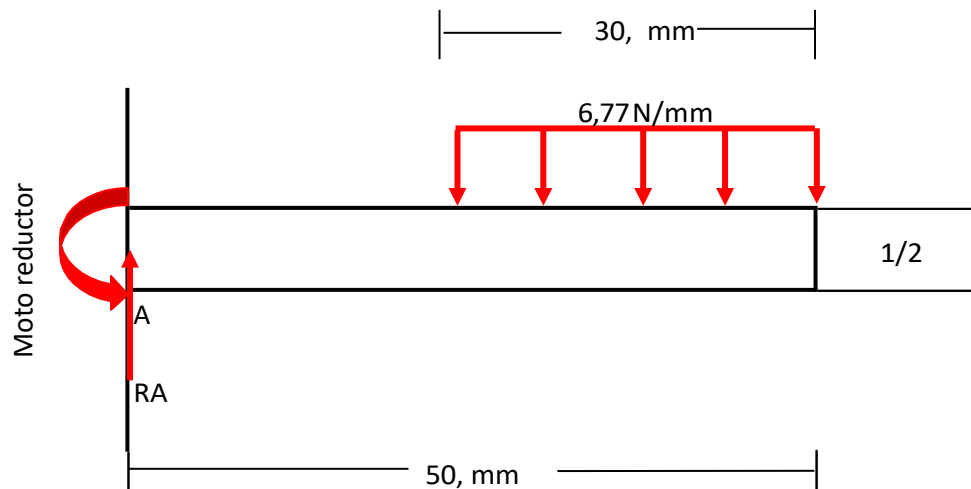
6.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE EQUIPOS

6.1.1. Diseño y construcción para equipo de tilt test

6.1.1.1. Diseño de equipo de tilt test

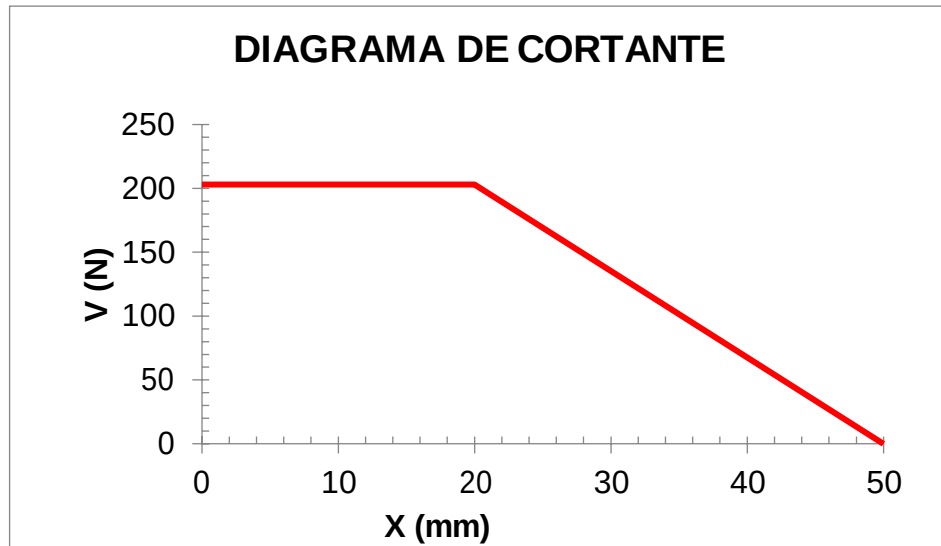
Para el diseño de este equipo solo se tiene en cuenta el diseño a cortante del eje que conecta el motoreductor con la plataforma de inclinación. En el diagrama de cuerpo libre (figura 13) se representan las sollicitaciones a las que el eje está expuesto. Seguido a esto se aprecia el diagrama a cortante a momento en la gráfica 1 y 2 respectivamente. La tabla 12 evidencia un resumen de los datos obtenidos de esfuerzo, deformaciones y factor de seguridad, con lo cuales quedó diseñado. Todos los cálculos correspondientes a este diseño se encuentran en el anexo 1.

Figura 13. Diagrama de cuerpo libre para eje del equipo de tilt test.



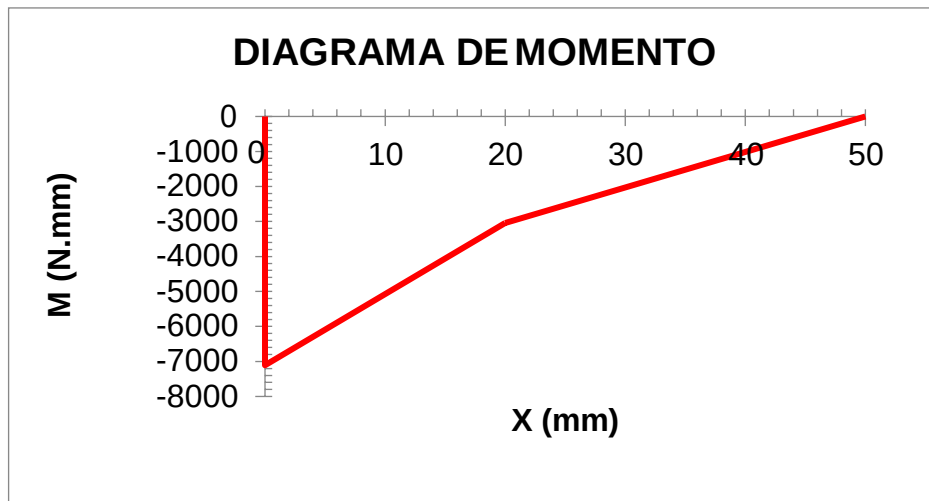
Fuente: Autores

Gráfica 1. Diagrama de cortante para el eje



Fuente: Autores

Gráfica 2. Diagrama de momento para el eje



Fuente: Autores

Tabla 12. Resultados para el diseño del eje.

ϕ	AREA EJE	τ	δ	Fs.
in	(mm ²)	(Mpa)	(mm)	
1/2	126,6768698	35,3	0,0331	1,94E+01

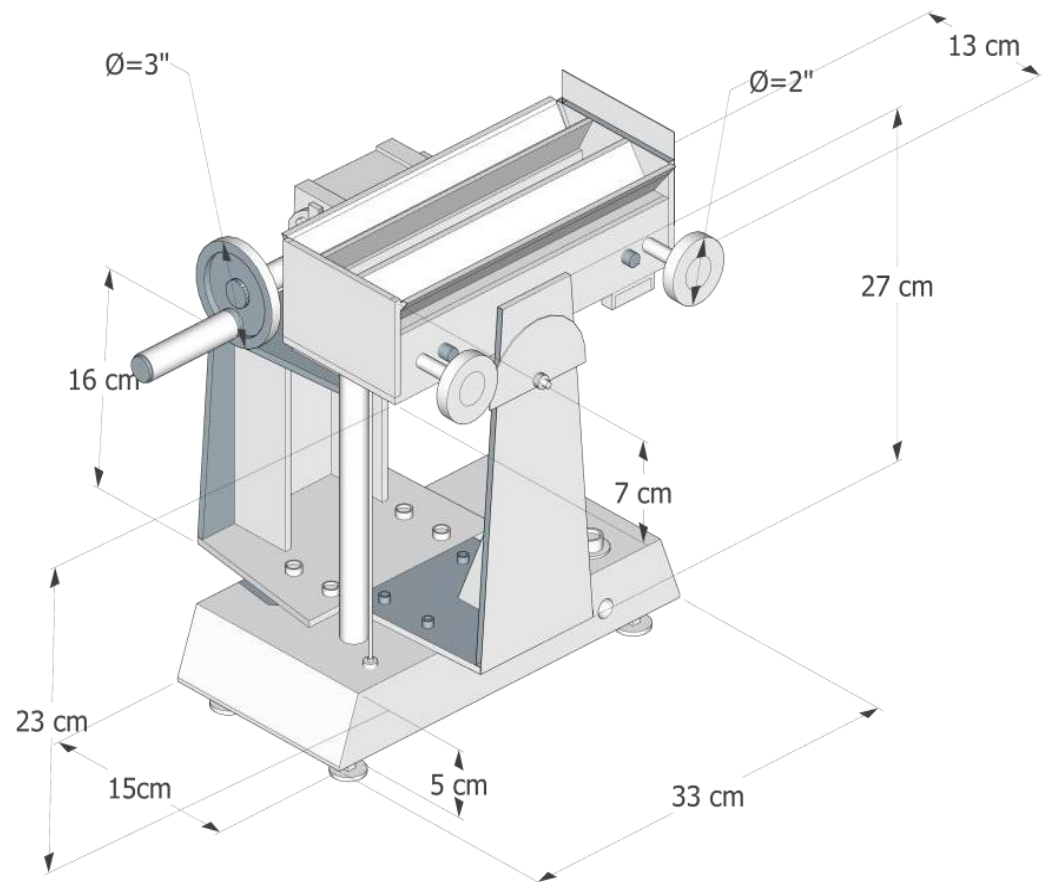
Fuente: Autores

Para el diseño del equipo de tilt test, cómo ya se mencionó solo se diseñó el eje a cortante que permite unir la plataforma de rotación y el motoreductor. Se consideró que era uno de los componentes que podría presentar mayores afectaciones, debido al peso del sistema de rotación y a los especímenes que puede soportar para las respectivas pruebas de inclinación. El sistema de rotación peso aproximadamente 10.7 Kg masa, a este se le adicionó un peso estimado de núcleos o especímenes de roca de mayor tamaño, de aproximadamente 10 Kg. La sumatoria de estos dos multiplicados por la gravedad nos permitió determinar la fuerza aplicada en aproximadamente 30 mm del eje, con lo cual se diseñó a cortante.

