DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

AUTOR: PUGA GALLEGOS, DIANA SOFÍA

TEMA: ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL ESFUERZO CORTANTE EN LA FALLA DE VIGAS DE MATERIAL DÚCTIL CARGADAS TRANSVERSALMENTE.

DIRECTOR: ING. PÉREZ, JOSÉ

CODIRECTOR: ING. NARANJO, CARLOS

SANGOLQUÍ, OCTUBRE 2014

CERTIFICADO

El proyecto **"ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL ESFUERZO CORTANTE EN LA FALLA DE VIGAS DE MATERIAL DÚCTIL CARGADAS TRANSVERSALMENTE"** fue realizado en su totalidad por la señorita Diana Sofía Puga Gallegos como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. José Pérez

DIRECTOR

Ing. Carlos Naranjo

CODIRECTOR

Sangolquí, 01 de Octubre del 2014

AUTORÍA

Yo, DIANA SOFIA PUGA GALLEGOS

DECLARO QUE:

El proyecto de grado titulado **"ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL ESFUERZO CORTANTE EN LA FALLA DE VIGAS DE MATERIAL DÚCTIL CARGADAS TRANSVERSALMENTE"** ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme a las citas y notas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente, este trabajo es mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de titulación en misión.

Sangolquí, 01 de Octubre del 2014

Diana Sofía Puga Gallegos

172144182-0

AUTORIZACIÓN

Yo, Diana Sofía Puga Gallegos

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE la publicación en la biblioteca virtual de la institución del proyecto titulado **"ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL ESFUERZO CORTANTE EN LA FALLA DE VIGAS DE MATERIAL DÚCTIL CARGADAS TRANSVERSALMENTE"**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad de autoría.

Sangolquí, 01 de Octubre del 2014

Diana Sofía Puga Gallegos

172144182-0

DEDICATORIA

El presente proyecto está dedicado a mis padres Teresa y Marcelo por su amor infinito y su apoyo incondicional, y a mi hermano Marcelo por ser mi luz y alegría.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a:

En primer lugar a Dios por las abundantes bendiciones que derrama en mi vida.

A mis padres y hermano por su apoyo incondicional en todos los aspectos de mi vida, por su paciencia y amor.

A toda mi familia por su gran y sincero amor.

Al Ing. José Pérez y al Ing. Carlos Naranjo por su dirección y guía en la elaboración del presente proyecto.

Al Ing. Xavier Sánchez, Ing. Fernando Olmedo, Tecnólogo Francisco Navas, Tecnólogo Edwin Tayupanta, a los señores Roberty Velasco y Nelson Cárdenas por su colaboración en el desarrollo del presente proyecto.

Al Teniente Coronel Carlos Izurieta y al Departamento de Criminalística de Pichincha Sección de Microscopía Electrónica que hicieron posible el análisis fractográfico presente en este proyecto de investigación.

A mis compañeros y amigos por su amistad incondicional.

ÍNDICE

CERTIFICADO i
AUTORÍA ii
AUTORIZACIÓN iii
DEDICATORIA iv
AGRADECIMIENTO v
RESUMEN xvii
ABSTRACT xviii
CAPÍTULO 1 1
GENERALIDADES 1
1.1 ANTECEDENTES 1
1.2 JUSTIFICACIÓN 7
1.3 ALCANCE 8
1.4 OBJETIVOS 8
1.4.1 OBJETIVO GENERAL 8
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 8
CAPÍTULO 2 9
MARCO TEÓRICO 9
2.1 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES 9
2.2 VIGAS Y APOYOS 12
2.2.1 DEFINICIÓN DE VIGA 12
2.2.2 APOYOS DE UN ELEMENTO ESTRUCTURAL 13
2.3 FUERZA CORTANTE Y MOMENTO FLEXIONANTE 13
2.4 ESFUERZOS EN LAS VIGAS Y RADIO DE CURVATURA 16
2.4.1 ESFUERZOS CORTANTES 16
2.4.1.1 CORTANTE DIRECTO 16
2.4.1.2 CORTANTE VERTICAL 17
2.4.2 ESFUERZOS FLEXIONANTES 18
2.4.2.1 FLEXIÓN DE VIGAS EN EL RANGO ELÁSTICO 18
2.4.2.2 FLEXIÓN DE VIGAS EN EL RANGO PLÁSTICO 19
2.4.3 RADIO DE CURVATURA 26
2.5 ENERGÍA DE DEFORMACIÓN 29
2.5.1 ENERGÍA DE DEFORMACIÓN DEBIDA AL CORTANTE 30

2.5.2 ENERGÍA DE DEFORMACIÓN DEBIDA A LA FLEXIÓN.....30
2.6 ENSAYOS DE CORTANTE Y FLEXIÓN 33
2.6.1 ENSAYO DE CORTANTE.....33
2.6.2 ENSAYO DE FLEXIÓN.....33
2.7 DISEÑO EXPERIMENTAL 35
2.7.1 DEFINICIÓN 35
2.7.2 GLOSARIO BÁSICO.....35
2.7.3 ETAPAS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS 36
2.7.4 PRINCIPIOS BÁSICOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL.....37
2.7.5 EFECTO DE LOS FACTORES 37
2.7.6 DISEÑO FACTORIAL 37
2.7.7 MODELO ESTADÍSTICO PARA EL DISEÑO FACTORIAL CON DOS FACTORES.....38
2.7.7.1 HIPÓTESIS Y ANÁLISIS DE VARIANZA.....39
CAPÍTULO 3.....43
DISEÑO DEL ENSAYO 43
3.1 DISEÑO DEL ACCESORIO.....43
3.1.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO.....43
3.1.2 COMPONENTES DEL ACCESORIO.....44
3.1.3 GEOMETRÍA DEL ACCESORIO 45
3.1.4 MATERIALES DEL ACCESORIO 45
3.1.4.1 DADOS DE CORTE 46
3.1.4.2 APOYOS Y PUNZÓN.....49
3.1.5 CÁLCULOS.....49
3.1.5.1 SECCIÓN CIRCULAR CRÍTICA A CORTANTE 50
3.1.5.2 SECCIÓN CUADRADA CRÍTICA A CORTANTE 55
3.1.5.3 CÁLCULO DEL ESFUERZO FLECTOR PARA LA SECCIÓN CIRCULAR CRÍTICA.....61
3.1.5.4 CÁLCULO DEL ESFUERZO FLECTOR PARA LA SECCIÓN CUADRADA CRÍTICA 63
3.1.6 DIMENSIONES DEL ACCESORIO.....64
3.1.6.1 DADOS DE CORTE 64
3.1.6.2 APOYOS Y PUNZÓN.....65
3.1.7 SIMULACIÓN.....66
3.1.7.1 ACCESORIO PARA LA SECCIÓN CIRCULAR CRÍTICA.....66

3.1.7.1.1 ESFUERZO CORTANTE PURO 66
3.1.7.1.2 ESFUERZO FLECTOR 72
3.1.7.2 ACCESORIO PARA LA SECCIÓN CUADRADA CRÍTICA 76
3.1.7.2.1 ESFUERZO CORTANTE PURO 76
3.1.7.2.2 ESFUERZO FLECTOR 80
3.1.8 ESTUDIO DE LA FALLA DEL DADO DE CORTE DE SECCIÓN CUADRADA CRÍTICA 88
3.1.8.1 DIMENSIONES DE LA SECCIÓN 88
3.1.8.2 FRACTOGRAFÍA DEL DADO DE CORTE 91
3.2 DISEÑO DEL EXPERIMENTO – DISEÑO FACTORIAL 100
3.2.1 FACTORES, NIVELES Y VARIABLE DE RESPUESTA 100
3.2.2 DEFINICIÓN DEL NÚMERO DE RÉPLICAS 102
3.2.3 PRUEBA PILOTO 103
3.2.3.1 CONTROL DE LA LUZ ENTRE EL APOYO Y EL PUNZÓN 104
3.2.3.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS 105
3.2.3.3 RESULTADOS DE LA PRUEBA PILOTO DEL ACCESORIO 106
3.2.3.4 METODOLOGÍA PARA EL PROCESAMIENTO DE LOS RESULTADOS 109
3.2.3.5 RESULTADOS DE LA PRUEBA PILOTO DEL EXPERIMENTO EN VIGAS DE ACERO 115
3.2.3.5.1 DEFINICIÓN DEL PASO DE LAS PROBETAS DE ACERO 135
3.2.3.6 RESULTADOS DE LA PRUEBA PILOTO DEL EXPERIMENTO EN VIGAS DE ALUMINIO 136
3.2.3.6.1 DEFINICIÓN DEL PASO DE LAS PROBETAS DE ALUMINIO 139
CAPÍTULO 4 140
PROCESAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 140
4.1 PROCESAMIENTO DE DATOS 140
4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS VIGA DE ACERO 142
4.2.1 SECCIÓN CIRCULAR DE ACERO DE DIÁMETRO 8 mm 143
4.2.1.1 RADIOS DE CURVATURA 143
4.2.1.2 FRACTOGRAFÍAS 148
4.2.2 SECCIÓN CIRCULAR DE ACERO DE DIÁMETRO 10 mm – RADIOS DE CURVATURA 156
4.2.3 SECCIÓN CIRCULAR DE ACERO DE DIÁMETRO 12 mm – RADIOS DE CURVATURA 159
4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS VIGA DE ALUMINIO 161

4.3.1 SECCIÓN CIRCULAR DE ALUMINIO DE DIÁMETRO 7 mm – RADIOS DE CURVATURA 162
4.3.2 SECCIÓN CIRCULAR DE ALUMINIO DE DIÁMETRO 9,5 mm – RADIOS DE CURVATURA 165
4.3.3 SECCIÓN CIRCULAR DE ALUMINIO DE DIÁMETRO 12,7 mm – RADIOS DE CURVATURA 167
4.4 ANÁLISIS DE LAS GRÁFICAS ESFUERZO – DEFORMACIÓN 169
4.4.1 GRÁFICAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN SECCIÓN CIRCULAR DE ACERO DE DIÁMETRO 8 mm 169
4.4.2 GRÁFICAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN SECCIÓN CIRCULAR DE ACERO DE DIÁMETRO 10 mm 170
4.4.3 GRÁFICAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN SECCIÓN CIRCULAR DE ACERO DE DIÁMETRO 12 mm 170
4.4.4 GRÁFICAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN SECCIÓN CIRCULAR DE ALUMINIO DE DIÁMETRO 7 mm.....171
4.4.5 GRÁFICAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN SECCIÓN CIRCULAR DE ALUMINIO DE DIÁMETRO 9,5 mm.....171
4.4.6 GRÁFICAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN SECCIÓN CIRCULAR DE ALUMINIO DE DIÁMETRO 12,7 mm.....172
4.5 RELACIÓN DE TIMOSHENKO 172
4.5.1 RELACIÓN DE TIMOSHENKO VIGAS DE ACERO.....173
4.5.2 RELACIÓN DE TIMOSHENKO VIGAS DE ALUMINIO 178
4.6 ANÁLISIS DE LA VARIANZA 182
4.7 RESUMEN DE RESULTADOS.....184
CAPÍTULO 5.....185
ANÁLISIS DE COSTOS.....185
5.1 COSTOS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 185
CAPÍTULO 6.....187
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 187
6.1 CONCLUSIONES.....187
6.2 RECOMENDACIONES.....188
BIBLIOGRAFÍA.....190

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Viga de Timoshenko 1
Figura 2: Ensayo de falla debido al esfuerzo cortante en pernos 3
Figura 3: Resultados del ensayo de esfuerzo cortante (rotura de los pernos) 4
Figura 4: Fragmentos de perno (resultado del ensayo de esfuerzo cortante) 5
Figura 5: Ensayo de falla por flexión 6
Figura 6: Fuerza cortante 14
Figura 7: Momento flexionante 15
Figura 8: Flexión en el rango plástico 20
Figura 9: Viga rectangular sometida a flexión pura 21
Figura 10: Momento de fluencia sobre la viga rectangular 22
Figura 11: Núcleo elástico 23
Figura 12: Incremento de la zona plastificada y desaparición del núcleo elástico 23
Figura 13: Sección totalmente plastificada 24
Figura 14: Radio de curvatura 27
Figura 15: Elemento sometido a cortante puro 30
Figura 16: Deformación debida a la flexión 31
Figura 17: Viga en cantiliver de sección rectangular 32
Figura 18: Esquema del montaje para ensayo de corte 33
Figura 19: Esquema del ensayo de flexión 34
Figura 20: Accesorios del laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE 44
Figura 21: Área de la sección transversal de la viga circular 50
Figura 22: Puntos de aplicación de la carga (P) y las reacciones (R) en la viga circular 52
Figura 23: Dimensiones del dado de corte de ranura circular en el apoyo 53
Figura 24: Dimensiones del dado de corte en el punzón 55
Figura 25: Área de la sección transversal de la viga cuadrada 55
Figura 26: Puntos de aplicación de la carga (P) y las reacciones (R) en la viga cuadrada 57
Figura 27: Dimensiones del dado de corte de ranura cuadrada en el apoyo 58
Figura 28: Dimensiones del dado de corte de ranura cuadrada en el punzón 60
Figura 29: Esquema de la distancia máxima entre apoyos para la sección circular y cuadrada crítica de acero 62
Figura 30: Factor de seguridad del accesorio de la sección circular crítica – cortante puro 67
Figura 31: Factor de seguridad de los dados de corte del accesorio de la sección circular crítica – cortante puro 68
Figura 32: Deformación elástica equivalente del accesorio de la sección circular crítica – cortante puro 69
Figura 33: Esfuerzos equivalentes del accesorio de la sección circular crítica – cortante puro 70
Figura 34: Deformación total de la varilla de sección circular crítica – cortante puro 71

Figura 35: Factor de seguridad del accesorio de la sección circular crítica – esfuerzo flector 72
Figura 36: Deformación elástica equivalente del accesorio de la sección circular crítica – esfuerzo flector 73
Figura 37: Esfuerzos equivalentes del accesorio de la sección circular crítica – esfuerzo flector 75
Figura 38: Deformación total de la varilla – esfuerzo flector 76
Figura 39: Factor de seguridad del accesorio de la sección cuadrada crítica – cortante puro 77
Figura 40: Deformación elástica equivalente del accesorio de la sección cuadrada crítica – cortante puro 78
Figura 41: Esfuerzos equivalentes del accesorio de la sección cuadrada crítica – cortante puro 79
Figura 42: Deformación total de la varilla de la sección cuadrada crítica – cortante puro 80
Figura 43: Factor de seguridad del accesorio de la sección cuadrada crítica – esfuerzo flector 82
Figura 44: Deformación elástica equivalente del accesorio de la sección cuadrada crítica – esfuerzo flector 83
Figura 45: Esfuerzos equivalentes del accesorio de la sección cuadrada crítica – esfuerzo flector 84
Figura 46: Deformación total de la varilla de la sección cuadrada crítica – esfuerzo flector 85
Figura 47: Mallado de la cuarta parte del dado de corte de sección cuadrada 86
Figura 48: Resultados de la simulación de la tensión de contacto para el dado de corte de sección cuadrada 87
Figura 49: Medición de las dimensiones de la ranura cuadrada 89
Figura 50: Dado de corte de secciones cuadradas antes de la rotura 90
Figura 51: Dado de corte de secciones cuadradas después de la rotura 90
Figura 52: Puntos de análisis en el dado de corte de secciones cuadradas 91
Figura 53: Fractografía del punto 1 del dado de corte 93
Figura 54: Fractografía del punto 2 del dado de corte 95
Figura 55: Fractografía del punto 3 del dado de corte 97
Figura 56: Fractografía de un acero endurecido, faceta de hendiduras finas 98
Figura 57: Esquema de la viga durante el ensayo a flexión 99
Figura 58: Esquema de la viga de prueba y la variable de respuesta 101
Figura 59: Galgas de espesores 105
Figura 60: Identificación de las probetas 106
Figura 61: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular 108
Figura 62: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección cuadrada 109
Figura 63: Medición de la sección 111
Figura 64: Procedimiento para el análisis de gráficas 112
Figura 65: Procedimiento para la medición de los radios de curvatura 114
Figura 66: Prueba piloto en probetas de sección circular de acero 134
Figura 67: Prueba piloto en probetas de sección circular de aluminio 138

Figura 68: Procedimiento para determinar el área bajo la curva Esfuerzo vs. Deformación 141
Figura 69: Tendencia considerada para el análisis de las gráficas Radios de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón para el acero 145
Figura 70: Probetas de sección circular de acero de diámetro 8 mm luego de la rotura 147
Figura 71: Fractografía de la probeta 0 de la corrida experimental 1 149
Figura 72: Fractografía de la falla debida a cortante de un acero AISI 1040 150
Figura 73: Fractografía de la probeta 9 de la corrida experimental 1 152
Figura 74: Fractografía de la fractura de un eje de acero SAE 1050 debida a carga de flexión 153
Figura 75: Fractografía de la probeta 4 de la corrida experimental 1 155
Figura 76: Tendencia considerada para el análisis de las gráficas Radios de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón para el aluminio 164
Figura 77: Esquema de la viga de Timoshenko 175
Figura 78: Viga del estudio de la influencia del esfuerzo cortante 176

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 8 mm apoyo derecho – Medida Longitudinal y Transversal vs. Separación Apoyo-Punzón 117
Gráfica 2: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 8 mm apoyo izquierdo – Medida Longitudinal y Transversal vs. Separación Apoyo-Punzón 118
Gráfica 3: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 8 mm – Excentricidad vs. Separación Apoyo-Punzón 119
Gráfica 4: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 8 mm – Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón 121
Gráfica 5: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 10 mm apoyo derecho – Medida Longitudinal y Transversal vs. Separación Apoyo-Punzón 123
Gráfica 6: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 10 mm apoyo izquierdo – Medida Longitudinal y Transversal vs. Separación Apoyo-Punzón 124
Gráfica 7: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 10 mm – Excentricidad vs. Separación Apoyo-Punzón 125
Gráfica 8: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 10 mm – Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón 127
Gráfica 9: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 12 mm apoyo derecho – Medida Longitudinal y Transversal vs. Separación Apoyo-Punzón 129
Gráfica 10: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 12 mm apoyo izquierdo – Medida Longitudinal y Transversal vs. Separación Apoyo-Punzón 130
Gráfica 11: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 12 mm – Excentricidad vs. Separación Apoyo-Punzón 131
Gráfica 12: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 12 mm – Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón 133
Gráfica 13: Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón de la sección circular de acero de diámetro 8 mm 144
Gráfica 14: Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón de la sección circular de acero de diámetro 10 mm 157
Gráfica 15: Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón de la sección circular de acero de diámetro 12 mm 160
Gráfica 16: Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón de la sección circular de aluminio de diámetro 7 mm 163
Gráfica 17: Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón de la sección circular de aluminio de diámetro 9,5 mm 166

Gráfica 18: Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón de la sección circular de aluminio de diámetro 12,7 mm 168
Gráfica 19: Separación Apoyo – Punzón vs. Diámetro de la viga – Probetas de acero diámetros 8, 10 y 12 mm 175
Gráfica 20: Separación Apoyo – Punzón vs. Diámetro de la viga – Probetas de aluminio diámetros 7, 9,5 y 12,7 mm 180
Gráfica 21: Efecto de la interacción de la sección y el material de la viga.....183

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Esfuerzo de corte último de los materiales 11
Tabla 2: Esfuerzo en el punto de cedencia al corte 11
Tabla 3: ANOVA para el diseño factorial con dos factores 39
Tabla 4: Combinex matrix 47
Tabla 5: Matriz de decisión 48
Tabla 6: Resumen de los cálculos 60
Tabla 7: Dimensiones de los dados de corte 65
Tabla 8: Dimensiones de los apoyos y el punzón 66
Tabla 9: Dimensiones de la ranura cuadrada antes y después de la rotura 89
Tabla 10: Factores y niveles del diseño experimental 100
Tabla 11: Resultados de la prueba piloto en acero - Fuerza máxima (Kg) 109
Tabla 12: Resultados de las pruebas piloto de la sección circular de acero de diámetro 8 mm - Verificación de la sección (diámetro) luego del ensayo 116
Tabla 13: Resultados de las pruebas piloto de la sección circular de acero de diámetro 8 mm - Verificación del radio de curvatura luego del ensayo 120
Tabla 14: Resultados de las pruebas piloto de la sección circular de acero de diámetro 10 mm - Verificación de la sección (diámetro) luego del ensayo 122
Tabla 15: Resultados de las pruebas piloto de la sección circular de acero de diámetro 10 mm - Verificación del radio de curvatura luego del ensayo 126
Tabla 16: Resultados de las pruebas piloto de la sección circular de acero de diámetro 12 mm - Verificación de la sección (diámetro) luego del ensayo 128
Tabla 17: Resultados de las pruebas piloto de la sección circular de acero de diámetro 12 mm - Verificación del radio de curvatura luego del ensayo 132
Tabla 18: Tabla de resumen del rango de prueba y el paso para cada sección circular de acero 136
Tabla 19: Tabla de resumen del rango de prueba y el paso para cada sección circular de aluminio 139
Tabla 20: Resultados de las pruebas definitivas de la sección circular de acero de diámetro 8 mm - Radio de curvatura luego del ensayo 143
Tabla 21: Resultados de las pruebas definitivas de la sección circular de acero de diámetro 10 mm - Radio de curvatura luego del ensayo 156
Tabla 22: Resultados de las pruebas definitivas de la sección circular de acero de diámetro 12 mm - Radio de curvatura luego del ensayo 159
Tabla 23: Resultados de las pruebas definitivas de la sección circular de aluminio de diámetro 7 mm - Radio de curvatura luego del ensayo 162

Tabla 24: Resultados de las pruebas definitivas de la sección circular de aluminio de diámetro 9,5 mm - Radio de curvatura luego del ensayo 165
Tabla 25: Resultados de las pruebas definitivas de la sección circular de aluminio de diámetro 12,7 mm - Radio de curvatura luego del ensayo 167
Tabla 26: Relación de Timoshenko para vigas de acero de diámetro 8 mm 173
Tabla 27: Relación de Timoshenko para vigas de acero de diámetro 10 mm 173
Tabla 28: Relación de Timoshenko para vigas de acero de diámetro 12 mm 174
Tabla 29: Resultados del cálculo de la relación de Timoshenko en vigas de acero 177
Tabla 30: Relación de Timoshenko para vigas de aluminio de diámetro 7 mm 178
Tabla 31: Relación de Timoshenko para vigas de aluminio de diámetro 9,5 mm 178
Tabla 32: Relación de Timoshenko para vigas de aluminio de diámetro 12,7 mm 179
Tabla 33: Resultados del cálculo de la relación de Timoshenko en vigas de aluminio 181
Tabla 34: Datos experimentales del diseño factorial 3x2 182
Tabla 35: ANOVA del experimento 183
Tabla 36: Resumen de resultados de los análisis realizados a las probetas concluidos los ensayos 184
Tabla 37: Costos totales del proyecto de investigación 185
Tabla 38: Financiamiento del proyecto de investigación 186

RESUMEN

La bibliografía referente a vigas cortas no especifica la longitud a la cual este elemento estructural deja de fallar debido a la influencia del esfuerzo cortante y empieza a fallar debido a la influencia del esfuerzo flector, por lo tanto se ha visto la necesidad de desarrollar el presente estudio con la finalidad de identificar la influencia del esfuerzo cortante sobre la falla de vigas de material dúctil. El desarrollo del estudio requirió del diseño de un accesorio en el cual la viga cuenta con doble apoyo lateral y carga en el centro aplicada con un punzón para el ensayo de vigas de acero y aluminio con dimensión variable, sometidas a esfuerzo cortante y flector. Una vez realizados los ensayos se analizó los radios de curvatura, las gráficas Esfuerzo vs. Deformación, y la relación de Timoshenko. En el análisis de resultados realizado en el capítulo 4 se obtiene que las vigas dúctiles deben diseñarse a flexión cuando la relación L/h es igual o mayor a uno. Siendo L la luz existente entre el apoyo y el punzón, h el peralte de la viga y siempre que el punzón tenga 50 mm de espesor. Para que la falla sea debida al esfuerzo flector en vigas de acero la relación entre el diámetro y la separación apoyo – punzón debe ser una recta de ecuación $y = x$ donde y es la separación apoyo – punzón y x el diámetro de la viga, y en vigas de aluminio la mencionada relación es una recta de ecuación $y = 1{,}0617x - 0{,}6668$. Empleando estos resultados el diseño estructural referente a vigas dúctiles cargadas transversalmente será más efectivo, eficiente y confiable, debido a que la incertidumbre en el diseño disminuye al conocer con certeza si la viga está sometida a cargas cortantes o flectoras.

PALABRAS CLAVES: ESFUERZO CORTANTE, VIGAS, ACERO, ALUMINIO, CARGA TRANSVERSAL.

ABSTRACT

Short beam literature do not specify the length at which this structural element ceases to fail due to the influence of shear stress and begins to fail due to the influence of bending stress, therefore developing this study has been a need to identify the influence of shear stress on the failure of ductile beams. The development of the study required an accessory in which the beam has dual lateral support and loaded in the center applied with a punch. The accessory is capable of testing steel and aluminum beams with variable dimension subjected to shear and bending stress. After destructive tests were finished, it was necessary to analyzing the curvature radio, analyzing the Stress vs. Deformation graphs, and applying Timoshenko's relation. The results of the analysis of chapter 4 show that ductile beams should be designed considering bending force when the relation L/h is equal to or greater than one. L is the gap between the support and the punch, h is the beam depth, and if the punch is 50 mm thick. When the failure is due to bending stress in steel beams the relation between the diameter and gap support-punch is a line of equation $y = x$ where y is the gap support-punch and x is the beam diameter, and aluminum beams has the same relation with a line of equation $y = 1{,}0617x - 0{,}6668$. The results of this study will be a contribution to the structural design relating to ductile beams loaded transversely, so the structural design can be developed more effectively, efficiently and reliably. The uncertainty in the design will decrease because it will be known if a beam is loaded with shear or bending force.