Con base en lo anterior, se diseñó el resto de equipo por medio de criterios propios ya que este no se somete a grandes sollicitaciones. Por ende, se decidió hacer uso de lámina A36 de espesor 4 mm para el soporte del motoreductor y el soporte del sistema de medición (goniómetro) y para la base se dispuso de un canal de 6" tipo americano, el cual fue adecuado con patas de nivelación. La precisión del goniómetro es de ± 1 grado. El sistema de nivelación consta de un ojo de pollo en la base para nivelar el equipo y un nivel de gota tubular en la plataforma de inclinación para calibrar el equipo con el goniómetro.

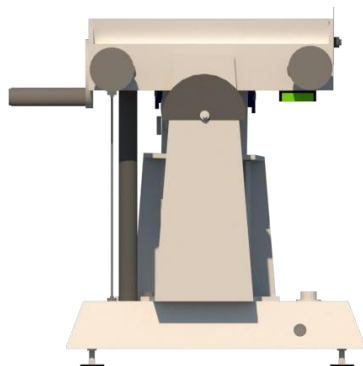
Se realizaron render del equipo en programas cómo AutoCAD®, ARCHICAD®, en los equipos de cómputo que se encuentran en los espacios académicos de la Universidad Santo Tomás - Tunja y que cuentan con la licencia para su uso, esto con la finalidad de tener una aproximación clara de dimensionamiento. El modelo que se generó tiene las dimensiones mostradas en la figura 14. De la figura 15 a la figura 18 se muestran algunas vistas del render generado para el equipo.

Figura 14. Dimensiones generales equipo Tilt Test en vista 3D.



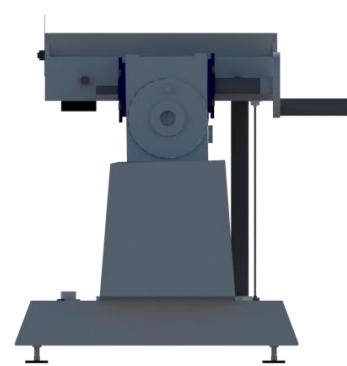
Fuente: Autores

Figura 15. Vista frontal equipo de Tilt Test.



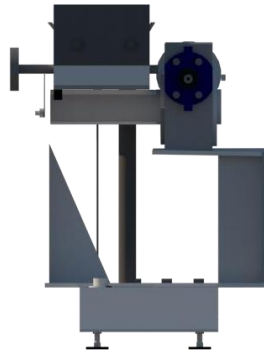
Fuente: Autores

Figura 16. Vista posterior equipo Tilt test.



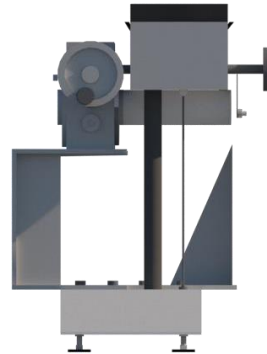
Fuente: Autores

Figura 17. Vista lateral derecha equipo carga puntual.



Fuente: Autores

Figura 18. Vista lateral izquierda equipo carga puntual.



Fuente: Autores

6.1.1.2. Construcción equipo de tilt test

La construcción del equipo de tilt test se llevó a cabo con base al diseño establecido, siguiendo especificaciones. Esta se realizó en las instalaciones de la empresa ROYMEN INGENIERIA de la ciudad de Tunja, la cual cuenta con los equipos y personal especializado para realizar labores metalmecánicas. En el anexo 1 se ilustra a nivel general los componentes del equipo y se describen algunas actividades realizadas para la construcción, igualmente se encuentra un registro fotográfico. En la fotografía 3, se observa el equipo construido.

Fotografía 3. Equipo de tilt test.



Fuente: Autores
Fecha: 07/16/2019

En el proceso de construcción del equipo de tilt test no se presentó ningún tipo de inconveniente. Este se elaboró teniendo en cuenta las consideraciones y especificaciones del diseño, también aplicando técnicas prácticas concernientes al sector metalmecánico. Todo esto fue posible gracias a los aportes económicos de la empresa ROYMEN INGENIERIA de la ciudad de Tunja, que a su vez adecuó una de sus instalaciones y permitió disponer de máquinas, equipos y herramientas para la fabricación del equipo. Es importante resaltar que sin la disponibilidad de los recursos ya mencionados y del personal calificado que puso a nuestra disposición la empresa ROYMEN INGENIERIA, solo se hubiese llegado a la fase de diseño y en consecuencia se tendría que implementar otras alternativas de fabricación.

6.1.1.3. Diseño de equipo de carga puntual

El diseño del equipo de carga puntual se lleva a cabo aplicando consideraciones de diseño en las que se tienen en cuenta aspectos de tipo técnico, económicos y de calidad. En relación a esto se aplicaron teorías de equilibrio, esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad. El equipo principalmente cuenta con tres sistemas: sistema de carga, sistema de medición de carga y sistema de medición de distancia entre puntas, según lo especificado por la ASTM D5731-16.

- Diseño hidráulico:

Tabla 13. Resultados para diseño sistema hidráulico equipo de carga puntual.

SISTEMA HIDRÁULICO				
ϕ interno	Área interna	Presión de trabajo		capacidad
mm	mm ²	(Psi)	(Kg/cm ²)	(T)
101,6	8107,3	5000	350	28,4
Fuerza de diseño aplicada		T	10	100%
		N	98066,25	

Fuente: Autores

Para el sistema hidráulico (tabla 13), se diseñó la botella hidráulica de diámetro interno de 4" o 101.6 mm. El área y la presión de trabajo permiten

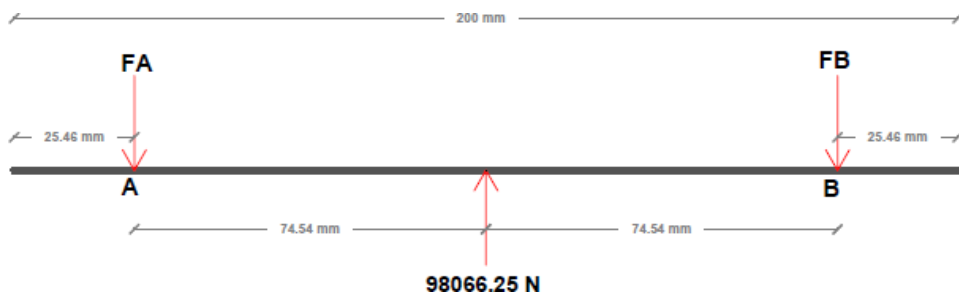
aplicar fuerzas hasta de 28,4 toneladas. Sin embargo, para el diseño de los demás componentes esta fuerza no se tendrá en cuenta, se trabajará con la capacidad de la bomba hidráulica manual que es de 10 T, con la cual se le inyectará hidráulico a la botella para que esta ejerza fuerza sobre los especímenes de roca a analizar. Los cálculos del diseño de la botella como especificaciones de la bomba se muestran en el anexo 2.

- Diseño marco de carga

Con la capacidad definida del sistema hidráulico que hace parte del sistema de carga se procede a analizar elementos que inicialmente se definieron en aceros AISI 4140 que son idóneos para la fabricación de maquinaria, INOX 304 Y A36. Inicialmente se realizó el diseño de la viga superior, el diagrama de cuerpo libre de la viga se representa en la figura 19. Con base a esto, se obtuvo el diagrama de cortante (gráfica 3) y momento (gráfica 4). Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 14.