KEYWORDS: SHEAR STRESS, BEAMS, STEEL, ALUMINUM, TRANSVERSE LOAD.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

Las vigas son elementos estructurales empleados ampliamente en el campo de la construcción y estructuras metálicas, dichos elementos trabajan con cargas transversales, las mismas que son las causantes de un momento flector y de una fuerza cortante en la viga, dichas fuerzas son las responsables de la falla del elemento estructural, cabe mencionar que la influencia de las fuerzas variará a lo largo de la viga.

La bibliografía referente a falla de vigas no menciona puntualmente una longitud a la cual la viga deja de fallar por cortante y empieza a fallar por flexión, pero existe una relación dada por S. Timoshenko que cita lo siguiente “para la relación vano (luz o longitud entre apoyos) sobre altura L/h = 10 el efecto de la fuerza cortante en la deformación de la viga es alrededor de un 3 por ciento. A medida que L/h disminuye, el efecto aumenta.” (Timoshenko S., 1957)

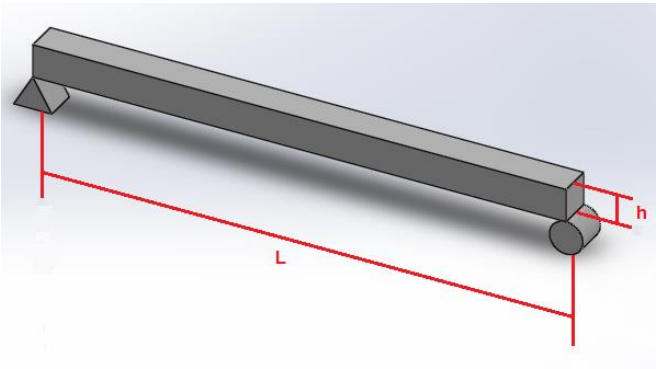


Figura 1: Viga de Timoshenko.

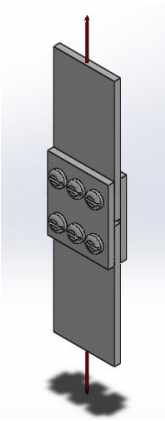
Es por ello que se debe analizar factores como la distancia entre apoyos, la altura de la viga, la geometría de la sección transversal de la viga, el material de la viga, entre otros; con la finalidad de determinar la influencia que tienen mencionados factores sobre la falla de la viga ya sea debido al esfuerzo cortante o debido al esfuerzo flector en los ensayos de corte de pernos y flexión ejecutados en el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

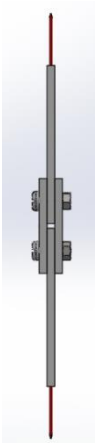
Ensayo de falla debido al esfuerzo cortante en pernos

El ensayo de esfuerzo cortante se realiza en una junta formada por placas y pernos que se muestra en la Figura 2 a), las dimensiones tanto de las placas como de los pernos son conocidas. El ensayo consiste en armar el accesorio previamente mencionado y colocarlo en la máquina de ensayos universal para aplicar carga de tensión como se muestra en la Figura 2 b) y la dirección de la tensión aplicada se muestra en la Figura 2 c), de esta manera los pernos trabajan como vigas cargadas, esto último se evidencia en el diagrama de cuerpo libre de uno de los pernos mostrado en la Figura 2 d) en donde las placas externas (pequeñas) actúan como apoyos y las placas internas (grandes) actúan como punzones de carga.

La longitud entre apoyos es de 10 mm y el diámetro del perno es igual a 5 mm. El análisis de resultados establece que la relación de Timoshenko para el ensayo es $\frac{L}{h} = 2 \leq 10$. Como la relación de Timoshenko es menor a 10 entonces la falla se debe al esfuerzo cortante.

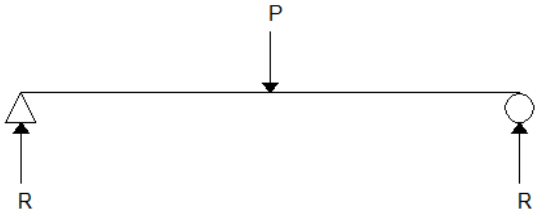
a) **b)**





c.1 **c.2**

c)



d)

Figura 2: Ensayo de falla debido al esfuerzo cortante en pernos.

Una vez realizado el ensayo, se puede verificar la falla de los pernos debido a esfuerzo cortante. Estos se han roto en tres secciones lo que indica que la falla se dio por cortante doble, además la falla de los pernos se produjo perpendicular a su eje geométrico, lo que confirma que fue el esfuerzo cortante el responsable de la falla del elemento estructural.

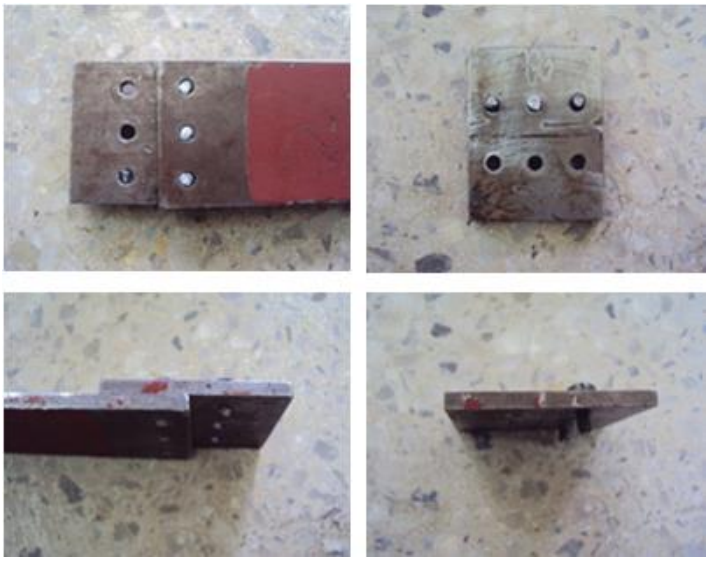


Figura 3: Resultados del ensayo de esfuerzo cortante (rotura de los pernos). (Fuente: Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE)

La longitud de cada fragmento de perno es igual al espesor de la placa que estuvo en contacto con la porción de perno rota, se puede verificar en el primer perno, mostrado en la siguiente figura, que la porción central del perno se desplaza hacia abajo siguiendo la dirección de la tensión aplicada mientas que ambos extremos se desplazan en sentido contrario siguiendo la dirección de las reacciones presentes en los apoyos como se constata en la Figura 2 d).

Figura 4: Fragmentos de perno (resultado del ensayo de esfuerzo cortante). (Fuente: Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE)

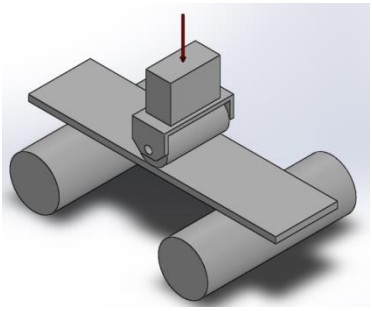
Ensayo de falla por flexión

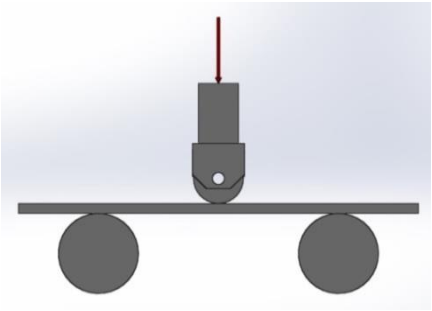
En el ensayo de falla por flexión la distancia entre apoyos es 90 mm y la altura de la viga es 5 mm, entonces la relación de Timoshenko es $\frac{L}{h} = 18 \geq 10$. Ya que la relación es mayor a 10 la falla de la viga se debe a la influencia del esfuerzo flector. La falla se atribuye a que la longitud de viga empleada en el ensayo es 18 veces la altura de la misma, ahora bien una hipótesis considerable es que al incrementar el alto de la sección manteniendo constante la distancia entre apoyos de la viga, en ésta el esfuerzo flector perdería protagonismo y el esfuerzo cortante sería el causante de la falla, ya que la relación de Timoshenko sería menor o igual a 10. Ésta hipótesis podría esclarecerse al finalizar el estudio propuesto en el presente documento. También se debe tener en cuenta que en este ensayo la distancia entre apoyos y la distancia existente entre el apoyo y el punzón de carga es mayor que las distancias empleadas en el ensayo de esfuerzo cortante analizado previamente.

En las figuras mostradas a continuación se puede apreciar el conjunto a ensayar el mismo que está conformado por dos apoyos de rodillo ubicados en los extremos de la viga y un punzón de rodillo para aplicar la carga a L/2

de la viga, el conjunto mencionado se monta en un a base plana, que a su vez se monta en la máquina de ensayos universal.

a)





b.1 **b.2**

b)

c)

Figura 5: Ensayo de falla por flexión. (Fuente: Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE)

Entonces el conocer la distancia entre apoyos a partir de la cual las vigas dejan de fallar debido a la influencia del esfuerzo cortante y empiezan a fallar debido a la influencia del esfuerzo flector permite realizar un diseño óptimo y consecuentemente reducir el desperdicio de material para incrementar el factor de seguridad.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Al estudiar el comportamiento y la falla de las vigas la bibliografía especializada menciona la relación de Timoshenko citada en el capítulo 1.1 en la cual se dice que para todo $\frac{L}{h} \leq 10$ (vigas cortas) la falla se debe a la influencia del esfuerzo cortante y para todo $\frac{L}{h} \geq 10$ (vigas largas) la falla se debe a la influencia del esfuerzo flector.

Al no existir estudios previos es necesario verificar si la relación mencionada tiene sustento y si su aplicación arroja resultados confiables en el diseño estructural de vigas.

Así también este estudio se realizará para tener una referencia de las restricciones que se pueden presentar en el diseño y utilización de un elemento estructural con carga transversal a fin de asegurar su correcto y seguro funcionamiento.

Los resultados de este estudio constituirán un aporte científico en el campo estructural ya que podrían emplearse en el desarrollo de estudios y análisis más profundos para en lo posterior obtener aplicaciones prácticas en el ámbito de construcción con estructuras metálicas.

En conclusión el conocer el límite de falla por cortante en vigas de material dúctil cargadas transversalmente permitirá mayor eficiencia en el diseño estructural, reduciendo la incertidumbre en el mismo y permitiendo generar soluciones sencillas, eficaces, totalmente seguras y válidas.

1.3 ALCANCE

El presente estudio se realizará en probetas de acero estructural A36 y aluminio, de sección circular y cuadrada, y en tres diámetros diferentes. El tamaño de muestra del experimento se calculará para que cumpla con los requerimientos de la estadística a fin de que los resultados obtenidos del ensayo sean valores coherentes, veraces y confiables.

Para el estudio se utilizarán los dispositivos y máquinas del Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Además se realizarán los correspondientes análisis metrológicos de las secciones de rotura de las vigas.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la influencia que tiene el esfuerzo cortante para propiciar la falla de vigas de material dúctil cargadas transversalmente.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer un ensayo destructivo para vigas de sección, geometría (circular y cuadrada) y longitud variable.
- Diseñar, simular y construir un accesorio que permita la realización de los ensayos destructivos de las vigas en estudio.
- Analizar el comportamiento de las vigas cargadas transversalmente al variar su material.
- Analizar los resultados obtenidos de los ensayos para determinar la correlación existente entre los parámetros que intervienen en la falla de vigas de material dúctil cargadas transversalmente.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

Según Deutschman Aaron las propiedades mecánicas de un material permiten conocer el comportamiento del material cuando es sometido a la acción de cargas o fuerzas, estas propiedades se determinan al practicar una serie de pruebas debidamente estandarizadas por la ASTM (The American Society of Testing Materials). Debido a que las propiedades se determinan mediante ensayos los valores dados en las tablas son valores promedio, mínimos, o mínimos y máximos; por lo que el diseñador debe tener en cuenta este particular al momento de seleccionar el material para su diseño.

Las propiedades mecánicas de los materiales que se relacionan al presente proyecto se describen a continuación.

- Resistencia a la Tensión (Su): es también conocida como resistencia última del material y hace referencia al punto más alto de la curva esfuerzo – deformación del material cuando es sometido a una fuerza de tensión, es una característica particular de los materiales dúctiles.

- Resistencia a la Fractura (Sf): se conoce también como resistencia de ruptura, en este valor ocurre la ruptura de la probeta. Se obtiene dividiendo la fuerza aplicada para el área de la sección transversal en cuestión.

- Límite Elástico: sobre la curva esfuerzo-deformación el límite elástico se establece como el punto hasta el cual el material ensayado puede recuperar sus dimensiones iniciales una vez que se retire la carga

externa que se está aplicando, a partir de este punto las deformaciones que sufra el material serán permanentes. Generalmente y con la finalidad de facilitar los cálculos y el diseño tanto el límite de proporcionalidad como el límite elástico toman el mismo valor.

- Punto de Cedencia (Syp): el punto de cedencia se conoce como resistencia a la cedencia y en mencionado punto la probeta sufre un incremento grande de deformación sin necesidad de aumentar la fuerza aplicada. La localización del punto de cedencia depende del material en análisis es así que se utiliza una desviación del 0.2% respecto a la línea recta de la curva esfuerzo – deformación para ubicar el punto de cedencia en los aceros.

- Módulo de Elasticidad: el módulo de eslasticidad se define como la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación medidos en del límite de proporcionalidad de determinado material, es decir, el módulo de elasticidad hace referencia a la tiesura (en tensión o compresión y se representa con la letra E) o rigidez en el corte (se representa con la letra G), que presenta un material.
  En los materiales dúctiles el módulo de elasticidad (E) es el mismo tanto en tensión como en compresión, en cambio en materiales frágiles el módulo difiere en tensión y en compresión. Con la ecuación siguiente es posible relacionar el módulo de elasticidad (E) y el módulo de rigidez (G). Siendo v la relación de Poisson, valor de la relación de la deformación transversal a la deformación axial al aplicar una carga axial en el elemento.

$$G = \frac{E}{2(1+v)} \qquad [1]$$

- Resistencia a Corte Directo: los valores de resistencia al corte de un material se obtienen realizando ensayos, mencionados valores son

promedio debido a que en la falla de las probetas influye también el esfuerzo flector, es así que la bibliografía proporciona las relaciones que se citan a continuación a fin de facilitar la obtención del esfuerzo de corte último de los materiales.

Tabla 1

Esfuerzo de corte último de los materiales

Material	Ssu
Acero Forjado	0.82*Su
Fundición Maleable	0.90*Su
Hierro Vaciado	1.30*Su
Cobre y Aleaciones de Cobre	0.90*Su
Aluminio y Aleaciones de Aluminio	0.65*Su

(Fuente: Deutschman A., 1987)

- Punto de Cedencia a Corte: los valores del esfuerzo en el punto de cedencia a corte se obtienen realizando ensayos de torsión en probetas de sección circular, pero se pueden emplear las relaciones de valores de cedencia a corte indicadas en la Tabla 2.

Tabla 2

Esfuerzo en el punto de cedencia al corte

Material	Ssyp
Acero Forjado	0.58*Syp
Aluminio y Aleaciones de Aluminio	0.55*Syp

(Fuente: Deutschman A., 1987)

Las relaciones mostradas en la Tabla 2 se obtienen a partir de ensayos, existen teorías como la teoría del esfuerzo cortante máximo y la teoría de la energía de distorsión que intentan explicar mencionadas relaciones.

La teoría del esfuerzo cortante máximo es más conservadora y restrictiva que la teoría de la energía de distorsión, siendo esta última la más empleada en materiales dúctiles ya que se asemeja más a lo obtenido experimentalmente.

- Módulo de Resiliencia (Up): es la capacidad que presentan los materiales para absorber energía en el límite de proporcionalidad. El valor del módulo de resiliencia está dado por el área bajo la parte elástica de la curva esfuerzo-deformación.

- Módulo de Tenacidad: la tenacidad es la propiedad que le permite a un material tener una deformación plástica previa a la rotura, esto para poder absorber la energía que se le aplica a manera de fuerza, es así que esta propiedad está estrechamente relacionada con la resistencia que presenta el material a las cargas de impacto o choques.

2.2 VIGAS Y APOYOS

2.2.1 DEFINICIÓN DE VIGA

Según Nash las vigas son elementos estructurales que trabajan con cargas transversales, las mismas que son las causantes de un momento flector y de una fuerza cortante en la viga, dichas fuerzas son las responsables de la falla del elemento estructural, cabe mencionar que la influencia de las fuerzas variará a lo largo de la viga.

Al aplicar carga sobre una viga a más de las fuerzas mencionadas previamente se puede generar también una fuerza axial, dicha fuerza es

despreciable en el diseño estructural de la viga ya que el momento flector y la fuerza cortante son mayores y sus efectos más críticos para el elemento.

2.2.2 APOYOS DE UN ELEMENTO ESTRUCTURAL

Miguel Cervera Ruiz y Elena Blanco definen a los apoyos como elementos que se emplean para acoplar estructuras. Estos elementos tienen dos funciones primordiales que son:

- Restringir los grados de libertad (movimientos) de un miembro estructural.
- Transmitir las cargas aplicadas en la estructura hasta el miembro de sustentación de la misma.

Un elemento estructural presenta tres grados de libertad que son traslación en el eje horizontal del plano medio, traslación en el eje vertical del plano medio y rotación perpendicular al plano medio. Los tipos de apoyo se diferencian entre sí al impedir alguno o todos los grados de libertad del elemento estructural.

2.3 FUERZA CORTANTE Y MOMENTO FLEXIONANTE

La fuerza cortante y el momento flexionante en una viga se estudian considerando los criterios de Fitzgeral y Popov.

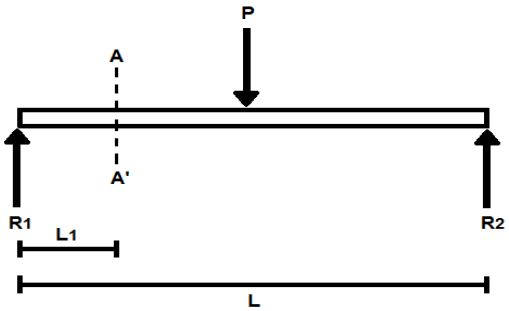
Para poder definir la fuerza cortante en una viga es necesario analizar la viga de la Figura 6 a).

Una viga puede cortarse en cualquier punto a lo largo de su longitud L, la viga de la figura se cortará en la sección A-A’, tomando como base que la viga está en equilibrio estático, análogicamente todas las secciones de la viga también estarán en equilibrio estático.

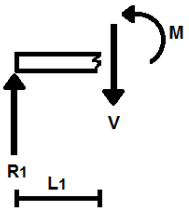
El equilibrio estático se da cuando la sumatoria de fuerzas y momentos en la viga es igual a cero.

Una vez se ha cortado la viga en la sección A-A', se grafica el diagrama de cuerpo libre (DCL) de dicha sección, como se puede apreciar en el literal b) de la Figura 6 la reacción que el apoyo ejerce sobre el extremo izquierdo de la viga actúa a lo largo del eje vertical y con sentido ascendente, consecuentemente es necesaria otra fuerza que anule el efecto de esta sobre la sección a fin de que la sección se encuentre en equilibrio estático, por lo tanto la fuerza que actúa en el eje vertical sobre la superficie de corte y en sentido contrario al de la reacción se denomina fuerza de corte vertical (V).

Adicionalmente la fuerza de corte y la reacción generan un par (M) que predispone a la sección a girar en sentido horario.



a)

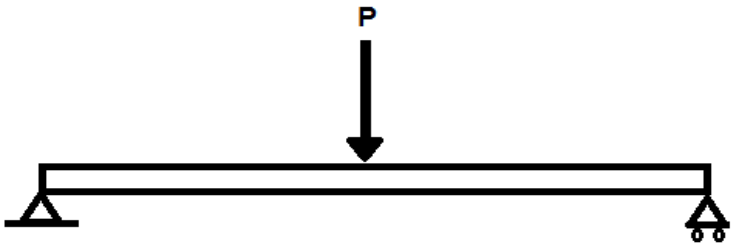


b)

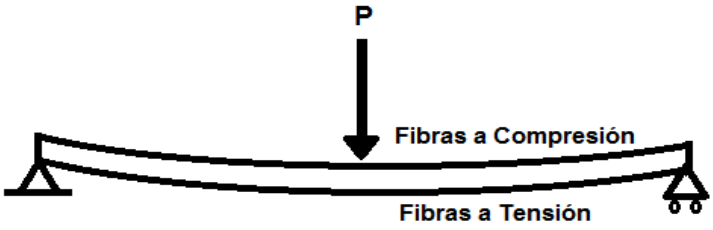
Figura 6: Fuerza cortante.

Para anular el par previamente mencionado en la sección de corte debe existir otro par contrario al primero, por lo tanto deberá actuar en sentido anti horario y toma el nombre de momento flexionante interno.

Al aplicar la carga P en la viga de la Figura 7, esta tiende a flejar por lo tanto el sin número de fibras del material de la viga se someten a dos fuerzas, las fibras de la parte superior de la viga estarán sometidas a compresión y las fibras de la parte inferior de la misma estarán sometidas a tensión (si la carga se aplica en la dirección mostrada en la Figura 7), por lo tanto el momento flexionante interno de la viga es el resultado de la acción conjunta de los pares generados por la acción de las fuerzas previamente mencionadas actuantes sobre las fibras del material de la viga.



a)



b)

Figura 7: Momento flexionante.

2.4 ESFUERZOS EN LAS VIGAS Y RADIO DE CURVATURA

En el presente proyecto se pretende estudiar los esfuerzos cortantes y flectores presentes en una viga de material dúctil cargada transversalmente, para lo cual es necesario determinar a partir de que longitud de viga actúan los esfuerzos cortantes puros, los esfuerzos flectores puros y una mezcla de ambos, consecuentemente se aplicará la relación planteada por S. Timoshenko que se cita en el capítulo 1.1.

2.4.1 ESFUERZOS CORTANTES

Los esfuerzos cortantes en un elemento estructural según Mott pueden ser causados por:

- Cortante Directo
- Cortante Vertical

El resultado de los esfuerzos cortantes sobre un elemento estructural es cortar mencionado elemento (actúan en el rango plástico del material ya que el corte es una deformación permanente), dichos esfuerzos siempre serán dos pares de esfuerzos iguales que se aplican sobre los cuatro lados del elemento en cuestión.

2.4.1.1 CORTANTE DIRECTO

La fórmula que se emplea para determinar el esfuerzo cortante en vigas está dada por la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{P}{A} \qquad [2]$$

donde:

τ: esfuerzo cortante. [lb/plg^2]; [Pa]

P: fuerza cortante. [lb]; [N]

A: área sobre la cual actúa la fuerza cortante. [plg^2]; [m^2]

La fórmula mencionada previamente es aplicable en cortante simple, es decir, cuando la probeta tiene un solo punto de apoyo; análogamente al tener cortante doble (dos puntos de apoyo) la fuerza se divide para dos.

$$\tau = \frac{P}{2 * A} \qquad [3]$$

2.4.1.2 CORTANTE VERTICAL

El cortante vertical generalmente se aplica en vigas largas que presentan fuerzas cortantes y momentos flexionantes.

La fórmula que se emplea para determinar el esfuerzo cortante vertical en vigas está dada por la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{VQ}{It} \qquad [4]$$

donde:

V: esfuerzo cortante máximo. [lb]; [N]

Q: primer momento con respecto al eje centroidal del área de la sección transversal. [plg^3]; [m^3]

I: momento de inercia rectangular de la sección transversal. [plg^4]; [m^4]

t: espesor del perfil en el lugar de análisis. [plg]; [m]

$$Q = A_p \bar{y} \qquad [5]$$

donde:

A_p: área de la sección arriba del lugar en el que se va a calcular el esfuerzo cortante. [plg^2]; [m^2]

$\bar{y}$: distancia del eje neutro de la sección al centroide del área A_p.

El esfuerzo cortante vertical varía de acuerdo a y, tomando su valor máximo en el eje neutro para el cual $y = 0$ y su valor mínimo (cero) en las fibras exteriores del elemento estructural donde $Q = A = 0$.

2.4.2 ESFUERZOS FLEXIONANTES

2.4.2.1 FLEXIÓN DE VIGAS EN EL RANGO ELÁSTICO

La fórmula que se emplea para determinar el esfuerzo flector en vigas según Fitzgerald está dada por la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{M * c}{I} \qquad [6]$$

donde:

σ: esfuerzo en las fibras extremas de la viga. [lb/plg^2]; [Pa]

M: momento flexionante interno en la viga. [lb-plg]; [N.m]

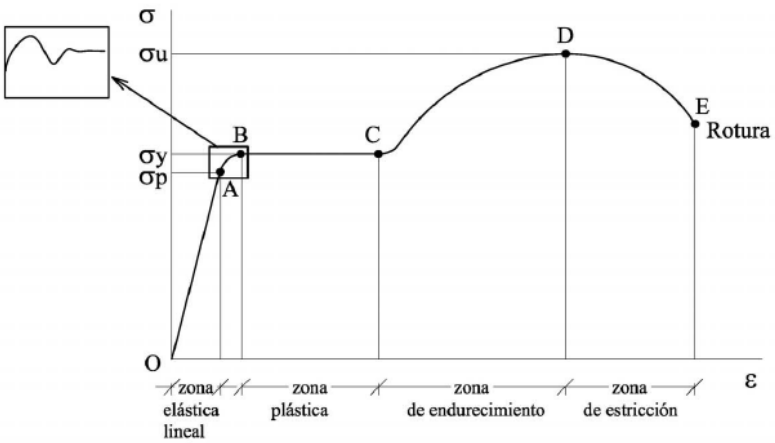
I: momento de inercia de la sección transversal de la viga. [plg^4]; [m^4]

c: distancia desde el eje neutro de la viga hasta las fibras extremas. [plg]; [m]

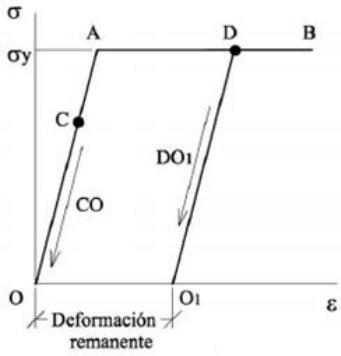
Para emplear la fórmula del esfuerzo de flexión es necesario considerar que la viga originalmente es recta y su sección transversal es constante siempre incluso al aplicar la carga, al aplicar la carga no existe torsión en la viga, todos los esfuerzos presentes en la viga son menores que el esfuerzo de fluencia del material de la viga, el módulo de elasticidad es igual para todas las fibras de la viga ya sea que estén sometidas a tensión o a compresión, la porción de la viga sometida a compresión no tiene movimiento lateral, las fuerzas de tensión y compresión de la viga deben actuar en un eje paralelo al eje principal de la misma y atravesar el eje neutro, y las secciones planas se conservan planas incluso después de la flexión.

2.4.2.2 FLEXIÓN DE VIGAS EN EL RANGO PLÁSTICO

El análisis de flexión de vigas en el rango plástico desarrollado por Dalmau y Vilardell requiere tener en cuenta que el material del elemento estructural en cuestión es elastoplástico perfecto.



a)



b)

Figura 8: Flexión en el rango plástico. (Fuente: Dalmau M. R. & Vilardell J., 2003)

En la Figura 8 a) se tiene un diagrama del ensayo de tracción de un acero estructural en el cual se pueden apreciar las distintas zonas que atraviesa un material antes de romperse:

- Zona Elástica.- rango en el cual el material sometido a carga se deforma de acuerdo con la ley de Hooke pero recobra sus dimensiones originales al retirar la carga.
- Zona de Transición.- es el cambio desde el rango elástico al rango plástico.
- Zona Plástica.- en esta zona el material sufre deformaciones permanentes (deformaciones remanentes) con carga constante, es decir, la deformación permanece incluso después de retirar la carga.
- Zona de Endurecimiento por Deformación.- el comportamiento del material es de carácter plástico pero requiere mayor carga para seguir deformándose. El material alcanza un sigma máximo (σ) al final de esta zona.
- Zona de Estricción.- el material a partir del sigma máximo continúa con su alargamiento con una reducción de área en el punto en el que se dará la fractura.

En la Figura 8 b) se puede observar el comportamiento elastoplástico perfecto del material, entonces la curva OAD de la Figura 8 b) es una ampliación de la curva OBC de la Figura 8 a), ambas curvas entonces son representaciones del rango elástico y plástico del material.

Respecto a la Figura 8 b) un material con comportamiento elastoplástico que es sometido a carga y posteriormente es descargado dentro del rango elástico en el punto C no presenta deformación permanente (remanente), ahora si al mismo material se le aplica carga y posteriormente es descargado dentro del rango plástico en el punto D el material presenta una deformación remanente OO_1.

Si el material se somete nuevamente a carga a partir del punto O_1 se tiene que el rango elástico corresponde a la recta O_1D y el rango plástico empieza desde el punto D. Consecuentemente se dice que el material no se ha endurecido por deformación ya que tanto el punto A como el D tienen el mismo esfuerzo de fluencia.

Para definir el esfuerzo flector en el rango plástico es necesario suponer una viga con las siguientes restricciones (ver Figura 9):

- Sección rectangular de altura h y base b.
- Material elastoplástico perfecto.
- En el elemento existe flexión pura y su momento flector M incrementa gradualmente desde cero.

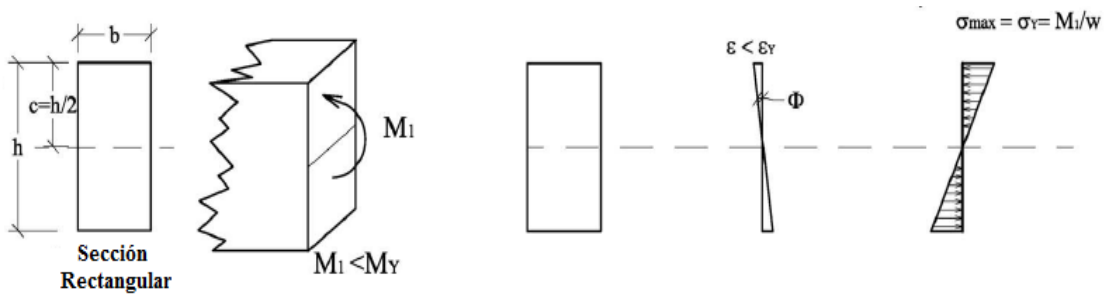


Figura 9: Viga rectangular sometida a flexión pura. (Fuente: Dalmau M. R. & Vilardell J., 2003)

Cuando el momento M llega a ser igual al momento de fluencia M_y sucede que en las fibras de los extremos empieza a aparecer la cesión plástica donde $\sigma = \sigma_y$ y $\varepsilon = \varepsilon_y$. La ecuación 6 es aplicable en el rango elástico por lo que el momento de fluencia está dado por:

$$M_y = \sigma_y * \frac{I}{c} \qquad [7]$$

Es necesario mencionar que el módulo de resistencia W se define como:

$$W = \frac{I}{c} \qquad [8]$$

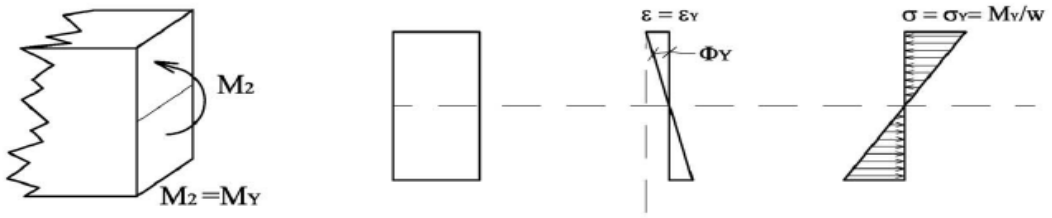


Figura 10: Momento de fluencia sobre la viga rectangular. (Fuente: Dalmau M. R. & Vilardell J., 2003)

Si el momento M continúa incrementándose hasta superar el valor de M_y las deformaciones unitarias del elemento en cuestión también se incrementarán, pero el esfuerzo máximo seguirá siendo σ_y debido a la propiedad mencionada previamente con la que cuentan los materiales elastoplásticos perfectos. Consecuentemente se tiene que las fibras externas de la viga se comportan plásticamente mientras que las fibras centrales tienen un comportamiento elástico.

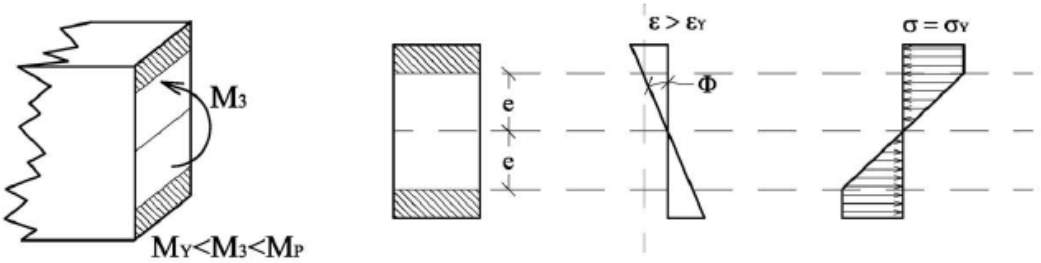


Figura 11: Núcleo elástico. (Fuente: Dalmau M. R. & Vilardell J., 2003)

A medida que el momento flector incrementa las zonas plastificadas de la sección del elemento en análisis también incrementan en dirección al eje neutro de la sección, consecuentemente el núcleo elástico se reduce hasta desaparecer.

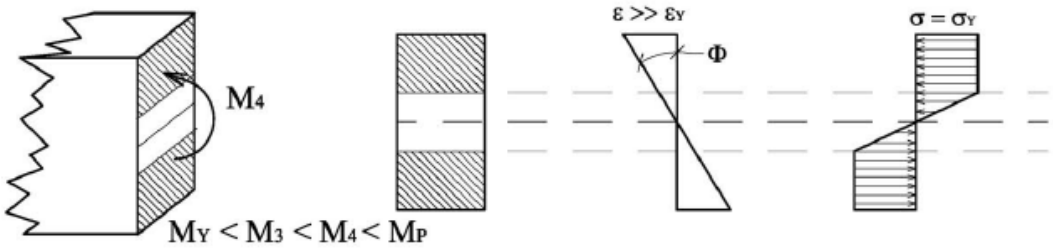


Figura 12: Incremento de la zona plastificada y desaparición del núcleo elástico. (Fuente: Dalmau M. R. & Vilardell J., 2003)

Cuando la sección se ha plastificado por completo su momento flector se denomina momento plástico M_p y es producido debido a la carga de agotamiento (capacidad última de resistir esfuerzos).

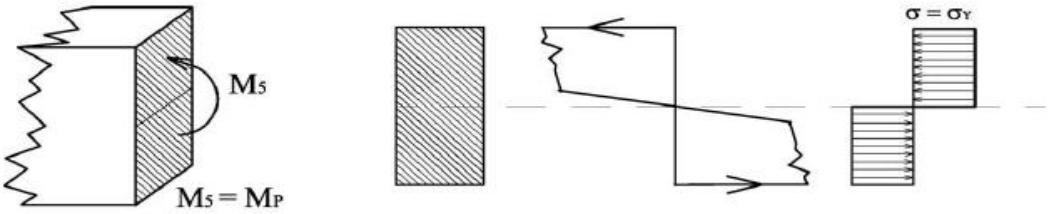


Figura 13: Sección totalmente plastificada. (Fuente: Dalmau M. R. & Vilardell J., 2003)

Es necesario mencionar que la sección plastificada en su totalidad presenta una distribución rectangular de esfuerzos, esto es evidente en la Figura 13, equivalente a un par de fuerzas con momento M_p.

En la distribución de esfuerzos mostrada en la Figura 13 la mitad superior corresponde a los esfuerzos de compresión y la mitad inferior a los esfuerzos de tracción en la sección en análisis.

La resultante P de los esfuerzos tanto de compresión como de tracción tiene el mismo valor y se define en la siguiente ecuación:

$$P = \sigma_y \frac{bh}{2} \qquad [9]$$

Las dos resultantes aplicadas sobre la sección en cuestión generan un momento cuya distancia está dada por $c = \frac{h}{2}$ (ver Figura 9), consecuentemente el momento plástico se define como:

$$M_p = P\frac{h}{2} \;\; ; \;\; M_p = \sigma_y \frac{bh^2}{4} \qquad [10]$$

Al dividir M_p para M_y se obtiene el factor de forma f, el mismo que en función de la geometría de la viga presenta el incremento porcentual de la capacidad de carga que la sección obtiene al plastificarse.

Para la viga rectangular motivo del presente análisis la inercia de la sección y c son:

$$I = \frac{bh^3}{12} \;\; ; \;\; c = \frac{h}{2} \qquad [11]$$

M_p está definido por la ecuación 10 y M_y por la ecuación 7, entonces reemplazando los valores de I y c en la ecuación 7, el factor de forma de la sección rectangular es:

$$f = \frac{M_p}{M_y} = \frac{\sigma_y \frac{bh^2}{4}}{\sigma_y \frac{\frac{bh^3}{12}}{\frac{h}{2}}} = \frac{12\sigma_y bh^3}{8\sigma_y bh^3} = 1.5 \qquad [12]$$

Finalmente se concluye del factor de forma que al plastificarse la sección rectangular de la viga se obtiene 50% de incremento en la capacidad de carga de la misma.

Análogamente se realiza el mismo análisis para obtener las fórmulas de P, M_p y f para la sección circular sabiendo que:

$$Inercia = I_{círculo} = \frac{1}{4}\pi r^4 \qquad [13]$$

$$c_{círculo} = \frac{\emptyset}{2} = r \qquad [14]$$

donde:

r: radio de la sección circular.

Entonces las ecuaciones de flexión plástica en una sección circular son:

Resultante P:

$$P_{circular} = \sigma_y \frac{\pi r^2}{2} \quad [15]$$

Momento Plástico M_p:

$$M_{p_{circular}} = Pr \ ; \ M_{p_{circular}} = \sigma_y \frac{\pi r^3}{2} \quad [16]$$

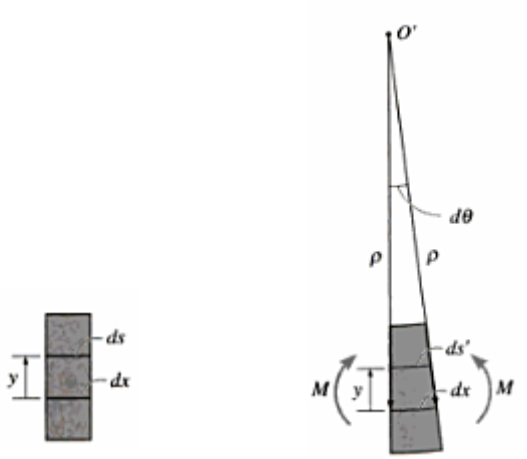
Factor de Forma f:

$$f_{circular} = \frac{M_{p_{circular}}}{M_{y_{circular}}} = \frac{\sigma_y \frac{\pi r^3}{2}}{\sigma_y \frac{\frac{1}{4}\pi r^4}{r}} = \frac{4\sigma_y \pi r^4}{2\sigma_y \pi r^4} = 2 \quad [17]$$

2.4.3 RADIO DE CURVATURA

Según Hibbeler el radio de curvatura (ρ) se relaciona estrechamente al momento interno (M) en una viga sometida a flexión pura. Para plantear la relación previamente mencionada se considera una viga recta de sección rectangular, esta viga será sometida a una carga transversal (perpendicular al eje x), consecuentemente la viga sufre una deformación causada por la fuerza cortante interna y por el momento flector interno. Es necesario

mencionar que se analizará el caso en el cual la deformación de la viga se deba principalmente a la influencia del momento flector.



a) **b)**

Figura 14: Radio de curvatura. (Fuente: Hibbeler R.C., 2006)

En la Figura 14 a) se aprecia la sección de la viga rectangular antes de la deformación. Una vez que la viga se ha deformado debido a la carga aplicada la sección se deforma también como se puede ver en la Figura 14 b).

En la sección deformada mostrada en la Figura 14 b) los lados verticales de la sección que inicialmente eran paralelos entre sí, ahora forman una variación angular $d\theta$. El eje neutro de la sección está representado por dx, cualquier fibra de la sección que no pase por el eje neutro sufre deformaciones unitarias normales. Entonces la longitud entre el centro de curvatura O' y dx viene a ser el radio de curvatura.

El arco ds se ha desfasado del eje neutro una distancia y, por lo tanto su deformación unitaria está dada por:

$$\epsilon = \frac{(ds' - ds)}{ds} \quad [18]$$

Trigonométricamente se sabe que:

$$ds = dx = \rho \, d\theta \quad [19]$$

También se tiene:

$$ds' = (\rho - y) \, d\theta \quad [20]$$

Al reemplazar 19 y 20 en 18 se tiene:

$$\epsilon = \frac{[(p - y)d\theta - \rho \, d\theta]}{\rho \, d\theta} \quad [21]$$

Se realizan las operaciones para obtener:

$$\epsilon = \frac{[p \, d\theta - y \, d\theta - \rho \, d\theta]}{\rho \, d\theta} = \frac{-y \, d\theta}{\rho \, d\theta} \quad [22]$$

Despejando se tiene:

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{\epsilon}{y} \quad [23]$$

La ley de Hooke es aplicable para todo material homogéneo y cuyo comportamiento sea lineal – elástico, por lo que:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad [24]$$

Se sabe que la flexión se define como:

$$\sigma = -\frac{My}{I} \qquad [25]$$

Finalmente se reemplaza 24 y 25 en 23:

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{\frac{\sigma}{E}}{y} = -\frac{\frac{-\frac{My}{I}}{E}}{y}$$

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{-\frac{My}{EI}}{y} = \frac{My}{EIy}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \qquad [26]$$

donde:

ρ: radio de curvatura.

M: momento interno de la viga en el punto de análisis del radio de curvatura.

E: módulo de elasticidad del material de la viga.

I: momento de inercia de la sección transversal respecto al eje neutro.

En la ecuación 26 el producto EI se denomina rigidez flexionante y es un valor positivo, entonces el signo del radio de curvatura depende del signo del momento.

2.5 ENERGÍA DE DEFORMACIÓN

Las teorías de energías de deformación debida al cortante y debida al flector se describen a continuación teniendo en cuenta lo mencionado por Cernica.

2.5.1 ENERGÍA DE DEFORMACIÓN DEBIDA AL CORTANTE

En el análisis de la energía de deformación debida al cortante se supone un elemento estructural en el que se aplica corte puro, entonces la energía de deformación por unidad de volumen se expresa como:

$$u = \frac{\tau^2}{2G} \qquad [27]$$

donde:

τ: esfuerzo cortante.

G: módulo de corte o módulo de rigidez.

γ: deformación unitaria cortante.

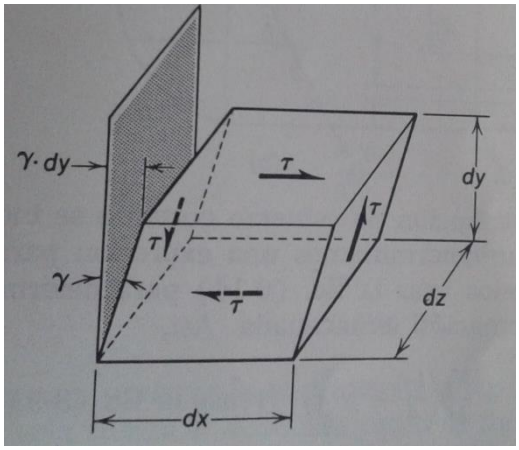


Figura 15: Elemento sometido a cortante puro. (Fuente: Cernica John N.)

2.5.2 ENERGÍA DE DEFORMACIÓN DEBIDA A LA FLEXIÓN

Para el respectivo análisis de la energía de deformación debida a la flexión es necesario suponer un segmento pequeño de viga en el cual se aplica flexión pura.

La energía de deformación que almacena la viga es el trabajo que genera el momento al girar un ángulo θ, este trabajo se define como el área bajo la curva en el diagrama $M - \theta$, entonces la energía de deformación debida a la flexión se define como:

$$U = \frac{M^2 l}{2EI} \text{ ó } \frac{\theta^2 EI}{2l} \qquad [28]$$

donde:

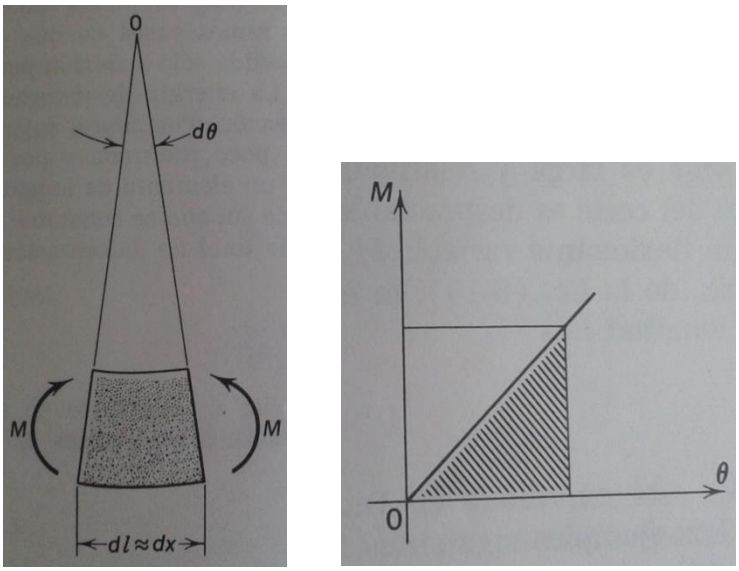
M: momento flector.

l: longitud.

E: módulo de elasticidad.

I: momento de inercia de área.

θ: desplazamiento angular.



a) **b)**

Figura 16: Deformación debida a la flexión. (Fuente: Cernica John N.)

En la Figura 16 a) se observa un segmento de viga sometido a un par de momentos, lo que significa que el segmento está sometido a flexión pura, y la Figura 16 b) muestra el diagrama $M - \theta$.

Riley menciona que en base a los métodos de energías de deformación debidas tanto al esfuerzo cortante como al esfuerzo flector se ha determinado que la influencia tanto del esfuerzo cortante como del flector en la falla de la viga depende de la relación h/L de la viga en cuestión. Siendo h el peralte de la viga rectangular y L la longitud de la misma, esto se muestra en la Figura 17.

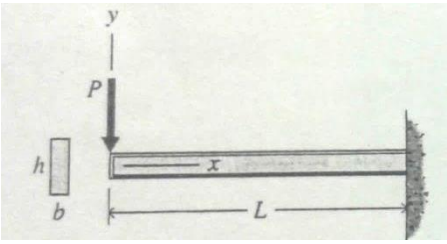


Figura 17: Viga en cantiliver de sección rectangular. (Fuente: Riley, 2001)

Entonces si se tiene una viga corta y de peralte considerable, es decir, la viga tiene una relación h/L=1/5, se tiene un error del 3% si no se considera la energía de deformación debida al esfuerzo cortante. En una viga larga y esbelta con relación h/L=1/10, dicho error sería del 1%. En conclusión la energía de deformación debida al esfuerzo cortante se debe tomar en cuenta únicamente cuando se trata de una viga corta y de gran peralte.

2.6 ENSAYOS DE CORTANTE Y FLEXIÓN

2.6.1 ENSAYO DE CORTANTE

El ensayo de esfuerzo cortante se realiza colocando la probeta de tal manera que actúen sobre ella la fuerza aplicada por el punzón y la fuerza de reacción del apoyo; el cortante doble en cambio tendrá dos reacciones.

El montaje para el ensayo de cortante doble se muestra en la siguiente figura, este montaje se empleará en el desarrollo del presente proyecto.

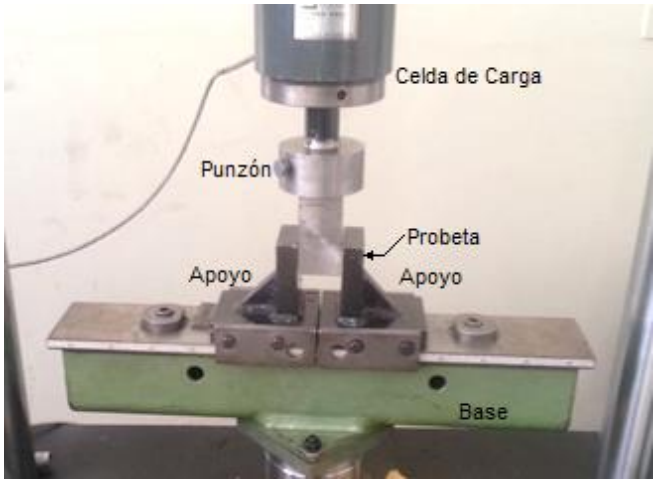


Figura 18: Esquema del montaje para ensayo de corte.

2.6.2 ENSAYO DE FLEXIÓN

El ensayo de doblado de materiales dúctiles se especifica en la norma ASTM E-290 – Ensayo de Flexión para la Ductilidad de Metales. En mencionada norma se encuentran todas las consideraciones y especificaciones que se deben tomar en cuenta al realizar el ensayo de doblado.

El ensayo de doblado consiste en colocar la probeta sobre dos apoyos de rodillo y aplicar la carga en el centro de la misma mediante un punzón, la distancia entre los apoyos está normada y se muestra en la siguiente figura. Una vez el elemento de prueba haya sido doblado se realiza el análisis

respectivo, y los resultados pueden compararse con las recomendaciones existentes en la norma.

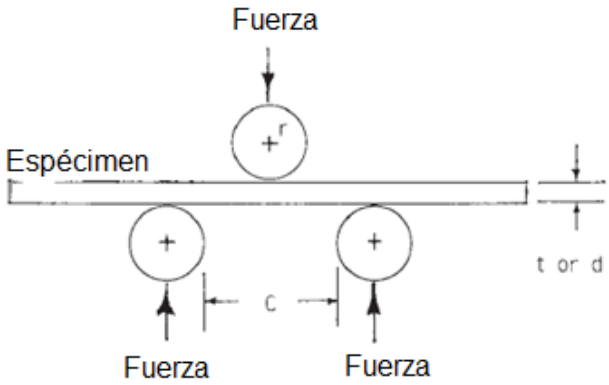


Figura 19: Esquema del ensayo de flexión. (Fuente: Norma ASTM E-290, 1997)

La ecuación para determinar la distancia entre apoyos se cita a continuación:

$$C = 2r + 3t \pm \frac{t}{2} \qquad [29]$$

donde:

C: distancia entre apoyos.

r: radio del punzón.

t: espesor de la probeta.

d: diámetro de la probeta (circular).

2.7 DISEÑO EXPERIMENTAL

2.7.1 DEFINICIÓN

El diseño de experimentos según Gutiérrez y de la Vara es un proceso lógico y ordenado de planeación y ejecución de pruebas realizadas a un conjunto de especímenes a fin de obtener datos para su posterior análisis estadístico con el objetivo de obtener información útil, verás y capaz de esclarecer las incógnitas que se tiene acerca del objeto de estudio.

La estadística dentro del diseño experimental permite que la adquisición de datos sea lo más eficiente posible. La experimentación es un proceso interactivo entre la teoría y los datos obtenidos en la práctica, así también es un proceso de retroalimentación capaz de generar conocimiento.