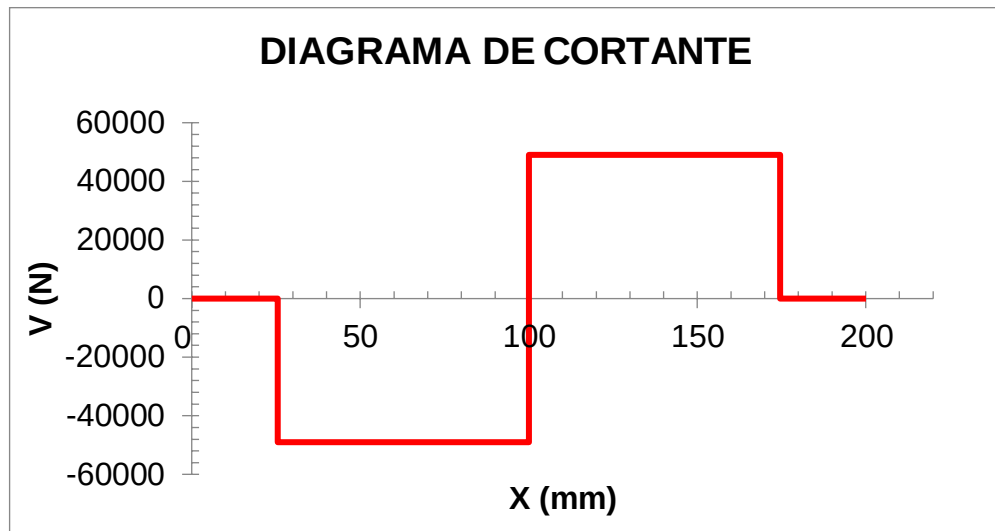
Para esta se determinaron esfuerzos y otros componentes encontrados en el anexo 2.

Figura 19. Diagrama de cuerpo libre de viga superior.



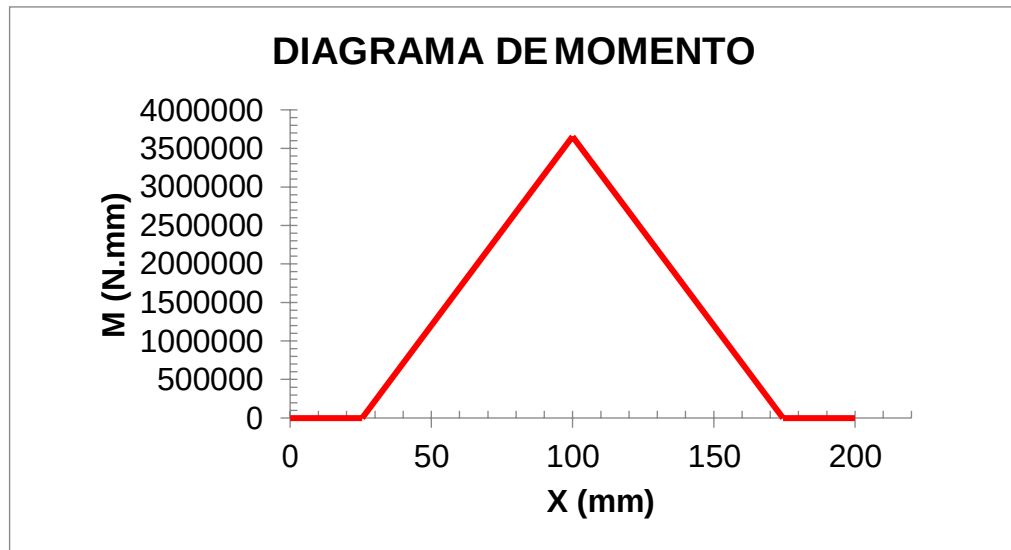
Fuente: Autores

Gráfica 3. Diagrama de cortante viga superior del marco de carga.



Fuente autores

Gráfica 4. Diagrama de momentos viga superior marco de carga.



Fuente: Autores

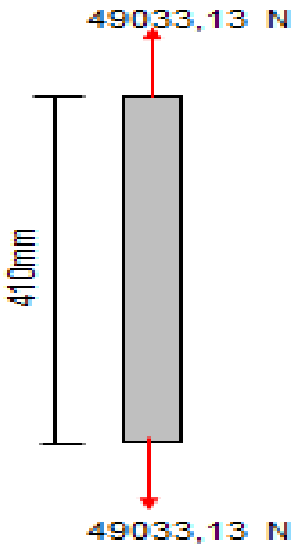
Tabla 14. Resultados de diseño de la viga superior.

VIGA SUPERIOR MARCO DE CARGA AISI 4140			
M max	δ (mm)	σ	F.S.
(N.mm)	(mm)	(Mpa)	
3654807	0,159	342,6	2,0

Fuente: Autores

La figura 20 tiene representado las reacciones que causan un esfuerzo a tracción en cada uno de los parantes del marco de carga, trabajando a la máxima capacidad de diseño (10 T).

Figura 20. Parantes marco de carga.



Fuente: Autores

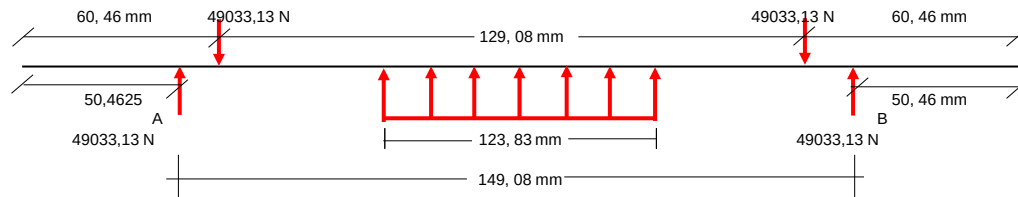
Tabla 15. Resultados de diseño de parantes.

PARANTES MARCO DE CARGA AISI 4140				
Φ	Área	Δl	σ	f.s.
In	(mm2)	mm	Mpa	
1,375	957,99	0,104925	51,18313	13,4

Fuente: Autores

Cómo se puede observar en la tabla 15 el diferencial de longitud y el esfuerzo son bajos, en relación a esto el factor de seguridad aumenta. Lo que evidencia que estos no fallarían a tracción. Con lo que respecta al diseño de la viga inferior del marco de carga se desarrolló el mismo procedimiento de la viga superior, determinando las fuerzas a las que se somete (figura 21) cuando el sistema se carga.

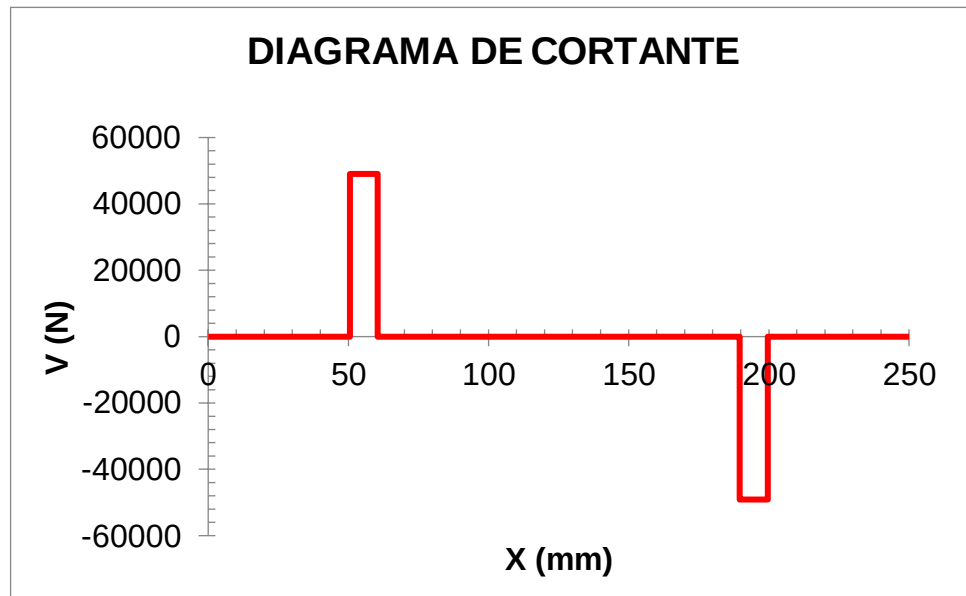
Figura 21. Diagrama de cuerpo libre para viga inferior.



Fuente: Autores

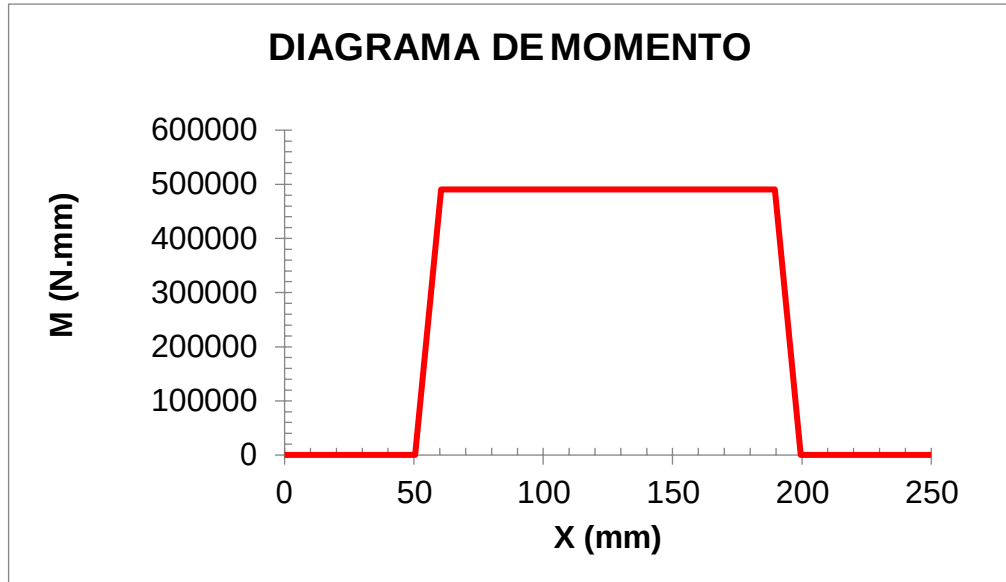
Según las fuerzas que se ejercen al cargar el sistema, generan un comportamiento que se representa en el diagrama de cortante (gráfica 5) y momento (gráfica 6). Los cuales son base para determinar deflexión y el esfuerzo al que este se somete (tabla 16).