2.7.2 GLOSARIO BÁSICO

- Experimento: es toda modificación sobre los parámetros normales de funcionamiento de un sistema a fin de evaluar las consecuencias de dichas modificaciones sobre el producto del sistema.
- Variable de Respuesta (y): es la variable que expresa los efectos de la prueba experimental, es decir, son las salidas del proceso.
- Factores Controlables (x): son las variables de entrada del proceso y pueden fijarse en un determinado nivel.
- Factores No Controlables: son las variables que no se pueden controlar.
- Factores Estudiados: son las variables que se van a estudiar para determinar su influencia en las variables de respuesta, el factor estudiado debe analizarse como mínimo en dos niveles durante el experimento.
- Niveles: son los distintos valores asignados a cada factor estudiado dentro del diseño experimental.
- Tratamiento: es la combinación de niveles de todos los factores estudiados.
- Error Aleatorio: es la variabilidad presente en la respuesta debida a los factores no controlables y al error experimental.

- Error Experimental: es la suma de los errores cometidos por el experimentador al planificar y llevar a cabo el experimento.
- Matriz de Diseño: es el arreglo formado por los tratamientos y el número de repeticiones de los mismos.

2.7.3 ETAPAS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

- **Planeación y Realización**

  La planeación del experimento comprende:

  1. Entender y delimitar el problema de estudio.
  2. Determinar variables de respuesta y confirmar si son medibles.
  3. Determinar los factores de estudio de acuerdo a su influencia sobre la respuesta.
  4. Seleccionar los niveles de cada factor, el diseño experimental adecuado y definir el número de repeticiones (considerando la disponibilidad de recursos económicos, tiempo y precisión requerida).
  5. Planear y organizar el trabajo experimental.
  6. Realizar el experimento.

- **Análisis**

  Hace referencia al análisis estadístico de los datos obtenidos en el experimento.

- **Interpretación**

  La interpretación es un análisis detallado del experimento y de los resultados del análisis estadístico.

- **Conclusiones**

  Es necesario elaborar un resumen de los resultados obtenidos y verificar si se cumplieron los objetivos planteados al inicio de la investigación.

2.7.4 PRINCIPIOS BÁSICOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

Los principios básicos del diseño experimental son la aleatorización que hace referencia a que las corridas de los tratamientos y la elección de las muestras deben ser al azar para que las variaciones inferidas a los factores no controlables sean homogéneas en todos los especímenes de prueba, la repetición menciona que cada tratamiento debe realizarse más de una vez, y el bloqueo con el cual se descarta o se incluye los factores que influyen en la respuesta.

2.7.5 EFECTO DE LOS FACTORES

Al hablar del efecto de un factor se hace referencia a la variación que se presenta en la variable de respuesta debido al nivel del factor.

Los factores pueden presentar dos tipos de efectos sobre la variable de respuesta, estos efectos son:

- Efecto Principal: es la variación de la variable de respuesta debido a la influencia particular de cada factor.
- Efecto de Interacción: es la interrelación entre dos factores y como esta influye en la variable de respuesta.

2.7.6 DISEÑO FACTORIAL

La clasificación de los diseños experimentales se realiza de acuerdo a los elementos que influyen en la selección del tipo de diseño experimental más adecuado para tratar el problema en estudio.

El objetivo del experimento, el número de factores, el número de niveles de cada factor, la relación factor – respuesta (efecto que cada factor tiene sobre la variable de respuesta), costo del experimento, tiempo de investigación y precisión en la respuesta son los elementos que se deben

considerar al seleccionar el diseño experimental que se utilizará para analizar el objeto de estudio y obtener una respuesta satisfactoria.

En consideración de los argumentos previamente expuestos se ha escogido el Diseño Factorial para el análisis del presente proyecto.

2.7.7 MODELO ESTADÍSTICO PARA EL DISEÑO FACTORIAL CON DOS FACTORES

En el diseño factorial con dos factores A y B, el modelo estadístico se define mediante la siguiente expresión:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \qquad [30]$$
$$i = 1, 2, \dots, a$$
$$j = 1, 2, \dots, b$$
$$k = 1, 2, \dots, n$$

donde:

μ = media general.

α_i = efecto del nivel i-ésimo del factor A.

β_j = efecto del nivel j-ésimo del factor B.

$(\alpha\beta)_{ij}$ = efecto de interacción al combinar ij.

ε_{ijk} = error aleatorio con distribución normal y varianza constante.

Todos los efectos del diseño experimental cumplen la restricción de sumar cero, ya que son desviaciones relacionadas con la media general μ.

$$\sum_{i=1}^{a} \alpha_i = 0\,;\ \sum_{j=1}^{b} \beta_j = 0\,;\ \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b} (\alpha\beta)_{ij} = 0 \qquad [31]$$

2.7.7.1 HIPÓTESIS Y ANÁLISIS DE VARIANZA

En el presente diseño factorial 3x2 (axb) se pueden estudiar tres efectos: A, B y AB, por lo tanto se plantean tres hipótesis nulas: H_0: Efecto A = 0, H_0: Efecto B = 0 y H_0: Efecto AB = 0, cada una de las cuales tiene su correspondiente hipótesis alternativa.

El análisis de varianza (ANOVA) para probar las hipótesis está dado en la Tabla 3.

Tabla 3

ANOVA para el diseño factorial con dos factores

FV	SC	GL	CM	F_0	Valor-p
Efecto A	SC_A	a – 1	CM_A	CM_A/CM_E	$P(F>F_0^A)$
Efecto B	SC_B	b – 1	CM_B	CM_B/CM_E	$P(F>F_0^B)$
Efecto AB	SC_{AB}	(a – 1)(b – 1)	CM_{AB}	CM_{AB}/CM_E	$P(F>F_0^{AB})$
Error	SC_E	ab(n – 1)	CM_E		
Total	SC_T	abn – 1			

(Fuente: Gutiérrez Pulido Humberto & De la Vara Salazar Román)

donde:

FV = efecto o fuente de variabilidad.

SC = suma de cuadrados.

GL = grados de libertad.

CM = cuadrado medio.

F_0 = estadístico de prueba.

valor-p = significancia observada.

El factor $(n-1)$ correspondiente al cálculo de los grados de libertad del error indica que el experimento debe tener mínimo dos réplicas para poder realizar el análisis de varianza ANOVA.

Cabe mencionar que el análisis de varianza (ANOVA) supone que la variable de respuesta tiene distribución normal, su varianza es constante y que las mediciones cumplen el supuesto de independencia.

Si el valor-p de un efecto es menor al valor alfa prefijado entonces la hipótesis nula se rechaza concluyendo que el correspondiente efecto está activo, es decir, influye en la variable de respuesta. Para analizar las hipótesis y desarrollar el análisis de la varianza del presente proyecto de investigación se fija el valor de alfa (factor de riesgo) en $\alpha = 0.05$.

El valor-p es el área bajo la curva de la distribución $F_{GL_{efecto},GL_{error}}$ a la derecha de F_0, este cálculo es difícil, por lo cual en el presente proyecto se empleará otra forma de aceptar o rechazar la hipótesis nula, en la cual se compara el valor del estadístico de prueba F_0 con los valores de F tomados de la Tabla A4 – Puntos críticos al 5% de la distribución F de Fisher, P(X>x) = 0.05 que se muestra como Anexo A tomada del texto Análisis y Diseño de Experimentos de Humberto Gutiérrez Pulido y Román de la Vara Salazar.

Las ecuaciones necesarias para llenar la Tabla 3 se expresarán con notación de puntos. Entonces tenemos que:

Suma Total de Cuadrados:

$$SC_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n} Y_{ijk}^2 - \frac{Y_{...}^2}{N} \qquad [32]$$

donde:

$Y_{...}$ = suma de todas las observaciones.

$N = abn$, es el total de observaciones en el experimento.

Suma de Cuadrados de los Efectos

$$SC_A = \sum_{i=1}^{a} \frac{Y_{i..}^2}{bn} - \frac{Y_{...}^2}{N} \quad [33]$$

$$SC_B = \sum_{j=1}^{b} \frac{Y_{.j.}^2}{an} - \frac{Y_{...}^2}{N} \quad [34]$$

$$SC_{AB} = \sum_{i=1}^{a} \sum_{j=1}^{b} \frac{Y_{ij.}^2}{n} - \frac{Y_{...}^2}{N} - SC_A - SC_B \quad [35]$$

donde:

$Y_{...}$ = suma de todas las observaciones.

$\bar{Y}_{...}$ = media global.

$Y_{i..}$ = total en el nivel i del factor A.

$\bar{Y}_{i..}$ = media en el nivel i del factor A.

$Y_{.j.}$ = total en el nivel j del factor B.

$\bar{Y}_{.j.}$ = media en el nivel j del factor B.

Suma de Cuadrados del Error

$$SC_E = SC_T - SC_A - SC_B - SC_{AB} \quad [36]$$

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL ENSAYO

3.1 DISEÑO DEL ACCESORIO

Es necesario realizar ensayos de corte en las vigas mencionadas en el capítulo 1 para determinar la influencia que tiene el esfuerzo cortante sobre dichos elementos estructurales, para lo cual se debe contar con un accesorio capaz de generar las condiciones óptimas para el desarrollar del ensayo.

3.1.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Los siguientes aspectos deben considerarse al momento de diseñar el accesorio:

- La carga se aplicará transversalmente sobre la viga.
- La longitud de las vigas será variable con el fin de mantener la aplicación de la carga en el centro de la viga e incrementar la luz existente entre los apoyos y el punto de aplicación de la carga, por lo tanto los apoyos podrán desplazarse.
- Es necesario que la carga se distribuya uniformemente sobre la sección de la viga.
- El accesorio y su diseño no deberán sesgar, inducir, ni coadyuvar con la falla de las vigas.
- El diseño del accesorio debe realizarse considerando que se utilizarán elementos y acoples ya existentes en el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.
- El accesorio permitirá ensayar vigas circulares y cuadradas, y de dimensiones variables.

- El accesorio deberá ser diseñado para operar en la Máquina de Ensayos Universal MTS 810-14-2 o en la Máquina de Ensayos Universal AMSLER existentes en el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- La vida útil del accesorio deberá ser tal que se puedan llevar a cabo todas las corridas experimentales, sin que este falle.

Figura 20: Accesorios del laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

3.1.2 COMPONENTES DEL ACCESORIO

El accesorio a diseñarse está conformado por:

- Dos apoyos, uno para cada extremo de la viga.
- Un punzón, con el cuál se aplicará la carga a la viga.
- Elemento de acople del punzón a la celda de carga de la Máquina de Ensayos Universal MTS 810-14-2 y a la Máquina de Ensayos Universal AMSLER.
- Dados de corte intercambiables con sección variable de acuerdo a la sección de las vigas a ensayar mencionadas en el capítulo 1.

3.1.3 GEOMETRÍA DEL ACCESORIO

Una de las consideraciones de diseño del accesorio menciona que este debe tener la capacidad de variar la longitud total de la viga, por lo tanto los apoyos deben ser móviles y al mismo tiempo tener cierto anclaje a fin de fijarlos en la posición requerida para realizar el ensayo.

Es así que se utilizará la base y las placas de sujeción existentes en el laboratorio de Mecánica de Materiales empleadas para la realización de ensayos de doblado, las mismas que permiten variar la longitud de viga y anclar los apoyos en la longitud requerida. Por lo tanto la base y las placas de sujeción otorgan las primeras restricciones geométricas y dimensionales de los apoyos.

Por motivos estéticos tanto los apoyos como el punzón tendrán la misma geometría (rectangular).

Debido a que la sección de las vigas a ensayar cambia en dimensión y en geometría, se emplearán dados de corte intercambiables en los apoyos y el punzón para poder variar la sección de las vigas.

Los apoyos y el punzón tendrán una ranura con dimensión constante en la cual se alojarán los dados de corte, estos últimos contarán con ranuras cuya sección será igual a la sección de las vigas a ensayar.

La geometría de los dados de corte será circular debido a la existencia de ejes de toda dimensión, disponibilidad del material en el mercado y a la maquinabilidad de los mismos.

3.1.4 MATERIALES DEL ACCESORIO

Los materiales del accesorio deben ser capaces de trabajar satisfactoriamente bajo la condición más crítica, es así que se los debe seleccionar de acuerdo a la función del elemento, propiedades mecánicas,

maquinabilidad, existencia en el mercado y factibilidad económica para su adquisición.

3.1.4.1 DADOS DE CORTE

Los dados de corte son el elemento más crítico del accesorio ya que están en contacto directo con la viga y su función es realizar el corte de la misma, por lo tanto el material de los dados de corte debe ser lo suficientemente resistente, contar con buenas propiedades mecánicas, alta dureza y ser tenaz para no fallar durante la realización de los ensayos y al mismo tiempo ser capaz de cumplir satisfactoriamente su función.

Consecuentemente los materiales considerados para fabricar los dados de corte son aceros para trabajo en frío.

Los aceros aleados para trabajo en frío generalmente se emplean en trabajos que no sobrepasen los 200ºC de temperatura, sus propiedades mecánicas son alta dureza, alta resistencia al desgaste, buena tenacidad, buena maquinabilidad, alta resistencia al impacto, baja variación dimensional al ser sometidos a tratamientos térmicos; dichas propiedades son deseables en los dados de corte de acuerdo a la función que van a realizar.

Para elegir el acero más conveniente de acuerdo a los requerimientos operacionales de los dados de corte se desarrolló una matriz de decisión, la misma que se detalla en las tablas 4 y 5.

Se han analizado los siguientes aceros para trabajo en frío:

- Acero AISI S1 – K 455
  El acero K 455 presenta alta resistencia al impacto y a la compresión, alta resistencia al desgaste, alta tenacidad, principalmente se usa en herramientas para corte de chapa gruesa en matrices, punzones y cizallas, en herramientas de cuñado y en herramientas neumáticas. Dureza HRC 58-62.

- Acero AISI O1 - K 460

  El acero K 460 comúnmente conocido como DF-2 es un acero indeformable, cuenta con alta tenacidad y alta eficacia en el corte, principalmente se emplea en herramientas de corte, de embutición, de tallado de roscas, estampado, cuchillas, calibres y en insertos de moldes para inyección de plásticos. Dureza HRC 63-65.

El detalle de las especificaciones técnicas de los aceros previamente mencionados se encuentra en el Anexo B.

Tabla 4

Combinex matrix

Ord.	Criterios de Valoración	1	2	3	4	5	6	7	∑	WF
1	Dureza	-	0.5	1	1	1	1	1	5.5	0.26
2	Resistencia al desgaste y al impacto	0.5	-	1	1	1	1	1	5.5	0.26
3	Aplicación			-	1	1	1	1	4	0.19
4	Maquinabilidad				-	0.5	1	1	2.5	0.12
5	Disponibilidad				0.5	-	1	1	2.5	0.12
6	Costo						-	1	1	0.05
								∑	21	1

Valores del factor de ponderación (PF) para la matriz de decisión.

Bajo = 1

Medio = 3

Alto = 5

Alternativas.

Alternativa 1 = Acero K 455

Alternativa 2 = Acero K 460

Tabla 5

Matriz de decisión

			Alternativas			
			Alt. 1		Alt. 2	
Ord.	**Criterios de Valoración**	**WF**	**PF**	**P**	**PF**	**P**
1	Dureza	0.26	5	1.3	5	1.3
2	Resistencia al desgaste y al impacto	0.26	5	1.3	3	0.78
3	Aplicación	0.19	5	0.95	3	0.57
4	Maquinabilidad	0.12	5	0.6	5	0.6
5	Disponibilidad	0.12	5	0.6	5	0.6
6	Costo	0.05	3	0.15	5	0.25
	∑	**1**		**4.9**		**4.1**

donde:

WF = factor de peso.

PF = factor de ponderación.

P = ponderación.

De acuerdo con la matriz de decisión el acero más adecuado para fabricar los dados de corte de acuerdo a las propiedades mecánicas que presenta y a la función que realizará es el acero K 455.

3.1.4.2 APOYOS Y PUNZÓN

Los apoyos y el punzón son el cuerpo en el cuál se alojarán los dados de corte, es así que su función es transmitir las reacciones (en el caso de los apoyos) y transmitir la carga (en el caso del punzón), por lo tanto se utilizará acero estructural para fabricar mencionados elementos considerando que sus propiedades mecánicas son buenas y suficientes para desempeñar la función previamente señalada, su costo es relativamente bajo, tiene buena maquinabilidad y disponibilidad en el mercado.

3.1.5 CÁLCULOS

El diseño del accesorio considerará las condiciones más críticas de operación a fin de asegurar su correcto desempeño a lo largo del experimento.

En los cálculos se emplearán las propiedades mecánicas del acero estructural A36 debido a que este es el material de la viga con mayor resistencia que se ensayará (condición crítica), en base al mismo criterio se considerará para los cálculos la sección de viga más grande.

Propiedades Mecánicas del Acero Estructural A36 (Manual de Diseño para la Construcción con Acero) (Anexo B).

$Sy = 250\ MPa$

$Su_{máx} = 550\ MPa$

En los cálculos se utilizará el esfuerzo último máximo del acero ya que es la condición más crítica y el diseño es conservador.

3.1.5.1 SECCIÓN CIRCULAR CRÍTICA A CORTANTE

Área de la sección de la viga

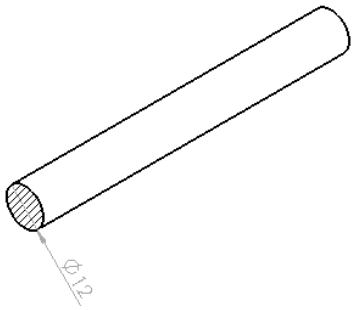


Figura 21: Área de la sección transversal de la viga circular.

$$\emptyset = 12\ mm$$

$$r = \frac{\emptyset_{máx}}{2} = \frac{12\ mm}{2} = 6\ mm$$

$$A = \pi * r^2 = \pi * (6\ mm)^2 = 113{,}097\ mm^2$$

donde:

$\emptyset$ = diámetro de la viga circular de acero. [mm]

r = radio de la viga circular de acero. [mm]

A = área de la sección circular de la viga de acero. [mm^2]

Cálculo del esfuerzo de corte último del acero

$$Ssu = 0{,}82 * Su$$

$$Ssu = 0{,}82 * 550\ MPa$$

$$Ssu = 451\ MPa$$

donde:

Ssu = esfuerzo de corte último del acero. [MPa]

Su = esfuerzo último del acero. [MPa]

Se utiliza la fórmula de esfuerzo de corte último ya que se requiere romper la viga (caso más crítico) y no solo la fluencia de la misma.

Cálculo de la carga (P) necesaria para romper la viga

Ecuación de cortante doble

$$\tau = \frac{P}{2 * A}$$

donde:

P = carga necesaria para romper la viga crítica de acero. [N]

A = área de la sección circular crítica de la viga de acero. [m^2]

τ = esfuerzo de corte último del acero estructural A36. [MPa]

$$P = 2 * A * Ssu$$

$$P = 2 * \left(\frac{113{,}097}{1000^2}\right) m^2 * 451\ MPa$$

$$P = 1{,}020x10^5\ N$$

Cálculo de las reacciones en los apoyos

$$R = \frac{P}{2}$$

$$R = \frac{1{,}020x10^5\ N}{2}$$

$$R = 5{,}101x10^4\ N$$

donde:

R = reacción en uno de los apoyos. [N]

P = carga necesaria para romper la viga circular crítica de acero. [N]

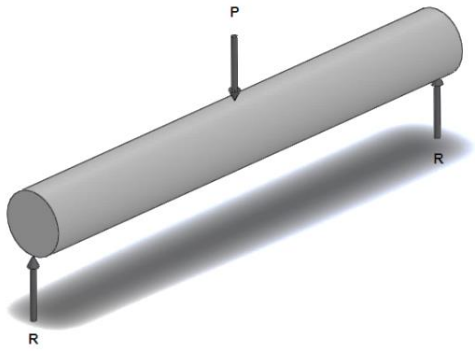


Figura 22: Puntos de aplicación de la carga (P) y las reacciones (R) en la viga circular.

Cálculo de la longitud de los dados de corte

Ecuación de aplastamiento – Análisis en uno de los apoyos

$$\sigma = \frac{R}{A_{pro}}$$

donde:

R = reacción en uno de los apoyos. [N]

A_{pro} = área proyectada de la viga circular crítica de acero en el dado de corte. [mm^2]

σ = esfuerzo de fluencia del acero estructural A36. [N/mm^2]

$$A_{pro} = \emptyset * L_{dado-ap}$$

donde:

$\emptyset$ = diámetro de la viga circular crítica de acero. [mm]

$L_{dado-ap}$ = longitud del dado de corte en el apoyo. [mm]

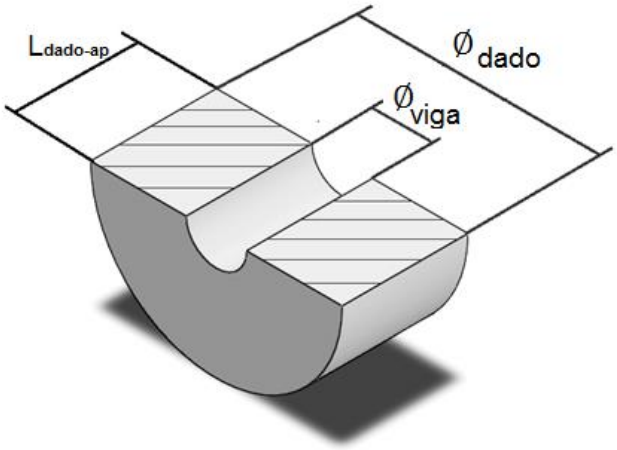


Figura 23: Dimensiones del dado de corte de ranura circular en el apoyo.

$$L_{dado-ap} = \frac{R}{\emptyset * \frac{Sy * 10^6}{1000^2}}$$

$$L_{dado-ap} = \frac{5{,}101x10^4}{12 * \frac{250x10^6}{1000^2}}$$

$L_{dado-ap} = 17{,}002\ mm$

Ecuación de aplastamiento – Análisis en el punzón

$$\sigma = \frac{P}{A_{pro}}$$

donde:

P = carga necesaria para romper la viga circular crítica de acero. [N]

A_{pro} = área proyectada de la viga circular crítica de acero en el dado de corte. [mm^2]

σ = esfuerzo de fluencia del acero estructural A36. [N/mm^2]

$$A_{pro} = \emptyset * L_{dado-pz}$$

donde:

$\emptyset$ = diámetro de la viga circular crítica de acero. [mm]

$L_{dado-pz}$ = longitud del dado de corte en el punzón. [mm]

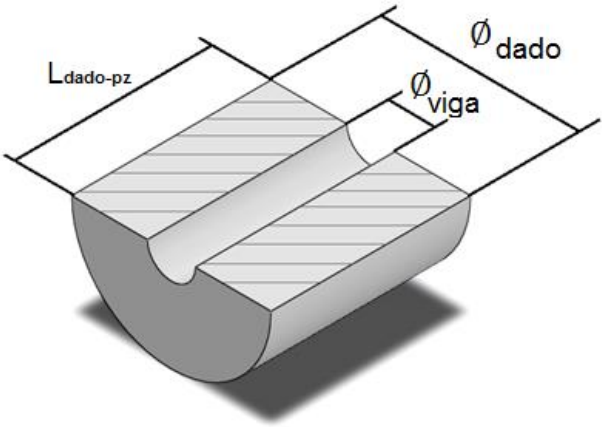


Figura 24: Dimensiones del dado de corte de ranura circular en el punzón.

$$L_{dado-pz} = \frac{P}{\emptyset * \frac{Sy * 10^6}{1000^2}}$$

$$L_{dado-pz} = \frac{1{,}020x10^5}{12 * \frac{250x10^6}{1000^2}}$$

$$L_{dado-pz} = 34{,}005\ mm$$

3.1.5.2 SECCIÓN CUADRADA CRÍTICA A CORTANTE

Área de la sección de la viga

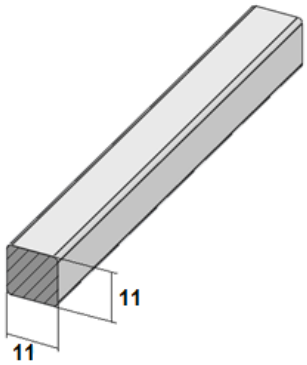


Figura 25: Área de la sección transversal de la viga cuadrada.

$a = 11\ mm$

$A = a * a = a^2 = (11\ mm)^2 = 121\ mm^2$

donde:

a = lado de la viga cuadrada crítica de acero. [mm]

A = área de la sección cuadrada crítica de la viga de acero. [mm^2]

Cálculo de la carga (P) necesaria para romper la viga

Ecuación de cortante doble

$$\tau = \frac{P}{2 * A}$$

donde:

P = carga necesaria para romper la viga cuadrada crítica de acero. [N]

A = área de la sección cuadra crítica de la viga de acero. [m^2]

τ = esfuerzo de corte último del acero estructural A36. [MPa]

$P = 2 * A * Ssu$

$P = 2 * \left(\frac{121}{1000^2}\right) m^2 * 451\ MPa$

$P = 1{,}091x10^5\ N$

Cálculo de las reacciones en los apoyos

$$R = \frac{P}{2}$$

$$R = \frac{1{,}091x10^5\ N}{2}$$

$$R = 5{,}457x10^4\ N$$

donde:

R = reacción en uno de los apoyos. [N]

P = carga necesaria para romper la viga cuadrada crítica de acero. [N]

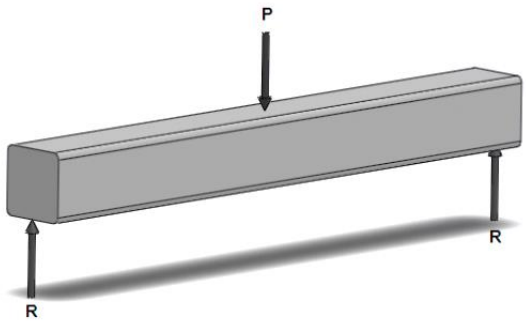


Figura 26: Puntos de aplicación de la carga (P) y las reacciones (R) en la viga cuadrada.