Gráfica 5. Diagrama de cortante viga inferior del marco de carga.



Fuente: Autores

Gráfica 6. Diagrama de momentos viga inferior marco de carga.



Fuente: Autores

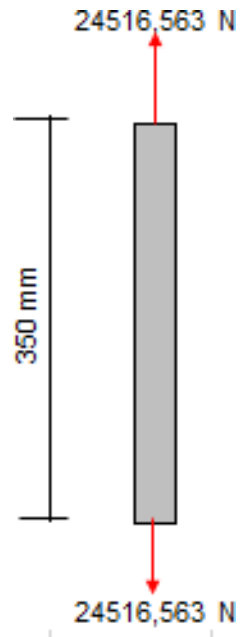
Tabla 16. Resultados de diseño de viga inferior.

VIGA INFERIOR MARCO DE CARGA A36		
M max	δ (mm)	σ
(N.mm)	(mm)	(Mpa)
490331,3	0	3,4

Fuente: Autores

Para el caso de los tensores se determinó el esfuerzo con base al diagrama representado en la figura 22 y los resultados de diseño en la tabla 17. Por otra parte, en el anexo 2 se encuentra de manera específica los resultados para este diseño.

Figura 22. Diagrama de cuerpo libre de los tensores.



Fuente: Autores

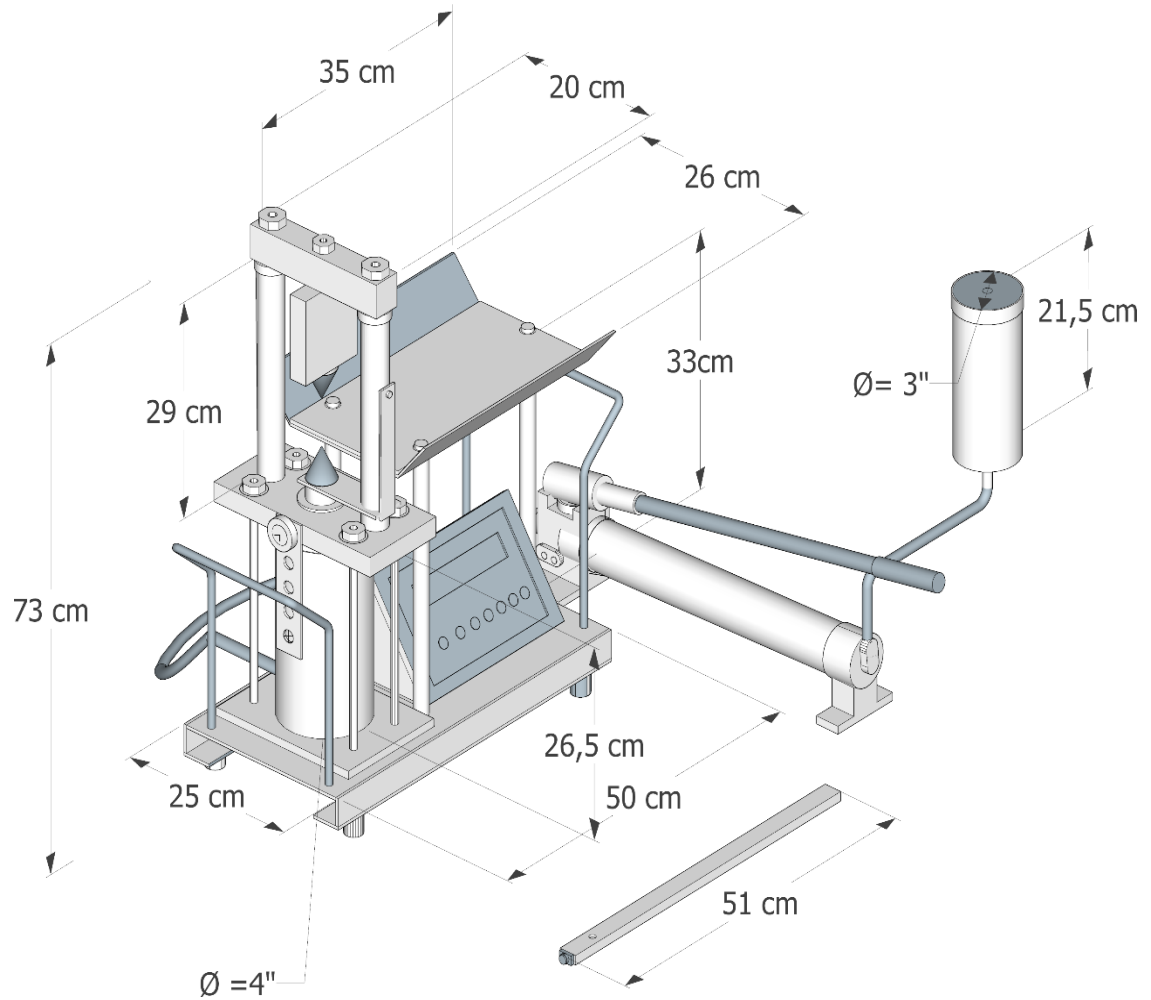
Tabla 17. Resultados de diseño de tensores.

TENSORES INOX 304				
φ	Área	Δl	σ	f.s.
in	(mm ²)	Mm	Mpa	
5/8	197,93	0,22	123,86	5,54

Fuente: Autores

Se realizaron los render del equipo en programas cómo AutoCAD®, ARCHICAD®, en los equipos de cómputo que se encuentran en los espacios académicos de la Universidad Santo Tomás - Tunja y que cuentan con la licencia para su uso, esto con la finalidad de tener una aproximación clara de dimensionamiento. El modelo que se generó tiene las dimensiones mostradas en la figura 23. De la figura 24 a la figura 27 se muestran algunas vistas del render generado para el equipo.

Figura 23. Dimensiones generales equipo carga puntual en vista 3D.



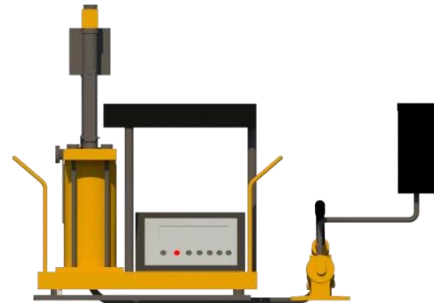
Fuente: Autores

Figura 24. Vista modelo 3D equipo de carga puntual.



Fuente: Autores

Figura 25. Vista frontal equipo carga puntual.



Fuente: Autores

Figura 26. Vista lateral derecha equipo carga puntual.



Fuente: Autores

Figura 27. Vista lateral izquierda equipo carga puntual.



Fuente: Autores

6.1.1.4. Construcción equipo de carga puntual

La construcción de este equipo también se ejecutó en las instalaciones de las empresas ROYMEN INGENIERIA. Para este equipo la empresa también aportó económicamente y permitió disponer de personal calificado, así como también de máquinas, equipos y herramientas. En el anexo 2 se observan los componentes del equipo y actividades de construcción con su correspondiente descripción. El producto final se aprecia en la fotografía 4.

Fotografía 4. Equipo de carga puntual.



Fuente: Autores

Fecha: 30/09/2019

En el proceso de construcción del equipo de carga puntual fue necesario implementar técnicas más especializadas, ya que este requirió de la fabricación de elementos adicionales del sistema de carga, más exactamente para la botella hidráulica lo cual tomó más tiempo de lo esperado. El equipo se diseñó para 10T de carga aproximadamente, sin embargo, por motivos económicos se instaló un sistema de medición de 5T.

Se diseñaron los componentes o elementos que se ven afectados al aplicar la carga de diseño 10 T, con esta carga los elementos presentan un buen comportamiento arrojando factores de seguridad favorables ya que se encuentran sobre 1 que es el valor óptimo. Por su parte la viga superior fabricada en acero AISI 4140 del marco de carga presenta un factor de seguridad 2.0, los parantes fabricados en el mismo material 13,4 y los tensores inferiores 5,54. Sin embargo, a pesar de que estos valores se encuentran sobre el valor óptimo, se podrían cambiar por unos que presenten menores secciones transversales. En cuanto a la viga inferior del marco de carga esta no se deforma por los bajos esfuerzos a flexión a los que se somete, su trabajo principalmente se da a cortante, ya que al aplicar la fuerza a los especímenes los parantes trabajan a tensión activando una fuerza restrictiva en los tensores inferiores, donde las solicitaciones generadas por estos elementos someten a la platina a esfuerzos cortantes.

Con respecto a las consideraciones técnicas se diseña el equipo de carga puntual de acuerdo a lo estipulado por la norma ASTM D5731 de 2016, donde se especifica que como mínimo el equipo debe contar con un sistema de carga, sistema de medición de carga y sistema de medición entre puntas. En relación a lo anterior se diseñan los equipos con un menor costo, con materiales de calidad y con recursos disponibles a nivel local. En el anexo 3, se muestra el presupuesto del equipo y cotizaciones de algunos distribuidores en Colombia. A su vez, se garantizan otras consideraciones como transportabilidad, seguridad, funcionalidad, confiabilidad, estilo, forma, entre otras, que permiten que el equipo se pueda usar en campo y en laboratorio. Por la falta de recursos económicos se decide implementar un sistema

de carga de celda de 5T e indicador, sin embargo, la estructura del equipo permite la adecuación de otro tipo de dispositivos con más capacidad, pueden ser celdas de 7.5T, 10T o sensores de presión de las capacidades ya mencionadas.

6.2. FICHA TÉCNICA, MANUAL DE OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS Y GUÍA PARA REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS.

6.2.1. Ficha técnica equipo de tilt test

Este documento se emite para brindar la información necesaria sobre el equipo de tilt test, tanto para el personal que lo opere cómo para particulares, con la finalidad de que se tenga precaución y se use de acuerdo a su propósito. La ficha técnica del equipo de tilt test está compuesta por la descripción de características cómo: Peso, espacio que ocupa, capacidad de medición, tipo de funcionamiento y fabricantes. Por otra parte, se especifica la función para la cual se elaboró, también se indican el conjunto de elementos de seguridad con los que debe contar el operario (ver tabla 18).

Tabla 18. Ficha técnica del equipo de tilt test.

FICHA TÉCNICA DE EQUIPO				
NOMBRE DEL EQUIPO:		TILT TEST		
DIMENSIONES			PESO	
ANCHO	LARGO	ALTO		
25 cm	35 cm	37 cm	23,5 Kg	
FABRICANTES:				
Ing. Civil José Rodrigo Méndez Z. Est. Ing Civil Cesar Estiben Gaona G. Est. Ing Civil Edwin Fernando Rodríguez Q.				
FUNCIONAMINETO:		INCLINACIÓN MAXIMA:		
Manual - Mecánico		0° - 90°		
FUNCIÓN - USO		Permite determinar el ángulo de fricción básico, parámetro para estimar el coeficiente de rugosidad de la junta (JRC), y a su vez la resistencia al corte en discontinuidades.		
ELEMENTOS DE PROTECCIÓN				
				

Fuente: Autores

6.2.2. Manual de operación equipo de tilt test

El manual de operación del equipo de tilt test, tiene especificado los elementos de seguridad que se deben usar para su operación, a su vez también cuenta instrucciones de adecuación del equipo para realizar las pruebas y por último con indicaciones del desarrollo o ejecución de la prueba y toma de datos. Este se adjunta en medio digital y corresponde al anexo 4.

6.2.3. Guía de ensayo de tilt test

Esta guía se encuentra en el anexo 4 y consta de objeto, importancia y uso, equipos a usar, muestreo, procedimiento y cálculos.

6.2.4. Ficha técnica equipo de carga puntual

Este documento se emite para brindar la información necesaria sobre el equipo de carga puntual, tanto para el personal que lo opere cómo para particulares, con la finalidad de que se tenga precaución y se use para de acuerdo a su propósito. La ficha técnica del equipo de carga puntual está compuesta por la descripción de características cómo: peso, espacio que ocupa, capacidad de medición, tipo de funcionamiento y fabricantes. Por otra parte, se especifica la función para la cual se elaboró, también se indican el conjunto de elementos de seguridad con los que debe contar el operario (ver tabla 19).

Tabla 19. Ficha técnica para el equipo de carga puntual.

FICHA TÉCNICA DE EQUIPO				
NOMBRE DEL EQUIPO:		CARGA PUNTUAL		
DIMENSIONES			PESO	
ANCHO	LARGO	ALTO		
25 cm	80 cm	75 cm	59,40 Kg	
FABRICANTES:				
Ing. Civil José Rodrigo Méndez Z. Est. Ing Civil Cesar Estiben Gaona G. Est. Ing Civil Edwin Fernando Rodríguez Q.				
FUNCIONAMINETO:		CARGA MAXIMA:		
Hidráulico		4.800 Kg		
FUNCIÓN - USO		Permite determinar el índice de resistencia a carga puntual, el cual se puede correlacionar para obtener la propiedad mecánica de resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa.		
ELEMENTOS DE PROTECCIÓN				
 USE TAPABOCAS	 USE GAFAS	 USE GUANTES	 USE BOTAS	

Fuente: Autores

6.2.5. Manual de operación equipo de carga puntual

Para el equipo de carga puntual se realizó un manual de operación, en el que se puede identificar los elementos de seguridad que se deben usar para su operación, también, precauciones, verificaciones iniciales, procedimiento de operación y toma de datos en la ejecución de las pruebas. Este se adjunta en medio digital y corresponde al anexo 5.

6.2.6. Guía de ensayo de carga puntual

Esta guía se encuentra en el anexo 5 y consta de objeto, importancia y uso, equipos a usar, muestreo, procedimiento y cálculos.

6.3. VERIFICACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS.

6.3.1. Obtención de muestras

Inicialmente se obtuvieron rocas de ubicación geográfica diferente, de las cuales se extrajeron las muestras con geometría cilíndrica (núcleos). Por otro lado, se consiguieron fragmentos irregulares y bloques de roca de juntas de la cantera Piedra Gorda ubicada en la vía que conduce de Tunja a Villa de Leyva. Los núcleos y los bloques se adecuaron de tal manera que en ambos casos se cumpliera con condicionantes de geometría. A continuación, en la tabla 20, se indica la numeración para identificar las rocas en el cuerpo del trabajo, el tipo de roca y las muestras obtenidas.

Tabla 20. Número de identificación roca, tipos de roca y muestras para ensayos.

ROCA	TIPO DE ROCA	TIPO DE MUESTRA
1	Arenisca	Núcleos
2	Pórfido granítico	Núcleos
3	Mármol	Núcleos
4	Brecha	Núcleos
5	Caliza	Núcleos
6	Arenisca	Núcleos
7	Arenisca	Núcleos
8	Limolita	Bloques
9	Limolita	Bloques
9	Limolita	F.I. roca sana
10	Limolita	F.I. roca meteorizada

Fuente: Autores

En la tabla 21, con base en el registro fotográfico se presenta el procedimiento de obtención de muestras núcleo, bloques y fragmentos irregulares de roca. La

procedencia de las rocas de las que se extrajeron los núcleos no es clara por ende se especifica que son de distinta ubicación geográfica.

Tabla 21. Procesos de extracción y adecuación de núcleos, bloques y fragmentos irregulares de roca.

Procesos de extracción y adecuación de Núcleos	
a) Obtención de las rocas	b) Extracción de muestras
 Fuente: Autores Fecha: 15/07/2019	 Fuente: Autores Fecha: 16/07/2019
c) Adecuación de muestras	Núcleos de roca
 Fuente: Autores Fecha: 28/07/2019	 Fuente: Autores Fecha: 28/07/2019

Procesos de extracción y adecuación bloques	
a) Ubicación de macizo rocoso	b) Extracción de muestras
 Fuente: Autores Fecha: 01/08/2019	 Fuente: Autores Fecha: 01/08/2019
c) Adecuación de muestras	Bloque de roca
 Fuente: Autores Fecha: 02/08/2019	 Fuente: Autores Fecha: 02/08/2019
Procesos obtención de fragmentos de geometría irregular	
a) Ubicación de macizo rocoso	b) Extracción de muestras
 Fuente: Autores Fecha: 01/08/2019	 Fuente: Autores Fecha: 01/08/2019

c) Selección de fragmentos de geometría irregular



Fuente: Autores
Fecha: 01/08/2019

Fuente: Autores

6.3.2. Ensayos de tilt test

6.3.2.1. Ensayo en núcleos de roca

En la tabla 22, se puede apreciar algunas actividades para el desarrollo del ensayo de tilt test en varias rocas, se inicia por la selección de núcleos representativos los cuales son medidos y analizados mediante pruebas inclinación. En el anexo 6 están representadas las dimensiones de cada núcleo y las velocidades de rotación y resultados de ángulo de fricción básico.

Tabla 22. Ejecución de ensayos de tilt test en núcleos de roca (Roca 1-7).