Cálculo de la longitud de los dados de corte

Ecuación de aplastamiento – Análisis en uno de los apoyos

$$\sigma = \frac{R}{A_{pro}}$$

donde:

R = reacción en uno de los apoyos. [N]

A_{pro} = área proyectada de la viga cuadrada crítica de acero en el dado de corte. [mm^2]

σ = esfuerzo de fluencia del acero estructural A36. [N/mm^2]

$$A_{pro} = a * L_{dado-ap}$$

donde:

a = lado de la viga cuadrada crítica de acero. [mm]

$L_{dado-ap}$ = longitud del dado de corte en el apoyo. [mm]

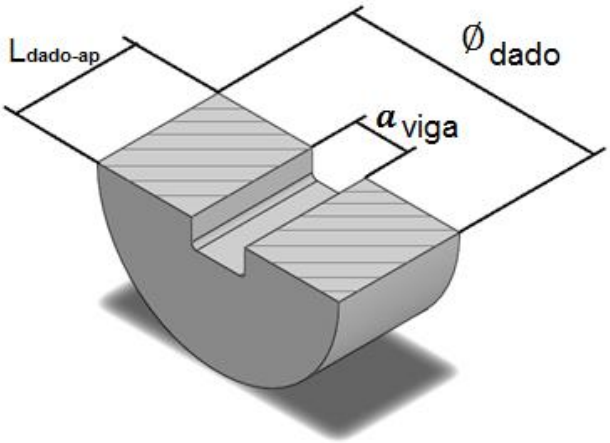


Figura 27: Dimensiones del dado de corte de ranura cuadrada en el apoyo.

$$L_{dado-ap} = \frac{R}{a * \frac{Sy * 10^6}{1000^2}}$$

$$L_{dado-ap} = \frac{5{,}457x10^4}{11 * \frac{250x10^6}{1000^2}}$$

$$L_{dado-ap} = 19{,}844\ mm$$

Ecuación de aplastamiento – Análisis en el punzón

$$\sigma = \frac{P}{A_{pro}}$$

donde:

P = carga necesaria para romper la viga cuadrada crítica de acero. [N]

A_{pro} = área proyectada de la viga cuadra crítica de acero en el dado de corte. [mm^2]

σ = esfuerzo de fluencia del acero estructural A36. [N/mm^2]

$$A_{pro} = a * L_{dado-pz}$$

donde:

a = lado de la viga cuadrada crítica de acero. [mm]

$L_{dado-pz}$ = longitud del dado de corte en el punzón. [mm]

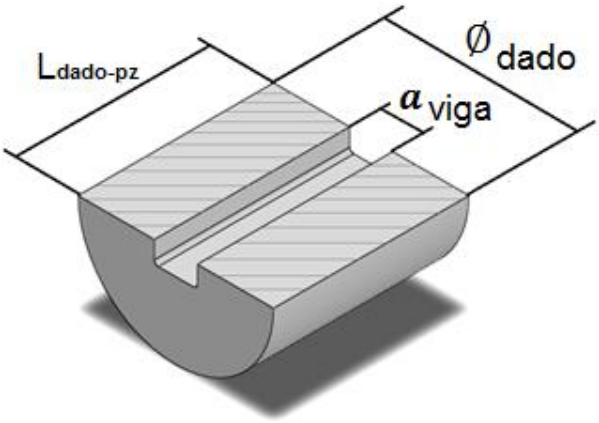


Figura 28: Dimensiones del dado de corte de ranura cuadrada en el punzón.

$$L_{dado-pz} = \frac{P}{a * \frac{Sy * 10^6}{1000^2}}$$

$$L_{dado-pz} = \frac{1{,}091x10^5}{11 * \frac{250x10^6}{1000^2}}$$

$$L_{dado-pz} = 39{,}688\ mm$$

Los valores obtenidos en los cálculos previamente realizados se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 6

Resumen de los cálculos

SECCIÓN CIRCULAR		
	APOYO	**PUNZÓN**
LONGITUD DEL DADO DE CORTE [mm]	17,002	34.005
SECCIÓN CUADRADA		
	APOYO	**PUNZÓN**
LONGITUD DEL DADO DE CORTE [mm]	19,844	39,688

3.1.5.3 CÁLCULO DEL ESFUERZO FLECTOR PARA LA SECCIÓN CIRCULAR CRÍTICA

Ecuación de esfuerzo flector

$$\sigma = \frac{M * c}{I}$$

donde:

M = momento flector de la viga. [N.mm]

c = distancia desde el eje neutro de la viga hasta las fibras extremas. [mm]

I = momento de inercia de la sección transversal de la viga circular crítica de acero. [mm^4]

σ = esfuerzo de fluencia del acero estructural A36. [N/mm^2]

$$M = F * \frac{d}{2}$$

$$d = 111\ mm$$

La distancia (d) empleada para calcular el momento flector en la viga es la distancia máxima a la que se realizará el ensayo, la misma que está restringida por la longitud máxima de la base, la altura disponible entre la base y el punzón, y los apoyos que se utilizarán a lo largo del desarrollo del experimento.

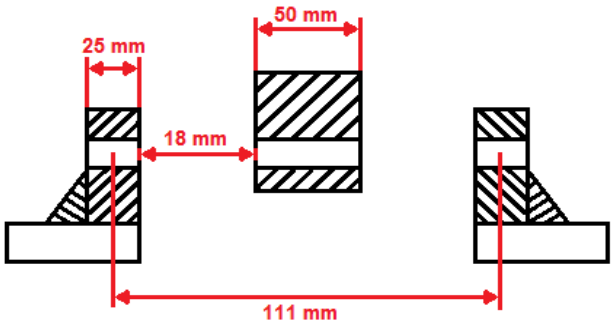


Figura 29: Esquema de la distancia máxima entre apoyos para la sección circular y cuadrada crítica de acero.

$$I = \pi * \frac{r^4}{4}$$

$$I = \pi * \frac{(6\ mm)^4}{4}$$

$$I = 1{,}018x10^3\ mm^4$$

$$c = r = 6\ mm$$

$$F_{Fl} = \frac{Sy * I}{\frac{d}{2} * c}$$

$$F_{Fl} = \frac{250\ N/mm^2 * 1{,}018x10^3\ mm^4}{\frac{111\ mm}{2} * 6\ mm}$$

$$F_{Fl} = 764{,}171\ N$$

3.1.5.4 CÁLCULO DEL ESFUERZO FLECTOR PARA LA SECCIÓN CUADRADA CRÍTICA

Ecuación de esfuerzo flector

$$\sigma = \frac{M * c}{I}$$

donde:

M = momento flector de la viga. [N.mm]

c = distancia desde el eje neutro de la viga hasta las fibras extremas. [mm]

I = momento de inercia de la sección transversal de la viga cuadrada crítica de acero. [mm^4]

σ = esfuerzo de fluencia del acero estructural A36. [N/mm^2]

$$M = F * \frac{d}{2}$$

$$d = 111\ mm$$

$$I = \frac{a * a^3}{12}$$

$$I = \frac{11\ mm * (11\ mm)^3}{12}$$

$$I = 1{,}22x10^3\ mm^4$$

$$c = \frac{a}{2} = \frac{11\ mm}{2} = 5{,}5\ mm$$

$$F_{Fl} = \frac{Sy * I}{\frac{d}{2} * c}$$

$$F_{Fl} = \frac{250\ N/mm^2 * 1{,}22x10^3\ mm^4}{\frac{111\ mm}{2} * 5{,}5\ mm}$$

$$F_{Fl} = 999{,}180\ N$$

3.1.6 DIMENSIONES DEL ACCESORIO

3.1.6.1 DADOS DE CORTE

Las longitudes de los dados de corte obtenidas en los cálculos del capítulo 3.1.5 no son comerciales, por lo tanto es necesario definirlas en valores enteros existentes en el mercado y capaces de funcionar satisfactoriamente en geometrías cuadradas y circulares.

Adicionalmente es necesario establecer el diámetro de los dados de corte, el cuál será constante para las diferentes secciones de viga y debido a que los cálculos previos se realizaron con las propiedades mecánicas del acero estructural A36, las mismas que son inferiores a las propiedades mecánicas del acero K 455 que es el material con el que se fabricarán los dados de corte, se selecciona el diámetro de los dados de corte en función de la facilidad de fabricación de los elementos, existencia en el mercado y factor económico.

Tabla 7

Dimensiones de los dados de corte

	APOYO	PUNZÓN
LONGITUD DEL DADO DE CORTE [mm]	25 (1 plg)	50 (2 plg)
DIÁMETRO DEL DADO DE CORTE [mm]	50 (2 plg)	

Las dimensiones de los dados de corte se verifican en la simulación y en las pruebas piloto del accesorio, las mismas que se detallan en los siguientes subcapítulos. Tanto en los resultados de la simulación como en los resultados de las pruebas piloto si el diámetro de los dados de corte para las secciones cuadradas es de 25 mm (1 plg) los dados fallan, por ese motivo el diámetro de los dados de corte tanto para las secciones circulares como para las secciones cuadradas se ha definido en 50 mm (2 plg), cabe mencionar que aún con este diámetro los dados de corte para las secciones cuadradas fallan.

3.1.6.2 APOYOS Y PUNZÓN

De acuerdo con los cálculos realizados en el capítulo 3.1.5 el espesor de los apoyos y el punzón está dado por la longitud de los dados de corte, las dimensiones del ancho y largo de los apoyos y el punzón se seleccionan en base a que el acero utilizado para fabricar los apoyos es el acero estructural A-588 cuyas propiedades mecánicas son superiores a las propiedades mecánicas del acero estructural A36 empleado en los cálculos previamente realizados garantizando que el elemento no sufrirá aplastamiento al momento de aplicar la carga, por lo tanto las dimensiones de los apoyos y el punzón se fijan de acuerdo con la existencia del material en el mercado, facilidad en la manipulación, maquinabilidad, acoplamiento con los elementos existentes en el laboratorio que se utilizarán conjuntamente con los elementos a diseñar y factibilidad económica.

Cabe mencionar que el punzón se construirá en acero estructural A36 debido a que el espesor requerido para este elemento existe en el mercado en acero estructural A36, ahora bien como se menciona anteriormente los cálculos aseguran que el elemento no fallará.

Las dimensiones tanto de los apoyos como del punzón se especifican en la Tabla 8.

Las dimensiones y especificaciones geométricas del accesorio se detallan en el Anexo C.

Tabla 8

Dimensiones de los apoyos y el punzón

	LARGO (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)
APOYOS	100	75	25
PUNZÓN	100	75	50

3.1.7 SIMULACIÓN

La simulación es una herramienta empleada para verificar el diseño del accesorio y asegurar el funcionamiento del mismo.

Es así que la simulación del accesorio se realizó en el Software Ansys, versión estudiantil (versión libre) y los resultados de la misma se muestran a continuación.

3.1.7.1 ACCESORIO PARA LA SECCIÓN CIRCULAR CRÍTICA

3.1.7.1.1 ESFUERZO CORTANTE PURO

La simulación se realizó considerando la carga máxima necesaria para cortar la sección con un valor de $1{,}020 \times 10^5$ N. El material de los dados en la simulación es acero AISI 4340 (ver Anexo B) ya que no se encontraron las propiedades mecánicas del acero K 455 con el que se construirán los dados,

pero si en la simulación los dados funcionan, en la realidad también lo harán, ya que el acero K 455 presenta mejores propiedades mecánicas que el acero AISI 4340 usado en la simulación.

Factor de seguridad

El factor de seguridad de los dados de corte en la situación más crítica (cortante puro) es de 15, consecuentemente los dados de corte funcionarán según lo previsto; esto se puede apreciar en las Figuras 30 y 31. De acuerdo con la escala de factor de seguridad obtenida en la simulación el valor más bajo corresponde a cero y se representa con el color rojo, el mismo que no aparece en ningún punto del accesorio, lo que asegura una vez más que el mismo no fallará. La escala de valores del factor de seguridad desde el mínimo hasta el máximo se puede observar a la izquierda de la figura junto con su representación en colores.

El literal a) de la Figura 31 corresponde a los dados de corte en los apoyos, mientras que el literal b) corresponde al dado de corte en el punzón.

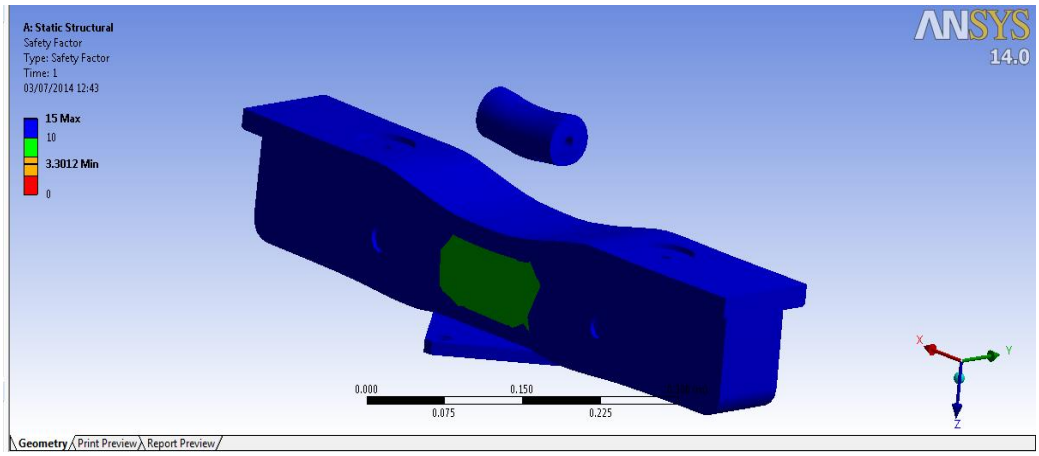
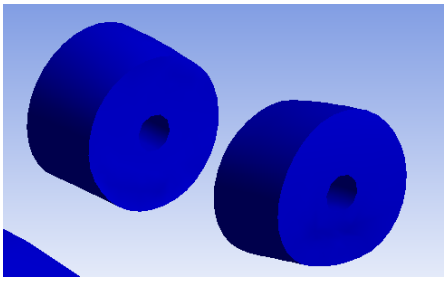
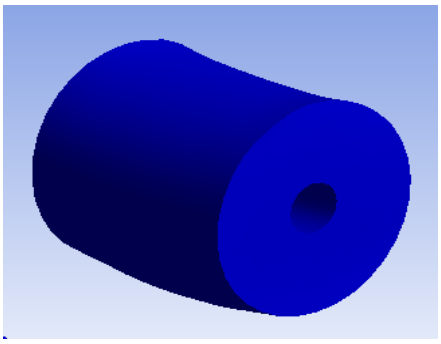


Figura 30: Factor de seguridad del accesorio de la sección circular crítica – cortante puro.



a)



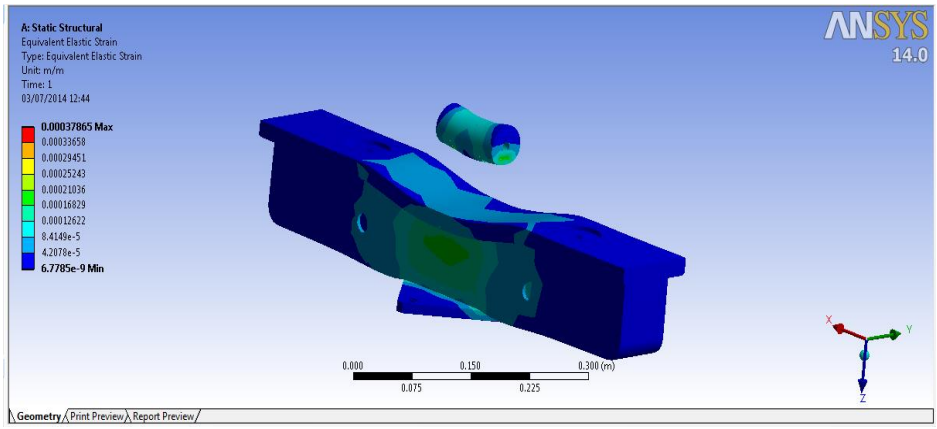
b)

Figura 31: Factor de seguridad de los dados de corte del accesorio de la sección circular crítica – cortante puro.

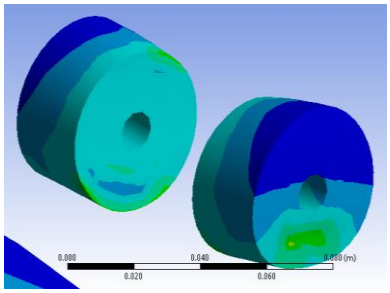
Deformación elástica equivalente

La deformación elástica equivalente del accesorio se muestra en la Figura 32. La escala de valores tiene su respectiva representación con colores y se ubica en el costado izquierdo de la figura.

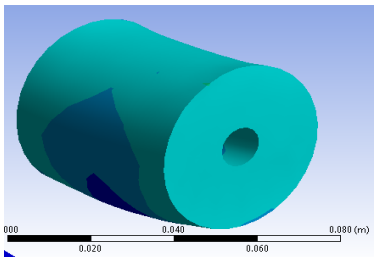
La Figura 32 muestra la deformación elástica equivalente del accesorio de sección circular crítica sometido a esfuerzo cortante, el literal a) corresponde al conjunto de los dados de corte, los literales b) y c) muestran la deformación elástica equivalente de los dados de corte en los apoyos y en el punzón, respectivamente.



a)



b)

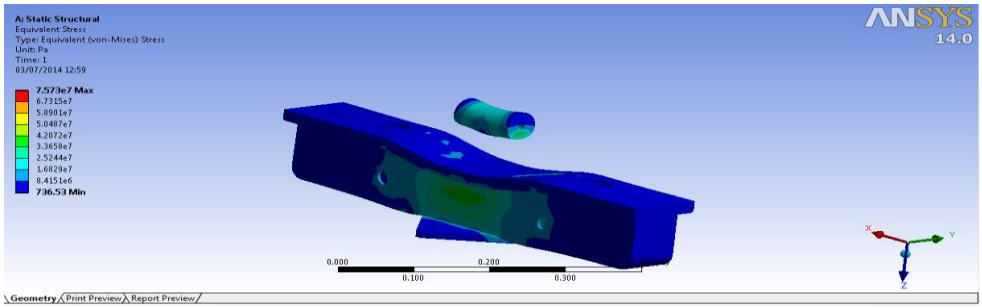


c)

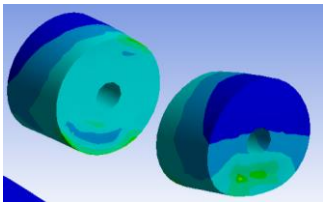
Figura 32: Deformación elástica equivalente del accesorio de la sección circular crítica – cortante puro.

Esfuerzos equivalentes

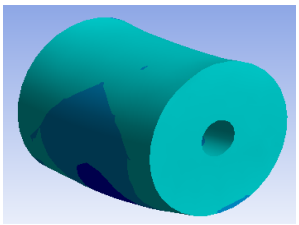
Los esfuerzos equivalentes presentes en el accesorio debido a la carga aplicada se muestran en la Figura 33. La escala de valores se ubica en el lado izquierdo y cada valor se representa mediante un color, cabe mencionar que en ningún punto del accesorio se llega al valor máximo representado en color rojo.



a)



b)



c)

Figura 33: Esfuerzos equivalentes del accesorio de la sección circular crítica – cortante puro.

La Figura 33 indica los esfuerzos equivalentes del accesorio de sección circular crítica sometido a esfuerzo cortante, el literal a) corresponde al conjunto de los dados de corte, el literal b) a los dados de corte en los apoyos y el literal c) al dado de corte en el punzón.

Deformación total

La Figura 34 muestra la deformación total que sufre la varilla al aplicar la carga, como se está analizando el caso de cortante puro se puede ver que la varilla no de deforma significativamente lo cual coincide con la teoría, la deformación máxima tiene un valor de $3{,}263 \times 10^{-5}$ m el mismo que es un valor muy pequeño y la varilla no alcanza el valor máximo antes mencionado, lo cual se verifica en base a la escala de deformaciones representada mediante colores. La escala de valores de las deformaciones se encuentra en el lado izquierdo y los valores se representan con colores siendo la deformación máxima de color rojo y la mínima de color azul.

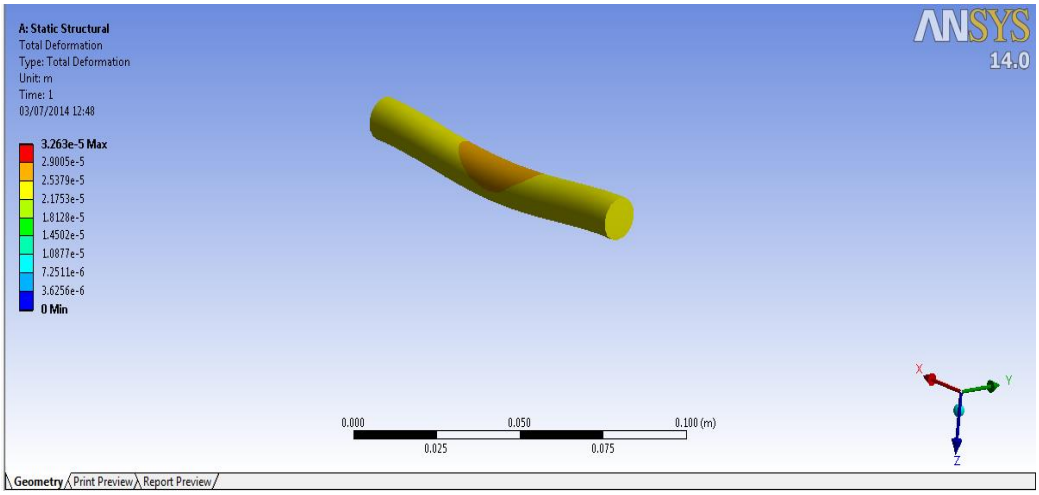


Figura 34: Deformación total de la varilla de sección circular crítica – cortante puro.

3.1.7.1.2 ESFUERZO FLECTOR

La simulación se realizó considerando la carga flectora obtenida de las pruebas piloto, la misma que tiene un valor de 63 925 N. El material de los dados en la simulación es acero AISI 4340 y se aplica el criterio previamente mencionado.

Factor de seguridad

El factor de seguridad de los dados de corte sometidos a esfuerzo flector es de 15, consecuentemente los dados de corte funcionarán según lo previsto; esto se puede apreciar en la Figura 35. De acuerdo con la escala de factor de seguridad obtenida en la simulación el valor más bajo corresponde a cero y se representa con el color rojo, el mismo que no aparece en ningún punto del accesorio, lo que asegura una vez más que el mismo no fallará.

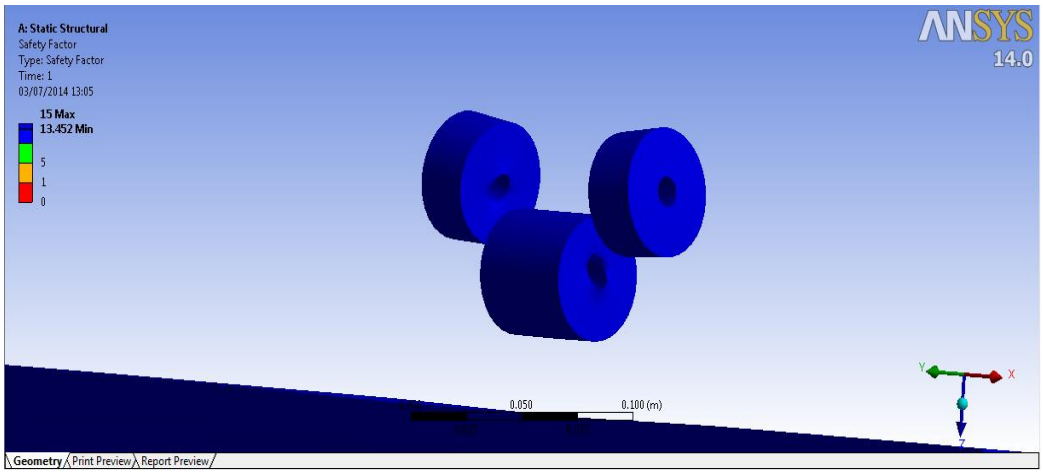
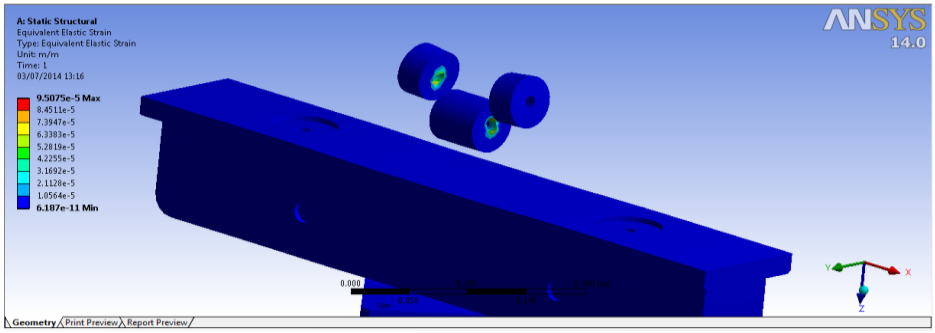


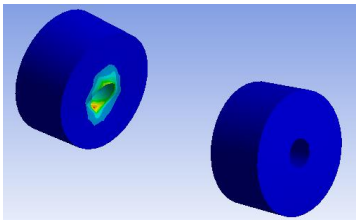
Figura 35: Factor de seguridad del accesorio de la sección circular crítica – esfuerzo flector.