Ejecución de ensayos de tilt test en núcleos de roca		
Núcleos	Dimensiones	Ensayo de Tilt test
 Fuente: Autores Fecha: 02/08/2019	 Fuente: Autores Fecha: 02/08/2019	 Fuente: Autores Fecha: 02/08/2019
Otras fotografías relacionadas		
 Fuente: Autores Fecha: 02/08/2019	 Fuente: Autores Fecha: 02/08/2019	 Fuente: Autores Fecha: 02/08/2019

Fuente: Autores

En la tabla 23 se observan los resultados obtenidos para las muestras analizadas en este ensayo. Los resultados de manera detallada se observan en el anexo 6.

Tabla 23. Resultados obtenidos para diferentes tipos de roca en el ensayo de tilt test.

RESULTADO ENSAYO TILT TEST					
N°	ROCA	MUESTRA	L	VELOCIDAD	Φ_b
			(cm)	(°/min)	(°)
1	Arenisca	N	10,07	10,35	37,1
2	Pórfido Granítico	N	8,81	12,8	29,4
3	Mármol	N	9,93	18,87	34,9
4	Brecha	N	7,78	12,17	32
5	Caliza	N	9,90	9,99	35,6
6	Arenisca	N	9,51	9,34	30,2
7	Arenisca	N	9,76	12,9	38,5
8	Limolita	B	14,87	16,15	32,4
9	Limolita	B	14,45	14,09	38,2
N: NÚCLEO	B: BLOQUE	F.I: FRAGMENTO IRREGULAR "ROCA SANA Ó METEORIZADA			

Fuente: Autores

Para la roca 1 se obtuvo un ángulo de fricción básico de 37,1 con una velocidad promedio general de 10.35 °/min. En los ángulos de inclinación se observa una variación de más o menos 3 grados en cada serie tomando cómo referencia el ángulo más alto y el más bajo. Sin embargo, en los ángulos de fricción básicos obtenidos por cada serie la variación es de aproximadamente 1.4° que corresponde a un error de 3,77%. En el caso de la roca 2, el ángulo de fricción básico que se determinó que es de 29.4°, este resultado no es muy confiable debido a que la longitud para la realización del ensayo de tilt test no cumplía por aproximadamente 12 mm.

En la roca 3 se trabajó una velocidad de 18.87 °/min en promedio la cual se acerca a la máxima permitida para equipos manuales que es de 20°/min. Las variaciones de los ángulos de fricción básicos de cada serie, presentan más o menos una diferencia de 1.5° que corresponden al 4,29% de alteración. Esto en consecuencia

de la variación de los ángulos de inclinación, en donde se identifica que la máxima variación fue de 3°. En el caso de la roca 4 la variación en los ángulos de inclinación fue de 2°, lo que genera aproximadamente un error general de 3.75%. Pero en relación a las dimensiones para el ensayo el ángulo de fricción básico de 32° para esta roca no es verídico ya que las dimensiones longitudinales de los especímenes no cumplían.

Para la roca 5 se observa un mejor comportamiento en la obtención de los ángulos de inclinación, aunque el comportamiento por cada serie tuvo mejor control en los ángulos de fricción básico. Se evidencia una diferencia significativa entre la serie 4 y la serie 5 de aproximadamente 2.7°, lo que concibe un error en el ángulo de fricción para la roca de aproximadamente 7.6%. Esto se observa en el anexo 6 sobre los datos obtenidos para esta roca. En la roca 6 a pesar de que las distancias longitudinales no cumplen con la condicionante de la norma, el resultado del ángulo de fricción básico puede llegar a ser confiable. Sin embargo, tomando el valor más alto y más bajo en relación de los ángulos de fricción de las series la ponderación general tiene error de 4.3% que hace referencia a más o menos 1.3°.

Para la roca 7 la longitud promedio de los especímenes se acerca a la requerida por la norma del ensayo. Por ende, el resultado del ángulo de fricción de la roca no varía en relación o a esta condicionante, pero si en relación a los ángulos de inclinación obtenidos, ya que se dieron valores diferentes y el ángulo de fricción tiene una diferencia con el menor de las series de 0.7°, aproximadamente esto representa un error de 1.81%. Los bloques de roca 8 y 9 son de la misma procedencia. Se extrajeron exactamente de la cantera piedra gorda de la ciudad de Tunja y se analizaron dos pares de estos para determinar un rango del ángulo de fricción básico de roca sana, en los que se trabajaron aproximadamente las mismas longitudes.

Para los especímenes en bloque las velocidades presentaron una diferencia considerable de aproximadamente 2°/min, también se presenta una diferencia en los ángulos de fricción generales de cada prueba de 5.8°. Estas diferencias se

presentan debido a que la rugosidad de las muestras no es la misma, esta no se determinó, pero a simple vista se pudo apreciar que los bloques de la muestra 9 presentaban más rugosidad que la roca 8. Los anteriores resultados expuestos en este análisis se pueden observar en el anexo 6, el cual contiene el dimensionamiento de cada uno de los especímenes analizados, así como las velocidades, ángulos de inclinación y los ángulos de fricción básicos obtenidos.

De la información consultada se encontraron unas compilaciones de investigaciones en las que se ha determinado el ángulo de fricción básico para distintas rocas, comparando los resultados de las rocas analizadas. En este proyecto se tiene que las rocas 1,6 y 7 que corresponden a areniscas se encuentran dentro del rango de 30° a 50° . En el mismo contexto se tiene la roca caliza (5) la cual tuvo un ángulo de fricción básico de 35° , esta se encuentra en el inicio del rango para las rocas calizas, las cuales están entre 35° a 50° . Las muestras de roca Limolita que se estudiaron no se encuentran dentro de los rangos investigados (27° - 31°), pero estos corresponden a investigaciones que no muestran un margen de error confiable. De las otras rocas analizadas no se tiene información confiable, por ende, se analizaron los resultados obtenidos por cada uno.

6.3.3. Ensayo de carga puntual

En la tabla 24 se resumen los resultados obtenidos para el índice de resistencia de la roca en diferentes rocas analizadas. En el anexo 7, se encuentran los resultados de manera específica.

Tabla 24. Resultados obtenidos para diferentes tipos de roca en el ensayo de carga puntual.

RESULTADO ENSAYO CARGA PUNTUAL				
N°	ROCA	MUESTRA	Is (50) Mpa	σ_c Mpa
1	ARENISCA	N	0,815	18,74
4	PORFIDO GRANITICO	N	3,25	74,75
5	CALIZA	N	6,27	144,2
7	ARENISCA	N	0,955	21,96
10	LIMOLITA	F.I. SANA	4,19	96,37
11	LIMOLITA	F.I METEORIZADA	0,81	18,63
N: NÚCLEO	B: BLOQUE	F.I: FRAGMENTO IRREGULAR "ROCA SANA Ó METEORIZADA"		

Fuente: Autor

Para la roca tipo arenisca se obtuvo valores de Is_{50} de 0,815 y 0,955, según esto el índice de resistencia a carga puntual del espécimen cuando se falla paralelo a los planos de debilidad se obtiene un índice de carga mayor, que al aplicarla perpendicular a estos. En el momento de realizar los ensayos, se procede de dos maneras, cargando la roca paralela a los planos de debilidad o perpendicular a estos. Donde para este caso no se registra una gran diferencia en los datos obtenidos, es decir que la roca soporta de igual manera el esfuerzo que se le aplica. Otra observación es que esta roca puede soportar un porcentaje más elevado de esfuerzo si se carga perpendicular a los planos de debilidad de la misma.

De la roca tipo granito, se fallaron tres núcleos de la misma manera donde uno de los datos es bastante elevado de más de 50% en comparación con el índice de carga puntual que presenta los otros dos núcleos ensayados. Por esta razón, se descarta este valor debido a posibles fallas técnicas al momento de realizar el ensayo P4₂, para verificar este análisis observar el anexo 7. Para la roca caliza se

realizaron cuatro ensayos, donde el valor máximo es de una de las muestras falladas paralelas a los planos de debilidad ($P5_2$). Se observó que el núcleo $P5_1$ falla de la misma manera que el $P5_2$, pero es el valor más bajo soportado por esta roca, lo que indica que esta puede fallar antes de ser cargada.

Para los fragmentos irregulares se muestra que hay una uniformidad en los datos obtenidos de las muestras falladas paralelas a los planos de debilidad de la misma, en cambio las rocas falladas perpendicular a los planos de debilidad varían los valores. Es decir, que algunas muestras por su configuración interna pueden soportar un poco más de carga. La roca 11 por su parte arroja valores de carga muy bajos (0.81), debido a que ha estado sometida a procesos de meteorización avanzada. Por esta razón, en algunos casos la muestra falla por partes, por lo cual no se puede contar con un valor confiable en algunos ensayos de esta serie.

De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada, las rocas areniscas no se encuentran dentro de los rangos, uno de ellos especifica que la resistencia a la compresión simple de esta roca debe estar entre 50 y 150 MPa y otro entre 29 y 230 MPa. Para el caso de la roca caliza se determina que esta cumple con la resistencia al encontrarse dentro del rango de 50 a 200 MPa. La roca Limolita sana presenta un valor de 96,37 MPa, donde en comparación con la muestra meteorizada se observa una diferencia de 77.74 MPa. Esto indica que la roca al estar sometida a procesos de meteorización, pierde resistencia. No se encontraron datos comparativos para la roca pórfido granítica, resaltando que esta presentó una buena resistencia frente a las otras rocas analizadas.

CONCLUSIONES

- Los diseños de los equipos de tilt test y carga puntual se realizaron teniendo en cuenta principalmente las normas correspondientes a sus ensayos, en las que se nombran y se describen los sistemas con los que debe contar el equipo y a su vez aquellas que contienen las especificaciones técnicas de los materiales seleccionados. De tal manera que se generará un modelo para cada equipo, que fuese óptimo, que cumpliera con estándares de calidad y que se lograra fabricar a un menor costo, lo cual se cumplió. Los diseños realizados arrojaron unos factores de seguridad superiores al óptimo que es de 1, por lo cual se puede decir que los equipos son seguros no presentar ningún tipo de falla.
- En el proceso de construcción es fundamental la aplicación de técnicas de control de calidad de las actividades de corte, perforación, máquinado en torno, pintura y ensamble, entre otras, de modo que se cumpla con especificaciones de diseños. Los equipos, máquinas y herramientas, así como las instalaciones y personal calificado para la construcción de los equipos, son muy importantes ya que, contando con el espacio, equipamientos y personal idóneo, se pueden ejecutar mejor las actividades y el rendimiento es mayor.
- En el proceso constructivo por cuestiones económicas fue necesario cambiar el sensor de presión de 10T por una celda de 5T, sin embargo, a la estructura del equipo no se le hizo ningún cambio por consiguiente esta celda se puede reemplazada por el sensor cuando se tengan los recursos. Por ahora el equipo está trabajando aproximadamente al 50% de su capacidad
- Con la emisión de documentos como la ficha técnica, manual de operación del equipo y la guía del ensayo, se evita un inadecuado uso de los equipos, así como también una mala ejecución de los ensayos. Si estos documentos no se generaran los operadores podrían cometer errores lo que puede generar una alteración en la obtención de datos, o viéndolo desde otra perspectiva se pueden presentar daños y/o accidentes.

- A partir de la realización de los ensayos se afirma que los equipos trabajaron de una manera óptima. A través de estos se obtuvieron datos que fueron procesados para obtener el ángulo de fricción básico y el índice de resistencia a carga puntual que es correlacionable con resistencia a la compresión simple. Las rocas analizadas fueron: Areniscas, limonitas, mármol, pórfido granítico, brecha y caliza. Algunos de los resultados de estas se pudieron comparar con compilaciones históricas de la información que se consultó, para lo cual se determinó que los resultados se encontraban dentro de los rangos mostrados en las compilaciones.
- Con el diseño y construcción de estos equipos de tilt test y carga puntual se genera inicialmente un aporte al desarrollo o producción de equipos localmente para diferentes disciplinas. En segundo lugar, se contribuye al fortalecimiento del conocimiento tanto teórico como práctico a nivel educativo y profesional en lo que respecta a estudios de la mecánica de rocas.
- Con la generación de este tipo de proyectos se pretende impulsar la investigación en la Universidad Santo Tomás, de manera que sus resultados en este caso productos físicos logren ser usados por los demás estudiantes, para mejorar las actividades prácticas de las diferentes disciplinas, así como incentivar investigaciones en las que estos equipos sean usados.
- Gracias a la realización de este proyecto se lograron adquirir nuevos conocimientos relacionados a la ingeniería civil en la parte de la geotecnia y la ingeniería mecánica. Con respecto, al diseño de equipos, ejecución de procesos y actividades metalmecánicas. En ocasiones la disponibilidad de equipos se presenta por la falta de conocimiento para su fabricación, lo que limita el desarrollo de nuevas ideas para suplir necesidades de ingeniería.

RECOMENDACIONES

Los especímenes a analizar en los ensayos, deben ser adecuados de acuerdo a las condicionantes geométricas de cada ensayo, utilizando herramientas o equipos que permitan una extracción óptima y adecuando espacios donde estos no sufran alteraciones.

Es importante el uso de la ficha técnica, manual y guía para desarrollar los ensayos. Se debe tener en cuenta los elementos para usar los equipos, cómo se manejan y las condiciones o especificaciones para un correcto uso.

Para el desarrollo de los ensayos es importante tener claro el procedimiento de ejecución del ensayo y toma de datos, ya sea en campo o en laboratorio, teniendo en cuenta que se usan diferentes tipos de muestras. En campo pueden ser irregulares o bloques de roca y en el laboratorio se pueden analizar muestras con tratamiento previo como núcleos.

Con respecto al uso de los equipos para el de tilt test es importante llevar un control de velocidades controladas y constantes, de tal forma que los ángulos de inclinación obtenidos no se alteren. Se recomienda usar algún dispositivo con el que se logre controlar el tiempo de manera correcta y sea más fácil su uso en el momento de despejar variables que lo requiera.

Para el equipo de carga puntual se deben hacer primero verificaciones de separación de puntas y contenido de hidráulico en el tanque auxiliar. En el proceso de realización de las pruebas, la actividad de inyección debe ser controlada con el fin de que el sistema de medición de carga arroje valores precisos. Debido a que, si se hace de manera descontrolada o movimientos bruscos, los resultados se van a ver alterados.

Después del uso de los equipos se deben realizar labores de limpieza y/o mantenimiento.

Es importante que desde los espacios académicos se dé la colaboración a investigaciones con una visión innovadora, usando productos de fácil acceso y contando con personas capacitadas y que cuentan con la experticia para lograr elaborar estos productos que son útiles en el entorno estudiantil y profesional.

Por último, sería de gran motivación e importante que la universidad adquirirá los equipos, producto de este trabajo de grado. De ser así, se invita a los estudiantes de la facultad de ingeniería civil a realizar investigaciones con estos equipos, con el fin de que adquieran más conocimiento teórico y práctico en relación a la ingeniería geotécnica. Por otra parte, se sugiere a los estudiantes realizar investigaciones o trabajos en los que el producto sirva como herramienta para impulsar más investigación por parte de nuestra facultad.

GLOSARIO

- Discontinuidad: Es cualquier plano de origen mecánico o sedimentario que se encuentra en un macizo rocoso con una resistencia a tracción muy baja o nula⁹¹.
- Macizo rocoso: Conjunto de matriz rocosa y discontinuidades, de carácter heterogéneo, con comportamiento discontinuo y normalmente anisótropo, son consecuencia de la naturaleza. La frecuencia y orientación de los planos de discontinuidad condicionan el comportamiento geomecánico e hidráulico de este⁹².
- Mecánica de rocas: Esta se ocupa del estudio teórico y práctico de las propiedades y comportamientos mecánicos de materiales rocosos y su acción frente a fuerzas aplicadas por el medio físico⁹³.
- Roca: Agregado o conjunto de una o varias sustancias minerales que forman macizos, lo cuales ocupan grandes extensiones de la corteza terrestre y son un elemento constructivo de la litosfera⁹⁴.
- Resistencia al corte directo: Este hace referencia a la estabilidad de la roca dependiendo de la resistencia a lo largo de las discontinuidades⁹⁵.
- Resistencia a la compresión simple: Esta permite determinar la competencia de la roca, es decir cuánto soporta⁹⁶.

⁹¹ Cfr. RODRIGUEZ, Javier. Ingeniería geológica: Caracterización de macizos rocosos., 2007, p. 14.

⁹² Cfr. RODRIGUEZ, Javier, Ingeniería geológica: Caracterización de macizos rocosos., 2007, p. 14.

⁹³ Cfr. GONZÁLEZ DE VALLEJO et al. Opc., cit., pág 118.

⁹⁴ Cfr. RAMÍREZ y ALEJANO. Opc, cit., pág 173

⁹⁵ Cfr. SUAREZ, Jaime. Capítulo 3: Resistencia al cortante. *Deslizamientos: Análisis Geotécnico*, 2009.

⁹⁶ Cfr. SUAREZ. Opc, cit., pág 119.