Deformación elástica equivalente

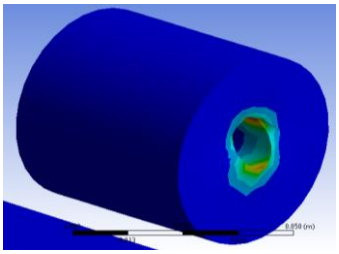
Según la Figura 36 la deformación elástica equivalente de los dados de corte toma el valor máximo en ciertos puntos siendo este 9,5075x10^{-5}, aun así este valor es insignificante.



a)



b)



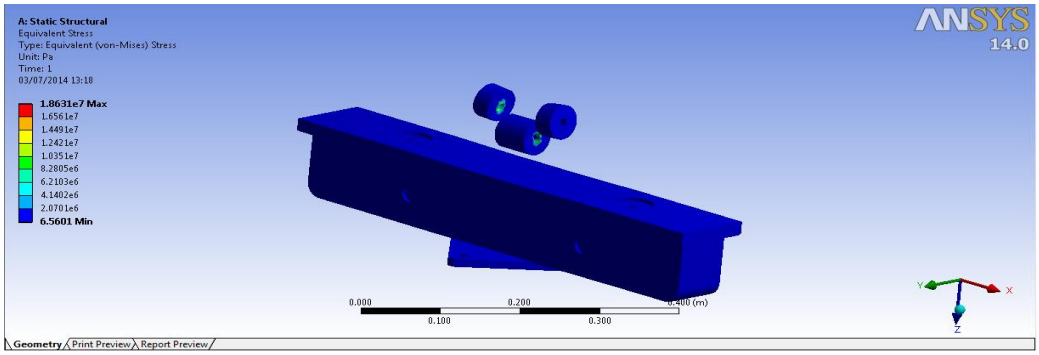
c)

Figura 36: Deformación elástica equivalente del accesorio de la sección circular crítica – esfuerzo flector.

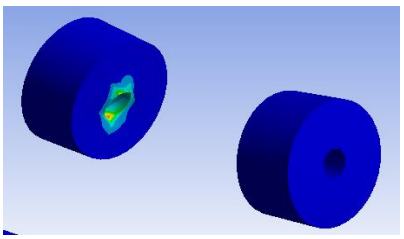
La Figura 36 indica la deformación elástica equivalente del accesorio de sección circular crítica sometido a esfuerzo flector, el literal a) corresponde al conjunto de los dados de corte, el literal b) a los dados de corte en los apoyos y el literal c) al dado de corte en el punzón.

Esfuerzos equivalentes

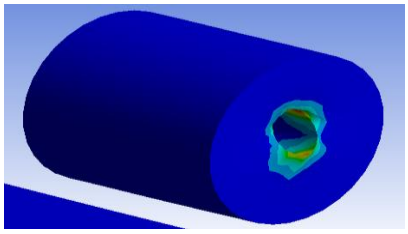
Los esfuerzos equivalentes presentes en el accesorio debido al esfuerzo flector se muestran en la Figura 37. La escala de valores se ubica en el lado izquierdo y cada valor se representa mediante un color, hay pequeños puntos ubicados en la parte inferior del agujero interno de los dados que llegan al esfuerzo equivalente máximo identificado con el color rojo y cuyo valor es $1{,}8631 \times 10^{7}$ Pa.



a)



b)



c)

Figura 37: Esfuerzos equivalentes del accesorio de la sección circular crítica – esfuerzo flector.

La Figura 37 indica los esfuerzos equivalentes del accesorio de la sección circular crítica sometido a esfuerzo flector, el literal a) corresponde conjunto de los dados de corte, el literal b) a los dados de corte en los apoyos y el literal c) al dado de corte en el punzón.

Deformación total

La Figura 38 muestra la deformación total que sufre la varilla al aplicar la carga, como se está analizando el caso de flexión se observa una deformación considerable en la varilla así como la presencia de pronunciados radios de curvatura lo cual coincide con la teoría. La escala de valores de las deformaciones se encuentra en el lado izquierdo y los valores se representan con colores siendo la deformación máxima de color rojo y la mínima de color azul.

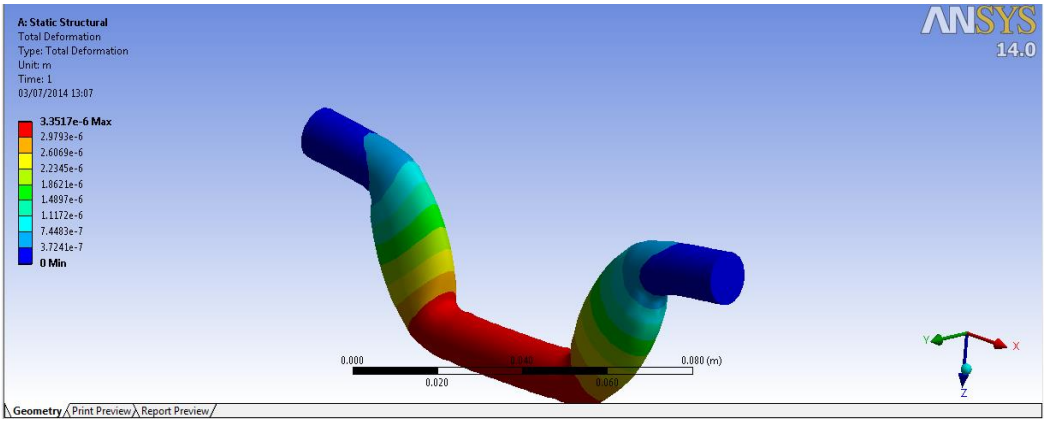


Figura 38: Deformación total de la varilla – esfuerzo flector.

3.1.7.2 ACCESORIO PARA LA SECCIÓN CUADRADA CRÍTICA

3.1.7.2.1 ESFUERZO CORTANTE PURO

La simulación se realizó considerando la carga máxima necesario para cortar la sección con un valor de $1{,}091 \times 10^5$ N. El material de los dados en la simulación es acero AISI 4340 ya que no se encontraron las propiedades mecánicas del acero K 455 con el que se construirán los dados.

Factor de seguridad

El factor de seguridad de los dados de corte sometidos a cortante puro es de 15, consecuentemente los dados de corte funcionarán según lo previsto; esto se puede apreciar en la Figura 39. De acuerdo con la escala de factor de seguridad obtenida en la simulación el valor más bajo corresponde a cero y se representa con el color rojo, el mismo que no aparece en ningún punto del accesorio, lo que asegura una vez más que el mismo no fallará.

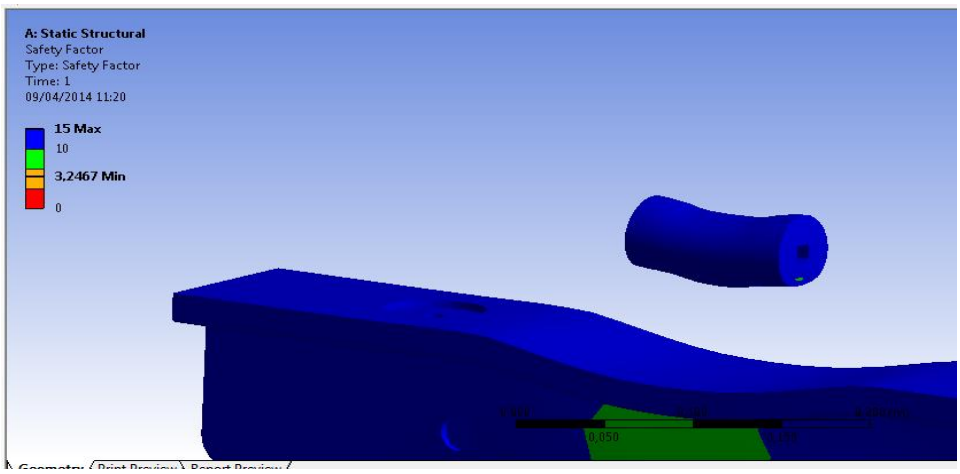
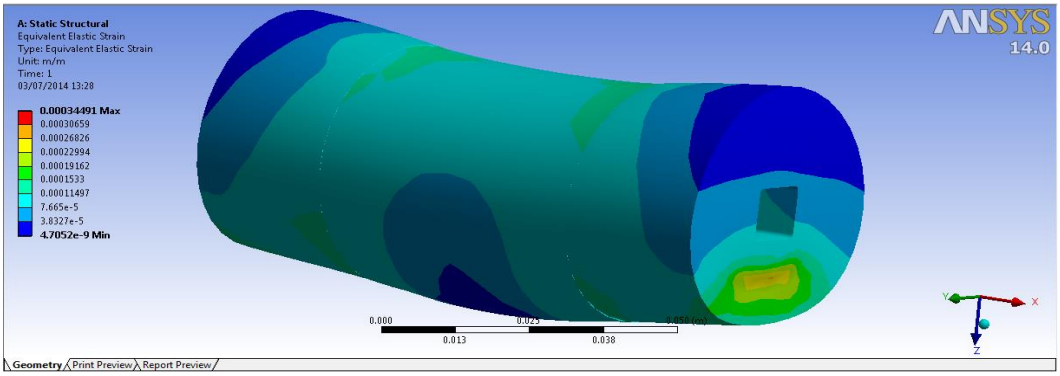


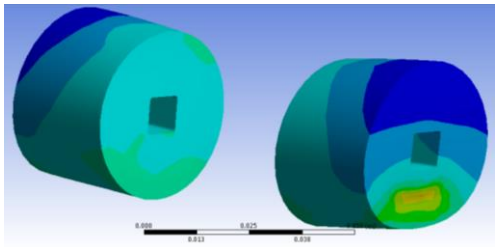
Figura 39: Factor de seguridad del accesorio de la sección cuadrada crítica – cortante puro.

Deformación elástica equivalente

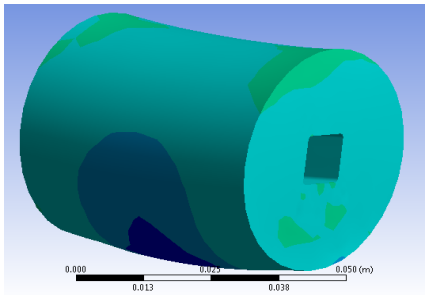
La deformación elástica equivalente de los dados de corte se ilustra en la Figura 40, y en ningún punto del accesorio se observa el valor máximo representado con el color rojo de la escala de colores que se indica al lado izquierdo de la figura.



a)



b)



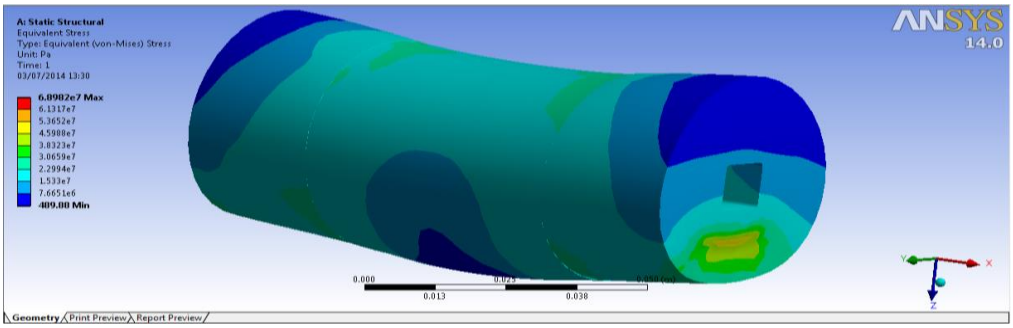
c)

Figura 40: Deformación elástica equivalente del accesorio de la sección cuadrada crítica – cortante puro.

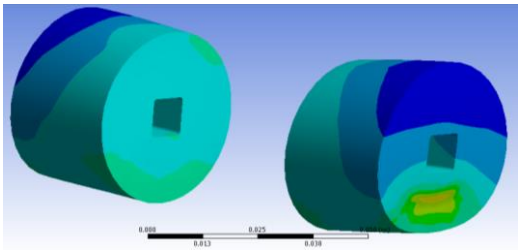
La Figura 40 indica la deformación elástica equivalente del accesorio de sección cuadrada crítica sometido a esfuerzo cortante, el literal a) corresponde al conjunto de los dados de corte, el literal b) a los dados de corte en los apoyos y el literal c) al dado de corte en el punzón.

Esfuerzos equivalentes

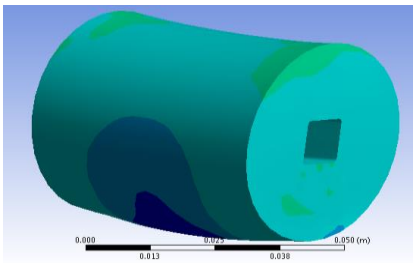
Los esfuerzos equivalentes presentes en el accesorio debido a la carga aplicada se muestran en la Figura 41. La escala de valores se ubica en el lado izquierdo y cada valor se representa mediante un color, cabe mencionar que en ningún punto del accesorio se llega al valor máximo representado en color rojo.



a)



b)



c)

Figura 41: Esfuerzos equivalentes del accesorio de la sección cuadrada crítica – cortante puro.

La Figura 41 indica los esfuerzos equivalentes del accesorio de sección cuadrada crítica sometido a esfuerzo cortante, el literal a) corresponde al conjunto de los dados de corte, el literal b) a los dados de corte en los apoyos y el literal c) al dado de corte en el punzón.

Deformación total

La Figura 42 muestra la deformación total que sufre la varilla al aplicar la carga, como se está analizando el caso de cortante puro se puede ver que la varilla no se deforma significativamente lo cual coincide con la teoría. La escala de valores de las deformaciones se encuentra en el lado izquierdo y los valores se representan con colores siendo la deformación máxima de color rojo y la mínima de color azul.

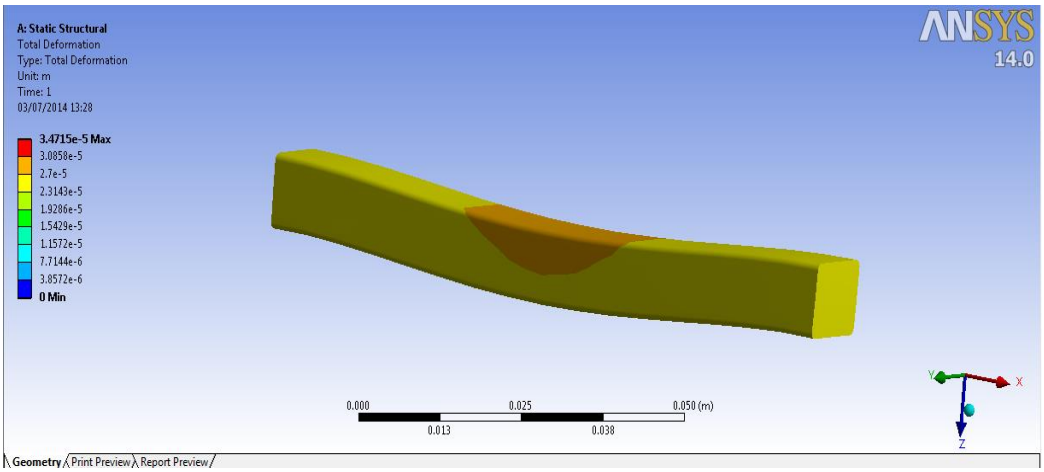


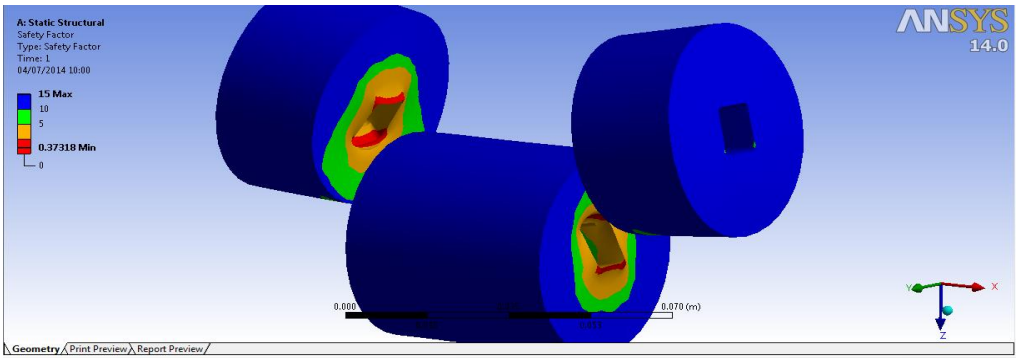
Figura 42: Deformación total de la varilla de la sección cuadrada crítica – cortante puro.

3.1.7.2.2 ESFUERZO FLECTOR

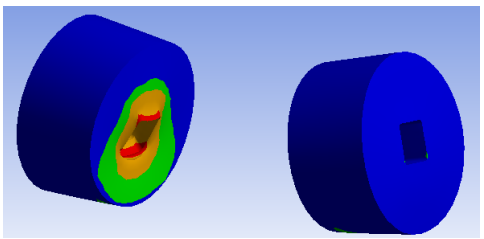
La simulación se realizó considerando la carga flectora y la separación apoyo – punzón a la cual los dados de corte fallan, mencionados valores se obtuvieron de las pruebas piloto. En la simulación se aplicaron 58 898 N y 12 mm de separación apoyo-punzón. El material de los dados en la simulación es acero AISI 4340 y se aplica el criterio previamente mencionado.

Factor de seguridad

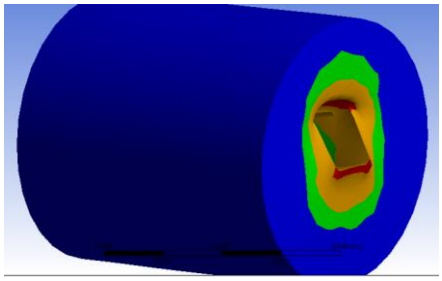
El factor de seguridad de los dados de corte sometidos a esfuerzo flector en la sección cuadrada llega a un valor mínimo de 0.37 que se ubica en las aristas vivas de la geometría del agujero interno del dado, lo cual es bastante crítico; además gran parte de la sección del dado de corte alcanza un factor de seguridad de 10. Debido a la presencia de un factor de seguridad inferior a 1 la falla del dado de corte es inminente. De acuerdo con la escala de factor de seguridad obtenida en la simulación el valor más bajo corresponde a cero y se representa con el color rojo.



a)



b)



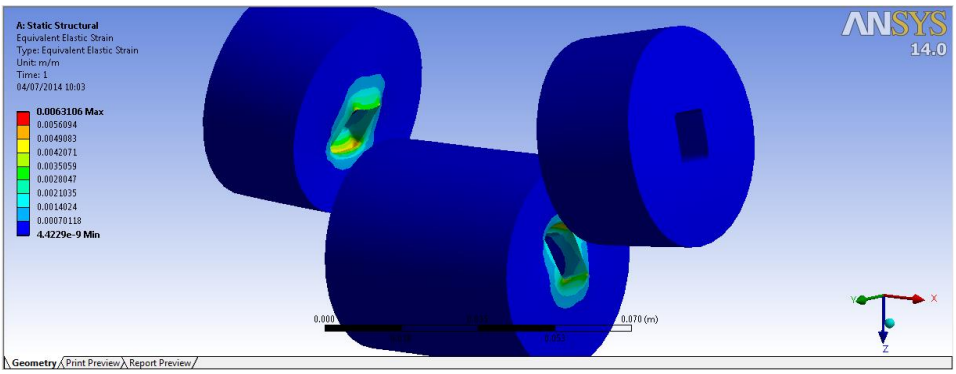
c)

Figura 43: Factor de seguridad del accesorio de la sección cuadrada crítica – esfuerzo flector.

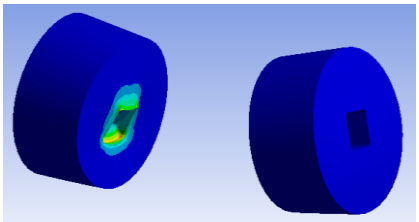
La Figura 43 indica el factor de seguridad del accesorio de sección cuadrada crítica sometido a esfuerzo flector, el literal a) corresponde al conjunto de los dados de corte, el literal b) a los dados de corte en los apoyos y el literal c) al dado de corte en el punzón.

Deformación elástica equivalente

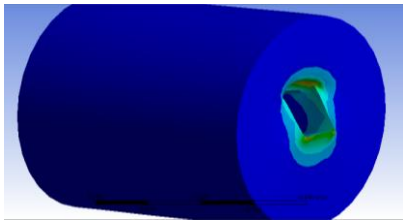
En la Figura 44 se aprecia que la máxima deformación elástica equivalente tiene lugar en las esquinas de la ranura cuadrada de los dados de corte, lo cual corrobora que la falla se origina a partir de las aristas vivas del agujero interno del dado.



a)



b)



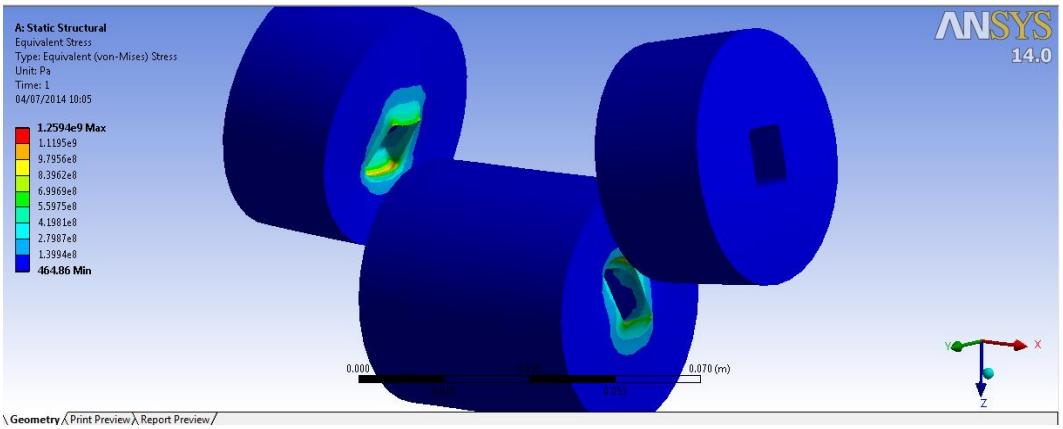
c)

Figura 44: Deformación elástica equivalente del accesorio de la sección cuadrada crítica – esfuerzo flector.

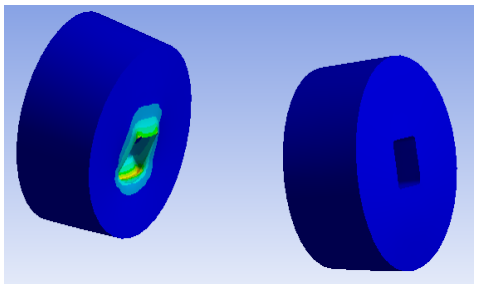
La Figura 44 indica la deformación elástica equivalente del accesorio de sección cuadrada crítica sometido a esfuerzo flector, el literal a) corresponde al conjunto de los dados de corte, el literal b) a los dados de corte en los apoyos y el literal c) al dado de corte en el punzón.

Esfuerzos equivalentes

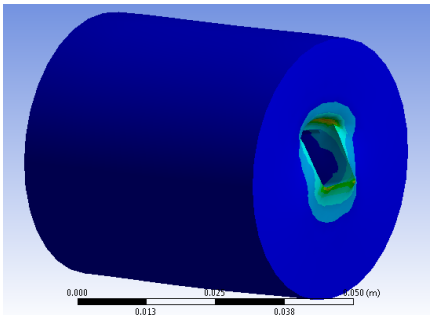
Los esfuerzos equivalentes presentes en el accesorio debido al esfuerzo flector se muestran en la Figura 45. La escala de valores se ubica en el lado izquierdo y cada valor se representa mediante un color, hay pequeños puntos ubicados en las aristas vivas del agujero interno del dado de corte que llegan al esfuerzo equivalente máximo identificado con el color rojo.



a)



b)



c)

Figura 45: Esfuerzos equivalentes del accesorio de la sección cuadrada crítica – esfuerzo flector.

La Figura 45 indica los esfuerzos equivalentes del accesorio de sección cuadrada crítica sometido a esfuerzo flector, el literal a) corresponde al conjunto de los dados de corte, el literal b) a los dados de corte en los apoyos y el literal c) al dado de corte en el punzón.

Deformación total

La Figura 46 muestra la deformación total que sufre la varilla al aplicar la carga, como se está analizando el caso de flexión se observa una deformación considerable en la varilla así como la presencia de pronunciados radios de curvatura lo cual coincide con la teoría. La escala de valores de las deformaciones se encuentra en el lado izquierdo y los valores se representan con colores siendo la deformación máxima de color rojo y la mínima de color azul.

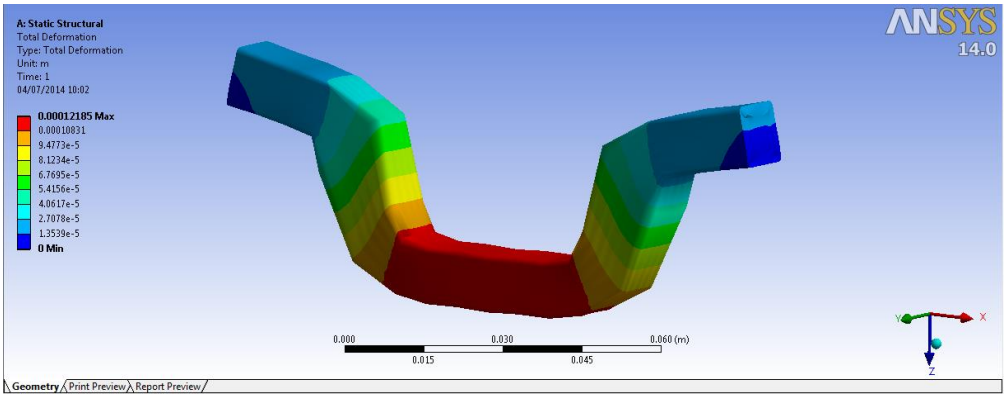


Figura 46: Deformación total de la varilla de la sección cuadrada crítica – esfuerzo flector.