BIBLIOGRAFIA

- ALEJANO, Leandro; GONZÁLEZ, Javier y MURALHA, José. Comparison of different techniques of tilt testing and basic friction angle variability assessment. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45 (2012), 1023-35. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0265-7>.
- ALEJANO, Leandro et al. ISRM Suggested method for determining the basic friction angle of planar rock surfaces by means of Tilt Tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51 (2018), 3853-59. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1627-6>
- ALEJANO, LR et al. A Benchmark Experiment to Assess Factors Affecting Tilt Test Results for Sawcut Rock Surfaces. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50 (2017), 2547-62. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1271-6>
- ANZOLA, Viviana. Correlación entre el índice de carga puntual y el número de rebote del martillo schmidt para la arenisca de la antigua cantera de servita. (Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito., 2017)
- ARZÚA, Javier et al., Efecto del paso del tiempo y del desgaste sobre los resultados del ensayo de inclinación para la obtención del ángulo de fricción básico de una roca., *Universidad de Vigo*, 2015. Accedido 30 julio 2019, en: <https://www.interempresas.net/Mineria/Articulos/132417-Efecto-paso-tiempo-desgaste-resultados-ensayo-inclinacion-obtencion-angulo-friccion.html>
- ASTM D5731 – 16. Método de prueba estándar para la determinación del índice de resistencia de la roca y la aplicación a las clasificaciones de la resistencia de la roca. *ASTM International*, 2016. Accedido 3 julio 2019, en: <https://www.astm.org/Standards/D5731.htm>
- BARTON, Nick. The shear strength of rock and rock joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*, 13 (1976), 1-24
- BARTON, Nick y KJAERNSLI, Bjorn. Shear strength of rockfill.», *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 107 (1981), 873-91. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)90543-x](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90543-x)
- BEER, Ferdinand et al., *Mecánica De Materiales.*, Quinta edi (México: McGraw-Hill, 2009)
- BUDYNAS, Richard y NISBETT, J. Keit. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Octava Edi. México: McGraw Hill, 2011
- BURBANO, Danny y GARCÍA, Tania, «Estimación empírica de la resistencia a compresión simple a partir del ensayo de carga puntual en rocas anisótropas (esquistos y pizarras).», *FIGEMPA; Investigación y Desarrollo*, 2 (2016), 13-

16. Disponible en:
<https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/RevFIG/article/download/862/870/>
- CATARINO, Carlos. *Avaliação da resistência à compressão simples de material-rocha da Curviã : estudo preliminar*. (Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2016). Recuperado de: <https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/9818>
- CONTROLSGROUP. Digital rock strength index apparatus 100 kN cap. *Controlsgroup*, 2019. Accedido 19 agosto 2019, en: <https://www.controls-group.com/spa/meceaacutenica-de-rocas-testing-equipment/digital-rock-strength-index-apparatus-100-kn-cap.php>
- CORREA, Álvaro. Caracterización de rocas. Ensayos de laboratorio. (Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2000)
- COTECNO. Aparato portátil de prueba de carga puntual. *Cotecno*, 2019. Accedido 19 agosto 2019, en: <https://www.cotecno.cl/nuestros-productos/aparato-portatil-de-prueba-de-carga-puntual/>
- DÍAZ, Mario y RODRÍGUEZ, Jean. Estudio de la estabilidad de taludes en roca entre los kilómetros 95 al 97 de la carretera Ciudad de Dios – Cajamarca. *Universidad Privada del Norte* (Universidad Privada del Norte, 2018)
- G.I.S. Ibérica. Equipos de carga puntual (rocas). *GIS Ibérica*, 2010. Accedido 19 agosto 2019, en: http://www.gisiberica.com/CARGA_PUNTUAL/eca80.4.htm
- G.I.S Ibérica. Equipo de carga puntual (manómetro digital). *GIS Ibérica*, 2010. Accedido 19 agosto 2019, en: http://www.gisiberica.com/CARGA_PUNTUAL/eca79.htm
- . Equipo de carga puntual analógico. *GIS Ibérica*, 2010. Accedido 19 agosto 2019, en: http://www.gisiberica.com/CARGA_PUNTUAL/eca080.htm
- GALVÁN, Manolo, «Estudio del ensayo a carga puntual en materiales calizos de la comunidad valenciana.» (Universidad Politécnica de Valencia, 2011). Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/10526>
- GARCÍA, Alejandra. Importancia de la rugosidad en la estabilidad de bloques de roca. (Instituto Politécnico Superior, 2017). Recuperado de: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/24260/Importancia%20de%20la%20rugosidad%20en%20la%20estabilidad%20de%20bloques.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- GHANI, R et al. Field and Laboratory-based Approach for the Determination of Friction Angle of Geological Discontinuities of Malaysian Granites, *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, 28 (2017), 151. Recuperado de <https://doi.org/10.29037/ajstd.41>.

GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis et al., *Ingeniería Geológica*. (Madrid: Pearson Educación, 2002)

GONZÁLEZ, Javier; ALEJANO, Leandro y MURLHA, José. Considerations on the laboratory estimate of the basic friction angle of rock joints. *Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses*, 2014, pp. 199-204. Disponible en: <https://doi.org/10.1201/b16955-31>

HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto, *Metodología de la investigación.*, Sexta edición (México: McGraw-Hill Education, 2014)

HU, Xian-Qin y CRUDEN, D. *A portable tilting table for on-site test of the friction angles of discontinuities in rock masses* (Paris: International Association of Engineering Geology, 1992)

HYUN, Jang et al. Determination of the basic friction angle of rock surfaces by Tilt Tests», *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51 (2018), 989-1004. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1388-7>

MARÍN, Wilson. Evaluación de parámetros materiales de fractura en roca intacta. (Universidad Nacional de Colombia, 2017). Recuperado de: <http://bdigital.unal.edu.co/62569/1/71636410.2017.pdf>

MISAS, Gabriel. *La educación superior en Colombia. Análisis y estrategias para su desarrollo. Facultad de Ciencias Humanas Universidad Nacional de Colombia*, 2004. Recuperado de: http://www.colombiaaprende.edu.co/html/investigadores/1609/articles-73081_archivo.pdf

NAVARRETE, Marco et al., Caracterización de propiedades físico-mecánicas de rocas ígneas utilizadas en obras de infraestructura. *Revista ALCONPAT*, 3 (2016), 133-43. Disponible en: <https://doi.org/10.21041/ra.v3i2.49>

PÉREZ, Ignacio et al. Efecto del desgaste de la roca y de la velocidad de ensayo en la determinación mediante tilt test del ángulo de fricción básico de juntas en roca. *Ingeniería Civil*, 2017, 43-52. Recuperado de: <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/490/463>

PESA, Marta et al. Las actividades de laboratorio en la formación de ingenieros: propuesta para el aprendizaje de los fenómenos de conducción eléctrica», *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 31 (2014), 642. Recuperado de: <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2014v31n3p642>

PINZUAR. Máquina digital para ensayos de carga puntual.», *Pinzuar*, 2019. Accedido 19 agosto 2019, en: <https://www.pinzuar.com.co/pinzuar/es/productos/suelos/máquina-digital-ensayos-carga-puntual/>

RAMÍREZ, Pedro y ALEJANO, Leandro. Mecánica de rocas: fundamentos e

- ingeniería de taludes, 2004.
- RAMOS, Ena. Métodos y técnicas de investigación», *Gestiopolis*, 2008. Accedido 4 de julio de 2019, en: <https://www.gestiopolis.com/metodos-y-tecnicas-de-investigacion/>
- RODRIGUEZ, Javier. Ingeniería geológica: Caracterización de macizos rocosos., 2007, p. 14.
- STIMPSON, B. A suggested technique for determining the basic friction Angle of Rock Surfaces Using Core.», *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr*, 18 (1981), 63-65
- SUAREZ, Jaime. Capítulo 3: Resistencia al cortante. *Deslizamientos: Análisis Geotécnico*, 2009.
- SUÁREZ, Ludger. *Descripción del macizo rocoso. Introducción a la ingeniería de rocas de superficie y subterránea*. (Universidad Nacional de Colombia, 2015). Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/330834433_Descripcion_del_macizo_rocoso_introduccion_a_la_ingenieria_de_rocas_de_superficie_y_subterranea
- SUE, Sistema Universitario Estatal, «Desfinanciamiento de la educación superior en Colombia. La realidad de la crisis en el sistema de financiación de las universidades estatales.», *Sistema Universitario Estatal*, 2012, 287-330. Disponible en: <https://doi.org/10.1787/9789264180710-12-es>
- TORRES, Felipe. Análise comparativa entre o Tilt Teste e o Ensaio de Cisalhamento Direto para determinação do Ângulo de Atrito Interno Básico. (Universidade Federal de Minas Gerais, 2011)
- ULUSAY, Resat y HASAN, Karakul. Assessment of basic friction angles of various rock types from Turkey under dry, wet and submerged conditions and some considerations on tilt testing. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75 (2016), 1683-99. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/s10064-015-0828-4>
- Universidad Central de Venezuela. Microcurrículo asignatura Mecánica de Rocas. Universidad Central de Venezuela., 2006, 1-5
- UTEST. Roca equipo de prueba. *UTEST Equipo para ensayos en materiales*. Accedido 27 septiembre 2019, en: <http://www.utest.com.tr/es/26084/ROCA>

ANEXOS

Anexo 1. Diseño y construcción equipo de tilt test

Estos se encuentran en medio magnético.

Anexo 2. Diseño y construcción equipo de carga puntual

Estos se encuentran en medio magnético.

Anexo 3. Presupuesto y materiales de los equipos de tilt test y carga puntual

Estos se encuentran en medio magnético.

Anexo 4. Manual de operación y guía de ensayo tilt test.

Estos se encuentran en medio magnético.

Anexo 5. Manual de operación y guía de carga puntual

Estos se encuentran en medio magnético.

Anexo 6. Ensayos de tilt test

Estos se encuentran en medio magnético.

Anexo 7. Ensayos de carga puntual

Estos se encuentran en medio magnético.