Simulación de la tensión de contacto

La simulación de la tensión de contacto se realiza en Ansys APDL únicamente para los dados cuyo agujero interno tiene forma de cuadrado, en esta simulación se toma en cuenta la cuarta parte del dado y se presta

especial atención al mallado de los elementos que se ubican en la arista viva debida a la geometría del agujero interno del dado como se muestra en la Figura 47, obteniendo así los resultados mostrados en la Figura 48.

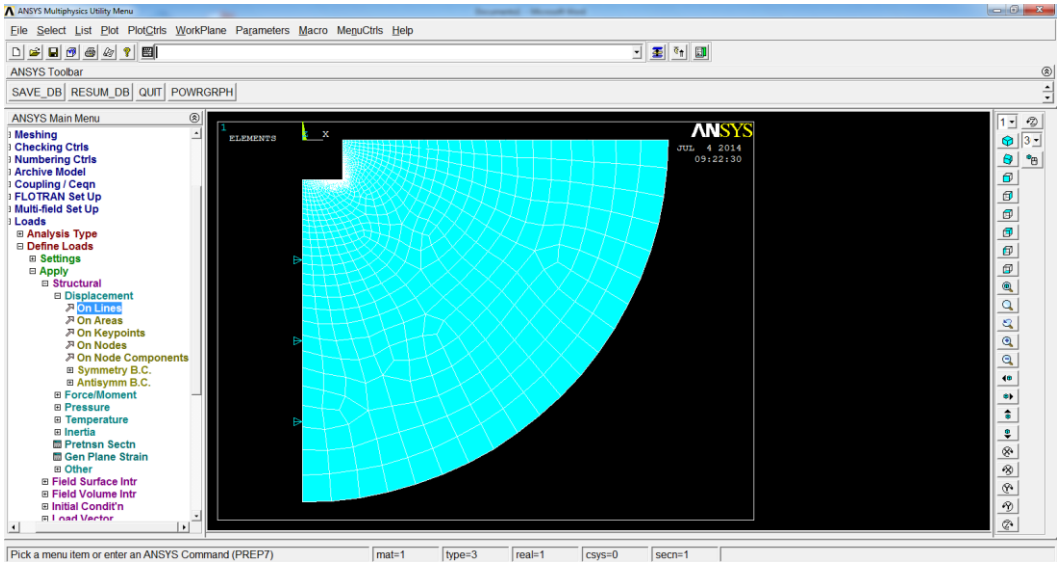
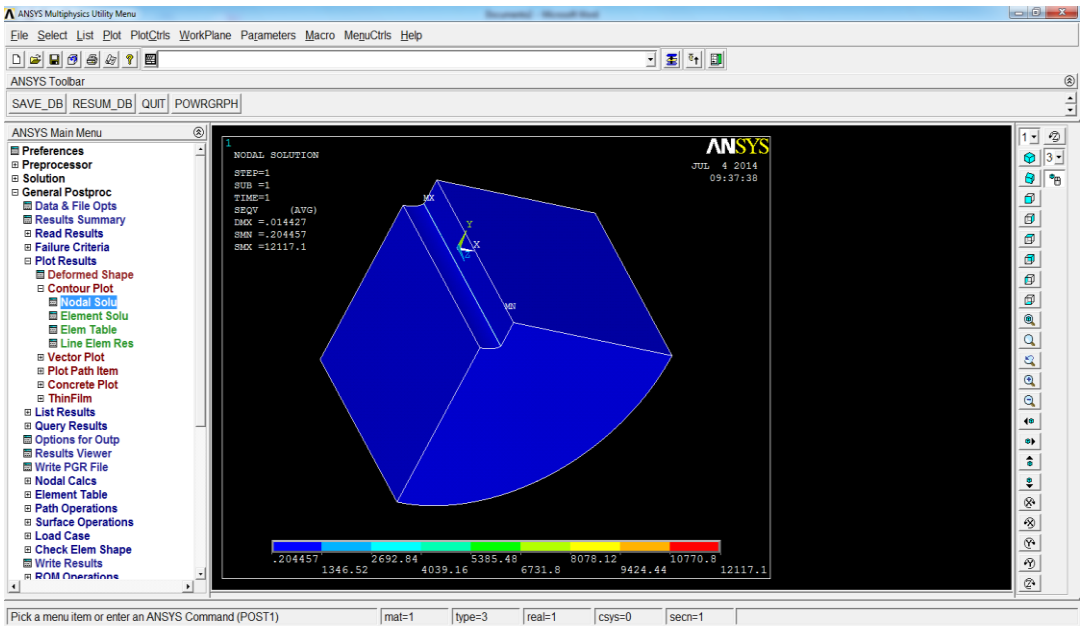
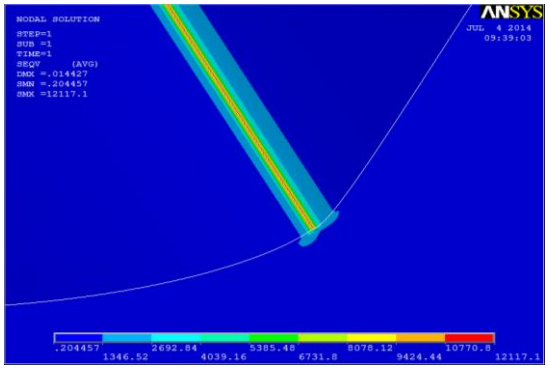
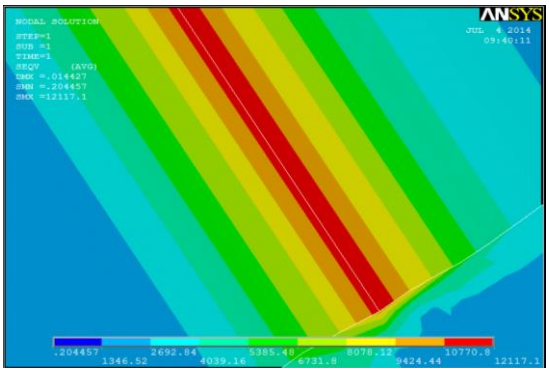


Figura 47: Mallado de la cuarta parte del dado de corte de sección cuadrada.



a)





b)

Figura 48: Resultados de la simulación de la tensión de contacto para el dado de corte de sección cuadrada.

El literal b) de la Figura 48 es una ampliación en la arista viva de la cuarta parte del dado de corte mostrado en el literal a) de la misma figura.

Para realizar la simulación de la tensión de contacto se utiliza la presión que se obtiene al dividir la fuerza de rotura (58 898 N) para el área en la que se aplica la fuerza, es decir sobre un cuarto del dado de corte (25 mm*5,5 mm).

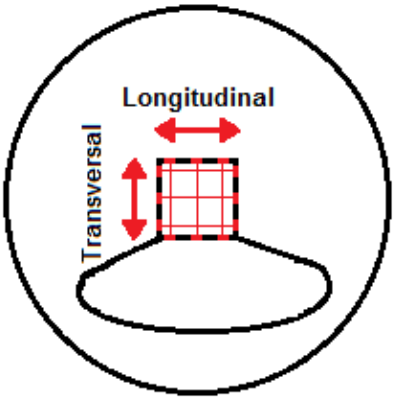
De la simulación se obtiene que el dado de corte debe resistir un esfuerzo de 12 117 N/mm^2 valor que es extremadamente superior al esfuerzo de fluencia del material por lo que la falla del dado es obvia. Esto se constata en la Figura 48 donde la arista viva a lo largo del dado de corte es de color rojo (máximo esfuerzo) siendo el origen y la causante de la falla del dado de corte.

3.1.8 ESTUDIO DE LA FALLA DEL DADO DE CORTE DE SECCIÓN CUADRADA CRÍTICA

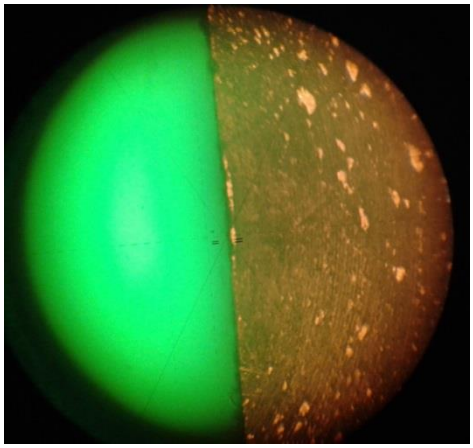
Los dados de corte de sección cuadrada fallan al aplicar carga, lo cual impide la realización de los ensayos destructivos en las vigas de sección cuadrada y el posterior análisis de resultados. En los siguientes capítulos se detalla el estudio de la falla de los dados de corte de sección cuadrada.

3.1.8.1 DIMENSIONES DE LA SECCIÓN

Empleando el microscopio de herramientas del laboratorio de Metrología de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE se miden las dimensiones longitudinales y transversales de la ranura cuadrada del dado de corte antes y después de la rotura. Se toman tres medidas en puntos distintos y se saca un valor promedio, posteriormente se determina si existe o no deformación al comparar las medidas antes y después de la rotura del dado de corte.



a)



b)

Figura 49: Medición de las dimensiones de la ranura cuadrada.

La figura 49 a) muestra el esquema del dado de corte y los puntos que se tomaron para la medición de las dimensiones de la ranura cuadrada, y el literal b) la medición de las dimensiones de la ranura utilizando el Microscopio de Herramientas.

Tabla 9

Dimensiones de la ranura cuadrada antes y después de la rotura

DIMENSIONES ANTES DE LA ROTURA						
	MEDIDA LONGITUDINAL (mm)			MEDIDA TRANSVERSAL (mm)		
Nº	MEDIDA INICIAL	MEDIDA FINAL	MEDIDA OBTENIDA	MEDIDA INICIAL	MEDIDA FINAL	MEDIDA OBTENIDA
1	8,444	16,497	8,053	11,176	19,290	8,114
2	8,488	16,542	8,054	11,162	19,252	8,090
3	8,534	16,624	8,090	11,027	19,124	8,097
	∑Medida Obtenida		24,197	∑Medida Obtenida		24,301
	X Medida Obtenida		8,066	X Medida Obtenida		8,100
DIMENSIONES DESPUÉS DE LA ROTURA						
	MEDIDA LONGITUDINAL (mm)			MEDIDA TRANSVERSAL (mm)		
Nº	MEDIDA INICIAL	MEDIDA FINAL	MEDIDA OBTENIDA	MEDIDA INICIAL	MEDIDA FINAL	MEDIDA OBTENIDA
1	4,144	12,281	8,137	10,202	18,386	8,184
2	4,152	12,239	8,087	10,178	18,372	8,194

Continúa →

3	4,128	12,244	8,116	10,179	18,385	8,206
	∑Medida Obtenida		24,340	∑Medida Obtenida		24,584
	X Medida Obtenida		8,113	X Medida Obtenida		8,195
	Diferencia Medida Longitudinal (mm)			0,048		
	Diferencia Medida Transversal (mm)			0,094		

La variación dimensional se analiza en el eje transversal ya que la rotura del dado se presenta en este eje. La variación de las dimensiones de la ranura luego de la rotura es centesimal, es decir, que la deformación del dado de corte es mínima. Entonces el material del dado de corte se comporta como un material frágil ya que no hay deformaciones significativas después de la rotura. En las figuras 50 y 51 se aprecia el dado de corte antes y despúes de la rotura, respectivamente.

Figura 50: Dado de corte de secciones cuadradas antes de la rotura.

Figura 51: Dado de corte de secciones cuadradas después de la rotura.

3.1.8.2 FRACTOGRAFÍA DEL DADO DE CORTE

Las fotografías requeridas para el análisis fractográfico del dado de corte se realizaron en el Microscopio Electrónico de Barrido FEI Quanta 400 propiedad del Departamento de Criminalística de Pichincha Sección de Microscopía Electrónica.

La fractográfia es un análisis microscópico que permite determinar el tipo de falla en el dado de corte, para lo cual se analizan tres puntos de la superficie de falla del dado de corte a distintas ampliaciones y posteriormente se compara las estructuras de falla con fractografías existentes a fin de determinar la causa de la falla. La Figura 52 indica la ubicación de los tres puntos de análisis en la superficie de falla del dado de corte.

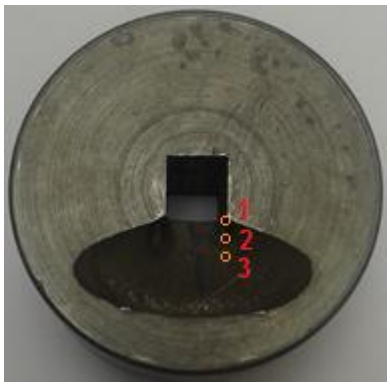
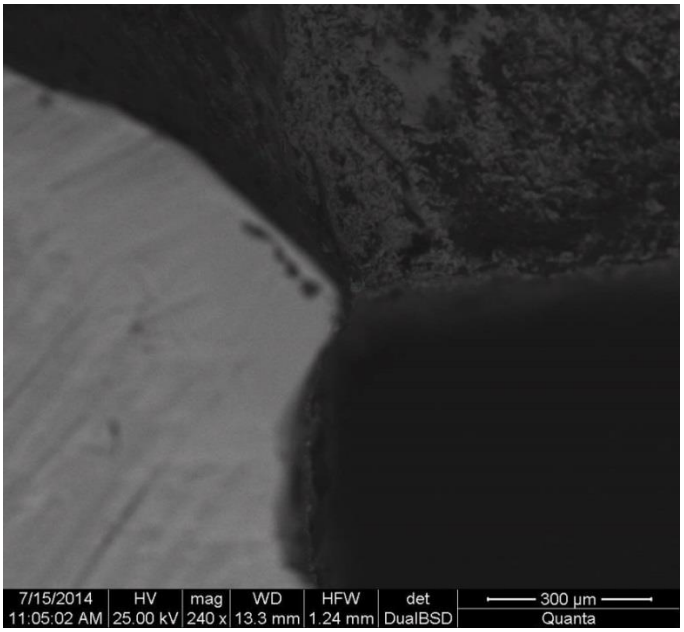
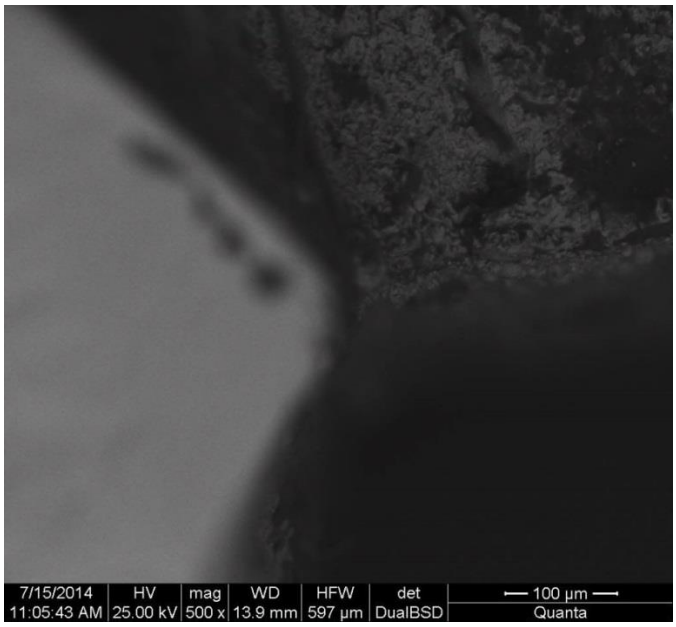


Figura 52: Puntos de análisis en el dado de corte de secciones cuadradas.

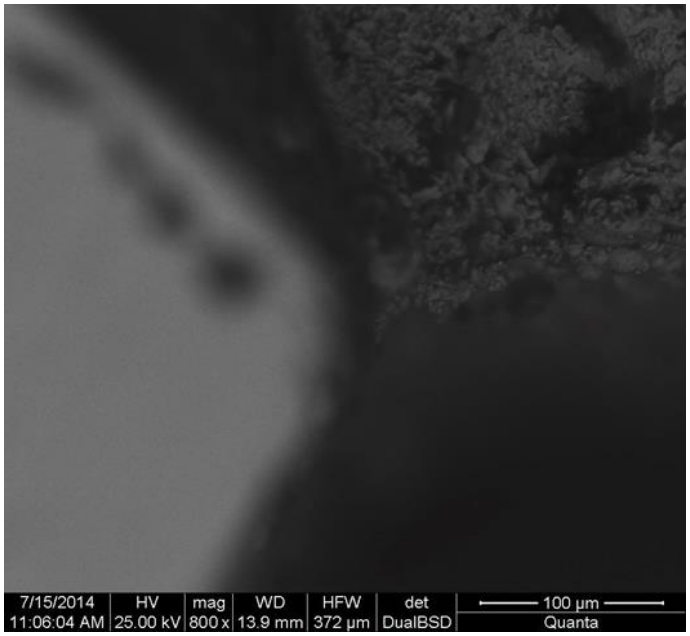
Las siguientes figuras muestran las fotografías en los distintos puntos de análisis del dado de corte, el literal a) tiene una ampliación de 240x, el literal b) 500x, el literal c) 800x y el literal d) 2400x.


7/15/2014
11:05:02 AM
HV
25.00 kV
mag
240 x
WD
13.3 mm
HFW
1.24 mm
det
DualBSD
300 µm
Quanta

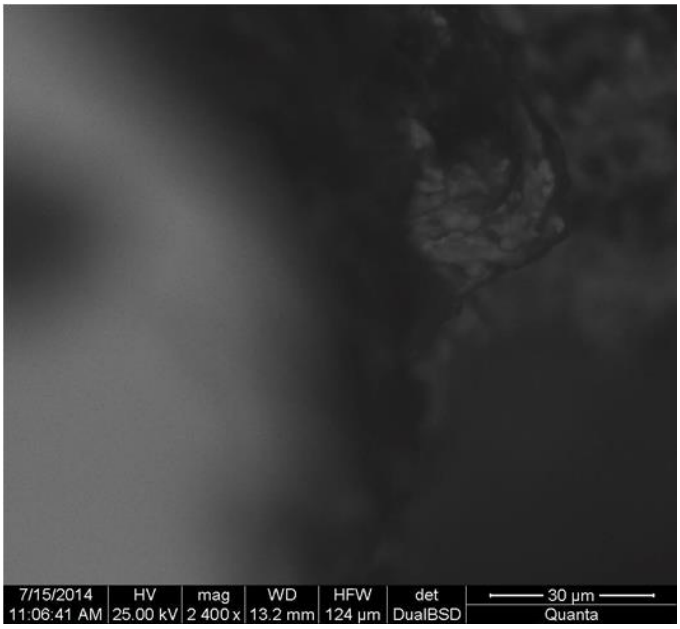
a)


7/15/2014
11:05:43 AM
HV
25.00 kV
mag
500 x
WD
13.9 mm
HFW
597 µm
det
DualBSD
100 µm
Quanta

b)

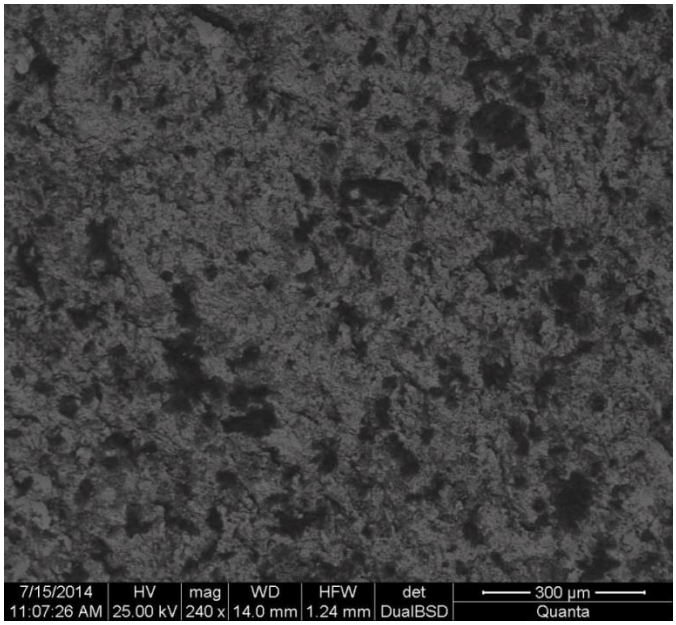


c)

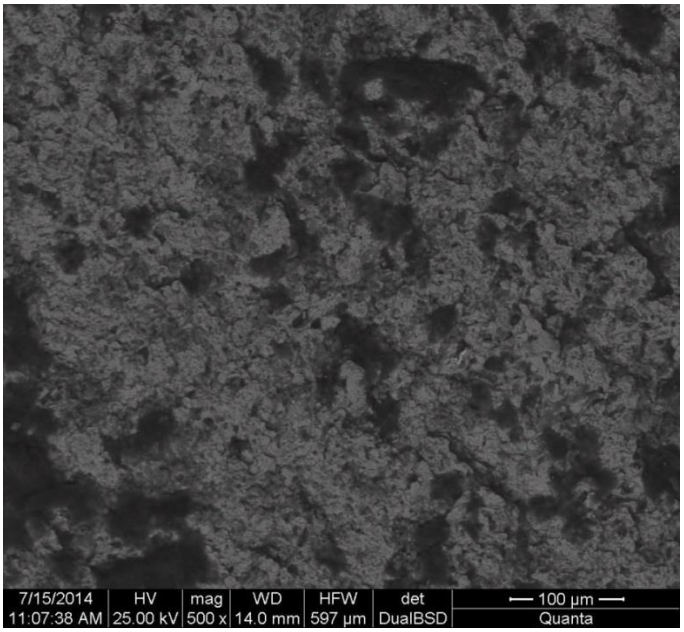


d)

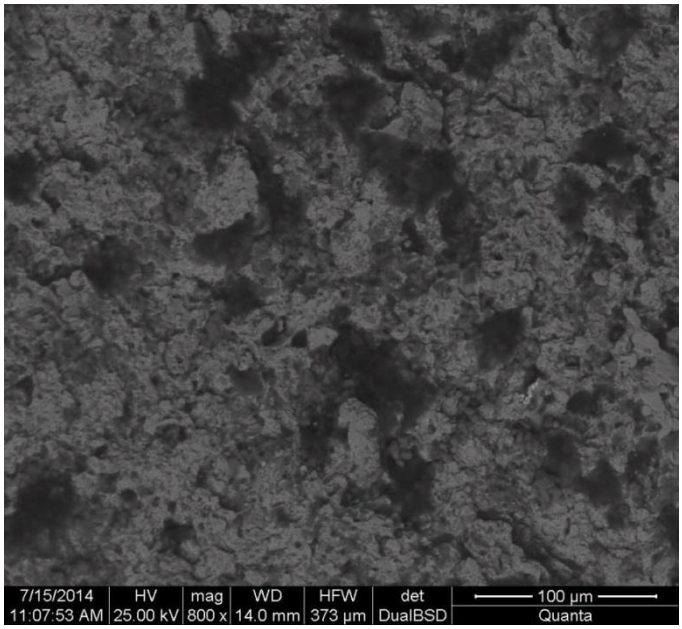
Figura 53: Fractografía del punto 1 del dado de corte. (Fuente: Microscopio FEI Quanta 400 Departamento de Criminalística de Pichincha Sección Microscopia Electrónica)


7/15/2014
11:07:26 AM
HV
25.00 kV
mag
240 x
WD
14.0 mm
HFW
1.24 mm
det
DualBSD
300 µm
Quanta

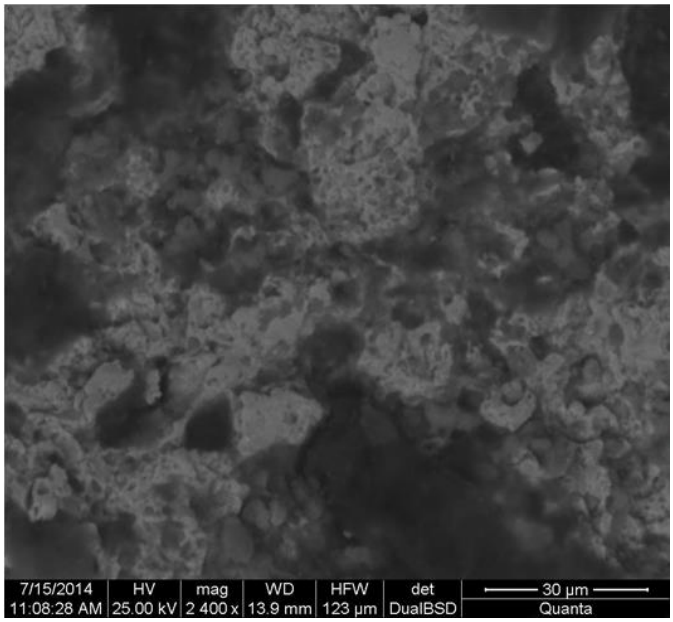
a)


7/15/2014
11:07:38 AM
HV
25.00 kV
mag
500 x
WD
14.0 mm
HFW
597 µm
det
DualBSD
100 µm
Quanta

b)

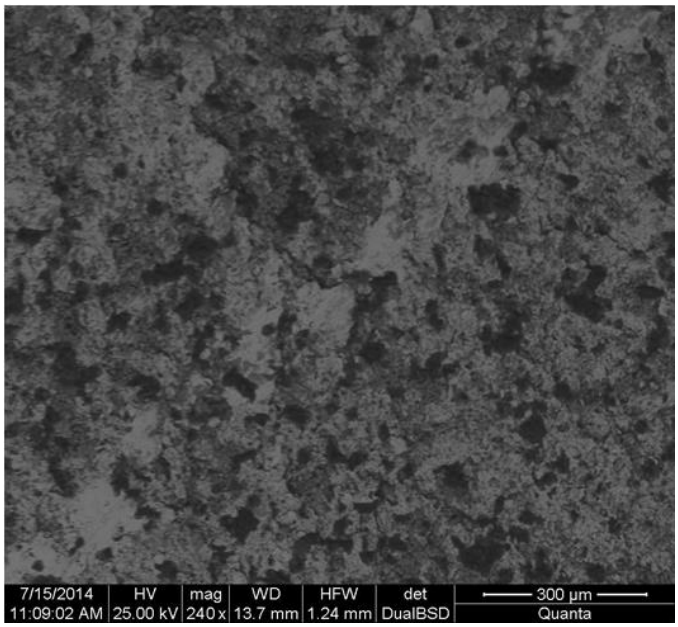


c)

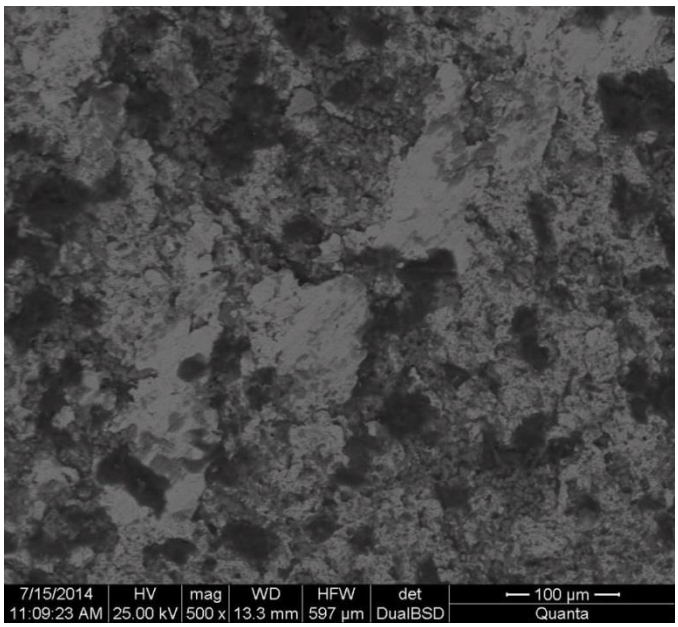


d)

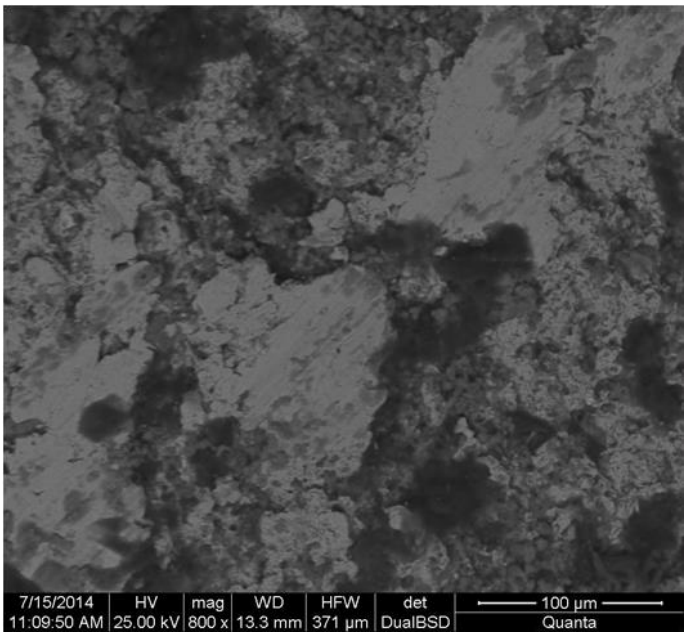
Figura 54: Fractografía del punto 2 del dado de corte. (Fuente: Microscopio FEI Quanta 400 Departamento de Criminalística de Pichincha Sección Microscopia Electrónica)


7/15/2014
11:09:02 AM
HV
25.00 kV
mag
240 x
WD
13.7 mm
HFW
1.24 mm
det
DualBSD
300 µm
Quanta

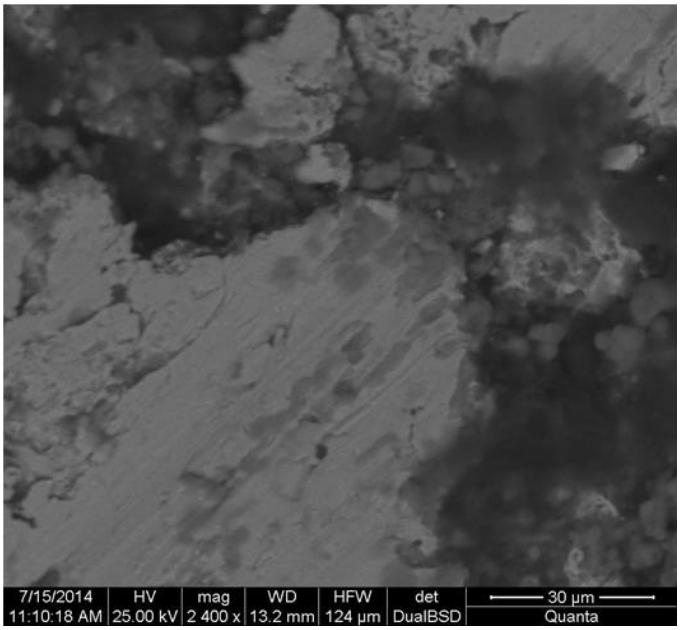
a)


7/15/2014
11:09:23 AM
HV
25.00 kV
mag
500 x
WD
13.3 mm
HFW
597 µm
det
DualBSD
100 µm
Quanta

b)



c)



d)

Figura 55: Fractografía del punto 3 del dado de corte. (Fuente: Microscopio FEI Quanta 400 Departamento de Criminalística de Pichincha Sección Microscopia Electrónica)

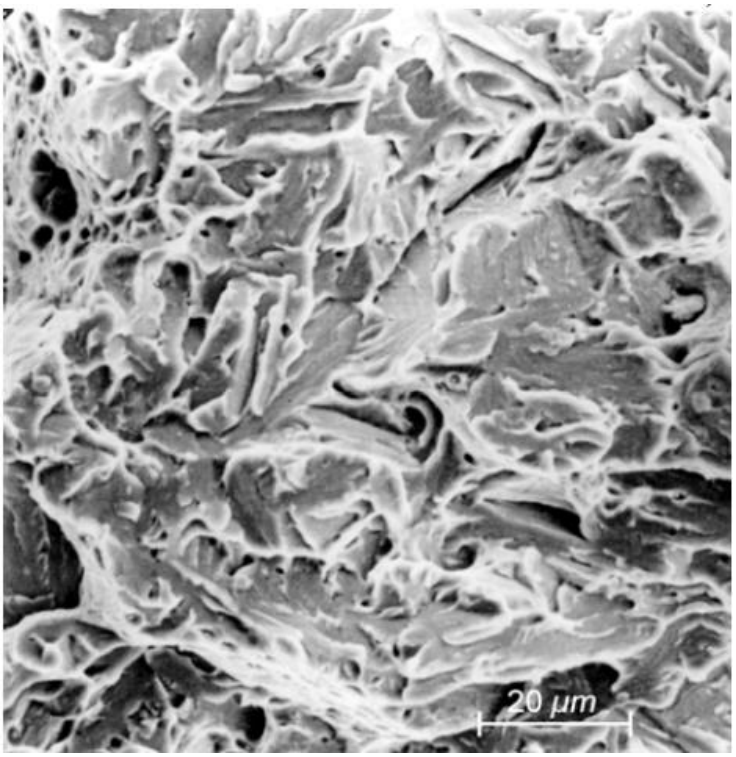
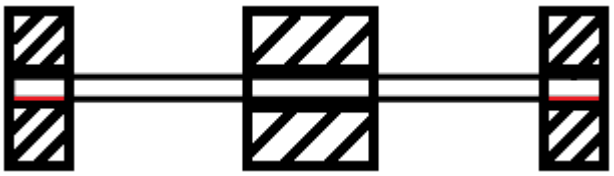
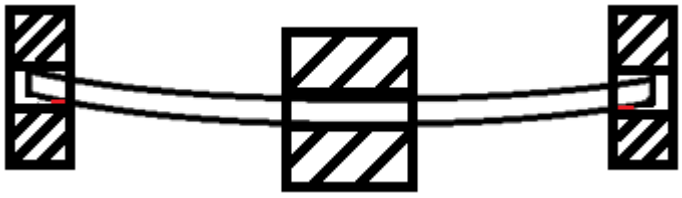


Figura 56: Fractografía de un acero endurecido, faceta de hendiduras finas. (Fuente: Moeser Martin)

La Figura 56 corresponde a una falla frágil de un acero de baja aleación templado y revenido, con 2500x de amplificación. Al comparar la Figura 56 con las figuras 54 d) y 55 d) correspondientes al acero K 455 templado y revenido se encuentran similitudes. Las zonas obscuras de las figuras 54 d) y 55 d) corresponden a las hendiduras de la Figura 56 y las zonas claras corresponden a las estructuras sólidas. La distribución de las hendiduras entre las estructuras sólidas es similar en ambas fractografías por lo que se concluye que la falla del dado de corte es una falla frágil.



a)



b)

Figura 57: Esquema de la viga durante el ensayo a flexión.

La falla del dado de corte no se produce como consecuencia ni del cortante ni del flector, la forma de la rotura pertenece a una falla debida al contacto superficial.

La Figura 57 a) muestra la viga antes de aplicar carga y se observa en color rojo que el área resistente es a lo largo de toda la longitud del dado de corte. En la Figura 57 b) una vez que se ha aplicado la carga la viga fleja y el área resistente representada en color rojo es muy pequeña, la viga no llega a la rotura ya que la forma de trabajo permite la deformación de la viga antes de la rotura, entonces la pequeña área de contacto de la viga actúa a manera de cuña trabándose en el dado de corte, así también la deformación de la viga dentro del dado de corte que se muestra en la Figura 57 b) amplifica el esfuerzo, las fibras inferiores de la viga arrastran el material del dado de corte ocasionando que este se descascare y posteriormente se rompa.

Las aristas vivas presentes por la geometría de la ranura (cuadrada) son un concentrador de esfuerzos marcando el inicio de la falla inminente del dado de corte, además de ello el material del dado (que a pesar de ser dúctil) presenta un comportamiento frágil evidenciado en la invariabilidad dimensional de la ranura luego de la rotura y en las fractografías previamente analizadas.

El cálculo para el diseño de los dados de corte con ranura cuadrada debería realizarse aplicando la teoría de esfuerzos de contacto para encontrar el motivo por el cual se generan esfuerzos elevados (distribución

de esfuerzos) que causan la falla del dado y explicar así por qué los dados de corte de ranura circular al trabajar en las mismas condiciones no fallan.

3.2 DISEÑO DEL EXPERIMENTO – DISEÑO FACTORIAL

3.2.1 FACTORES, NIVELES Y VARIABLE DE RESPUESTA

El diseño factorial permite al investigador estudiar la influencia de ciertos factores sobre una o más variables de respuesta. Los factores pueden ser de carácter cualitativo o cuantitativo, es necesario que cada factor cuente con un mínimo de dos niveles para poder determinar su influencia sobre la variable de respuesta.

A continuación se citan los factores y sus respectivos niveles que se han tomado en cuenta para realizar el estudio de la influencia del esfuerzo cortante en la falla de vigas dúctiles cargadas transversalmente.

Tabla 10

Factores y niveles del diseño experimental

FACTORES	NIVELES
Sección de la Viga	8 mm de diámetro en acero. 7 mm de diámetro en aluminio.
	10 mm de diámetro en acero. 9,5 mm de diámetro en aluminio.
	12 mm de diámetro en acero. 12,7 mm de diámetro en aluminio.
Material de la Viga	Acero Estructural A36
	Aluminio

La variable de respuesta es entonces la luz existente entre el apoyo y el punzón a la cual la viga deja de fallar debido al esfuerzo cortante y empieza a fallar debido al esfuerzo flector.

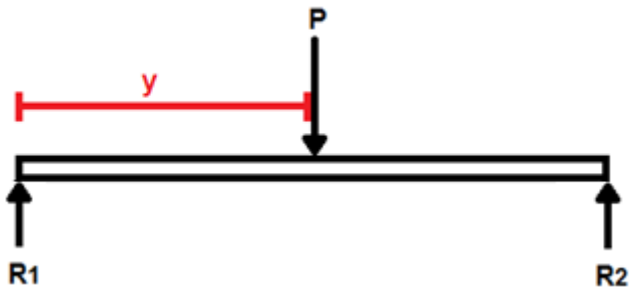


Figura 58: Esquema de la viga de prueba y la variable de respuesta.

La luz entre el apoyo y el punzón se irá variando en pasos que se definen más adelante en función de los resultados obtenidos en las pruebas piloto iniciando en 0 mm hasta la longitud en la cual el fallo de la viga deje de ser debido al esfuerzo cortante y falle debido al esfuerzo flector.

De acuerdo con los factores y sus niveles definidos anteriormente el diseño experimental más adecuado es un diseño factorial con dos factores 3x2 dado que tenemos dos factores (sección y material de la viga); el primero con tres niveles (pequeña, mediana y grande) y el segundo con dos niveles (acero y aluminio). Es necesario mencionar que en el nombre del diseño factorial se expresa también el número de tratamientos del experimento.

3.2.2 DEFINICIÓN DEL NÚMERO DE RÉPLICAS

Ahora bien una vez definido el número de tratamientos es necesario definir el número de réplicas del experimento a fin de establecer el número de corridas experimentales que se realizará.

Existen distintos métodos para determinar el tamaño muestral del experimento, pero para aplicar la mayoría de ellos es necesario tener datos sobre la varianza del error experimental, el presente proyecto no cuenta con dichos datos por lo cual se utilizarán las recomendaciones dadas en el texto Análisis y Diseño de Experimentos de Humberto Gutiérrez Pulido y Román de la Vara Salazar para establecer el tamaño muestral.

Generalmente el número de réplicas empleadas en los experimentos varía en un rango de entre 5 y 30, el número de réplicas puede fijarse en el menor o mayor valor del rango e inclusive salirse de mismo en función de las siguientes recomendaciones:

- Si en los tratamientos se esperan pequeñas diferencias es necesario que el número de réplicas sea mayor para poder identificar variaciones significativas y viceversa.
- Si se considera que la variación debida a fuentes no controlables dentro de los tratamientos será grande es necesario mayor número de réplicas.
- Si son algunos tratamientos (cuatro en adelante), entonces es aconsejable reducir el número de réplicas.
- Para definir el número de réplicas se debe tener en cuenta los costos y el tiempo total del experimento.

Teniendo en cuenta todas las recomendaciones se puede considerar un tamaño de muestra pequeño que responda las interrogantes de manera preliminar.

Entonces se define 3 réplicas para el presente proyecto debido a que los costos del mismo son elevados en lo referente a las probetas de aluminio,

siendo este un material costoso y altamente utilizado en el desarrollo del experimento, a más de ello no se esperan grandes variaciones en los datos ya que las variables no controlables (condiciones medio ambientales y materia prima) son despreciables. A demás 2 réplicas es el mínimo número de réplicas que requiere el diseño factorial para funcionar (esto se explica en el capítulo 2.7.7.1).

Entonces el número de corridas experimentales queda definido por la multiplicación del número de réplicas por el número de tratamientos (3x2x3), siendo 18 el número de corridas experimentales para el presente proyecto.

Es necesario considerar que la luz entre apoyo y punzón (variable de respuesta) irá cambiando su valor desde 0 mm hasta la longitud en la cual el esfuerzo flector sea el causante de la falla de la viga, por lo tanto los tratamientos se correrán para las distintas luces en pasos que se definen más adelante en función de las pruebas piloto.

3.2.3 PRUEBA PILOTO

La prueba piloto es una prueba preliminar que se realiza antes de las corridas experimentales con la finalidad de verificar el correcto funcionamiento del accesorio, también sondear la posible separación apoyo – punzón (variable de respuesta) a la cual la viga dejará de fallar debido al esfuerzo cortante para empezar a fallar debido al esfuerzo flector y el rango de prueba.

Consecuentemente en base a la posible variable de respuesta hallada en la prueba piloto se definirá el paso, el paso hace referencia a la mínima variación que se realizará a la distancia apoyo – punzón cada vez para incrementar la luz entre dichos elementos. El paso influirá directamente en el volumen muestral, por lo tanto es necesario tener en cuenta las recomendaciones consideradas al definir el número de réplicas del experimento.

3.2.3.1 CONTROL DE LA LUZ ENTRE EL APOYO Y EL PUNZÓN

Como se ha mencionado previamente el ensayo de las vigas se realiza variando la luz entre apoyo y punzón para determinar la transición entre la falla debida al esfuerzo cortante y la falla debida al esfuerzo flector. La variación de la separación apoyo – punzón para cada ensayo se controla mediante galgas de espesores.

Las galgas se fabrican en acero de baja aleación AISI 4130. Las propiedades mecánicas del acero AISI 4130 al ser mejores que las del acero ASTM A-588 y A36 con los que se fabricó los apoyos y el punzón respectivamente, garantizan que las galgas no se deformarán ni variarán sus dimensiones durante el control de la luz entre el apoyo y el punzón.

Las galgas se fabrican con diferentes espesores, y para cada espesor un par de galgas con la finalidad de facilitar el ensamble.

Durante el ensamble se colocan las galgas entre los apoyos y el punzón de acuerdo a la separación apoyo – punzón requerida, una vez que los apoyos tiene la separación requerida respecto al punzón se ajustan los pernos de las guías para fijar los apoyos, después de ajustar los pernos se retiran las galgas y se verifica la separación apoyo – punzón empleando un pie de rey.

Es necesario mencionar que el control de la separación apoyo – punzón se realizó únicamente antes de iniciar el ensayo, y que la comprobación de la separación apoyo – punzón una vez concluido el ensayo se omitió.

Figura 59: Galgas de espesores.

3.2.3.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS

Con la finalidad de identificar adecuadamente las probetas se ha desarrollado un código compuesto por números y letras, el mismo que se coloca en los especímenes de prueba antes de la realización del ensayo.

El código está compuesto por dos números el primero de ellos hace referencia a la probeta y el segundo hace referencia a la corrida experimental. Por lo tanto los valores del primer dígito del código están comprendidos entre cero (0) y nueve (9), mientras que el segundo dígito tomará valores entre uno (1) y tres (3).

En los extremos de la probeta se marca la letra “D” (derecho) o la letra “I” (izquierdo) para indicar la forma en la que la probeta se ensamblará en el accesorio al realizar el ensayo.

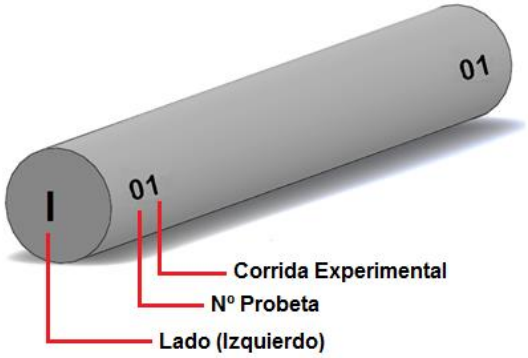


Figura 60: Identificación de las probetas.

3.2.3.3 RESULTADOS DE LA PRUEBA PILOTO DEL ACCESORIO

En el desarrollo de las pruebas piloto del accesorio se utilizaron tres probetas de sección circular crítica (12 mm de diámetro) y tres probetas de sección cuadrada crítica (11 mm de lado) dando un total de seis probetas y consecuentemente seis ensayos. Estas pruebas se realizaron con la finalidad de verificar si el accesorio funciona adecuadamente y verificar la carga máxima necesaria para que las probetas fallen.

La carga máxima de falla en las probetas circulares es $6{,}546 \times 10^4$ N y la carga calculada es $1{,}020 \times 10^5$ N, y en las probetas cuadradas la carga máxima de falla es $6{,}654 \times 10^4$ N y la carga calculada es $1{,}091 \times 10^5$ N.

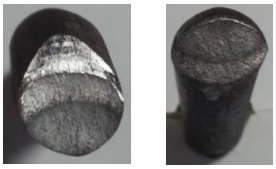
Entonces de las pruebas se concluye que la carga máxima de falla es menor a la carga calculada lo cual se debe posiblemente al proceso de fabricación de las varillas, la pureza de la materia prima, la homogeneidad del material, entre otros. Mismas que son variables que no se pueden controlar.

Para las dos geometrías de prueba la luz existente entre apoyo – punzón fue variable, es decir, se provocó la falla de las probetas a 0 mm (cortante puro), 5 mm (cortante – flector) y 15 mm (flector puro) de separación apoyo – punzón que se muestran en las figuras 62 y 63 a), b) y c) respectivamente,

en cada ensayo se marcó e identificó adecuadamente las probetas y se documentó los resultados, mismos que se pueden evidenciar en las siguientes figuras y tabla.

a)

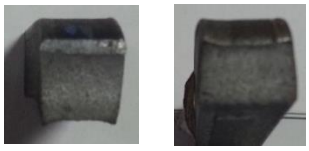
b)



c)

Figura 61: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular.

a)



b)

c)

Figura 62: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección cuadrada.

Tabla 11

Resultados de la prueba piloto en acero – Fuerza máxima (Kg)

GEOMETRÍA DE LA SECCIÓN	SEPARACIÓN APOYO – PUNZÓN (mm)		
	0	5	15
Circular	6 610	6 430	6 380
Cuadrada	6 400	6 950	6 600

3.2.3.4 METODOLOGÍA PARA EL PROCESAMIENTO DE LOS RESULTADOS

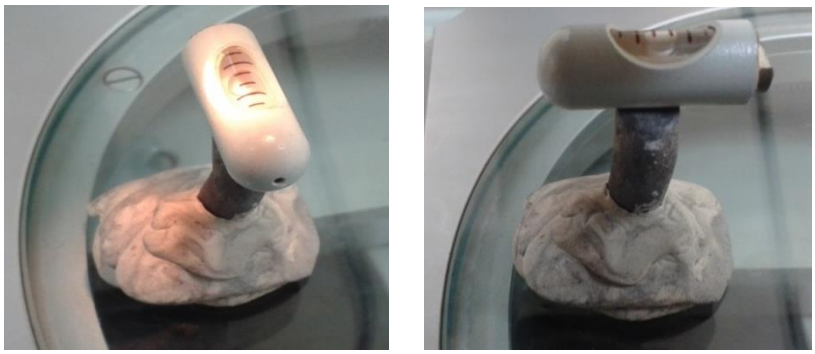
Una vez realizados los ensayos en las probetas es necesario procesar los resultados obtenidos a fin de alcanzar una respuesta satisfactoria para el presente proyecto de investigación, para lo cual es necesario llevar a cabo la siguiente metodología.

1. Realizar los ensayos destructivos en las probetas.
2. Medir la sección de los apoyos tanto derecho como izquierdo de las probetas luego del ensayo destructivo. Para medir mencionada sección se emplea el microscopio de herramientas del laboratorio de

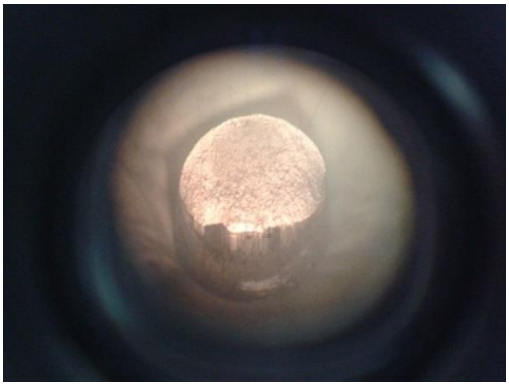
Metrología de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE y en las probetas de sección circular se toman tres medidas longitudinales y tres medidas transversales a fin de obtener un resultado los más preciso posible.

Para medir adecuadamente las secciones primero se debe colocar la probeta en el microscopio de herramientas como se muestra en la Figura 63 a), a continuación se nivela la sección tanto en su eje longitudinal como en su eje transversal como se indica en la Figura 63 b) a fin de asegurar que esté paralela al lente del microscopio y que los valores son precisos y confiables, posteriormente es necesario aclarar la imagen en el microscopio y finalmente se procede a tomar las medidas como se muestra en la Figura 63 c).

a)



b)



c)

Figura 63: Medición de la sección.

3. Una vez obtenidos los valores longitudinales y transversales de la sección de los apoyos derecho e izquierdo se elaboran las gráficas Medida Longitudinal y Transversal vs. Separación Apoyo-Punzón y Excentricidad vs. Separación Apoyo-Punzón tanto para las secciones del apoyo derecho como para las secciones del apoyo izquierdo.
4. Una vez elaboradas las gráficas se procede a realizar su respectivo análisis, para lo cual se deben seguir los siguientes pasos.

   Primero es necesario dividir a la curva en las tres zonas de falla, los primeros puntos ubicados a la izquierda de la curva se encuentran en la zona de falla debida al esfuerzo cortante puro, los puntos ubicados a la derecha de la curva en la sección más uniforme de la misma pertenecen a la zona de falla debida al esfuerzo flector puro, consecuentemente la parte restante de la curva es la zona de falla debida a la mezcla de esfuerzos cortantes y flectores. Entonces en la zona central de la gráfica se ubica el punto de transición que indica el final de la zona de falla debida a esfuerzo cortante – flector y consecuentemente da inicio a la zona de falla debida al esfuerzo flector puro.

   Después de dividir la curva en las zonas previamente mencionadas se procede a analizar la tendencia de las zonas de la curva. Para hallar la transición es necesario tomar en cuenta la variación en las

concavidades y tendencia de la curva correspondiente a la zona de falla debida al esfuerzo cortante – flector, es así que cuando cambia la inflexión o la tendencia de la curva y teniendo en cuenta las zonas de falla se puede ubicar la zona de transición para la probeta en cuestión. Este análisis se realiza en las gráficas de Medida Longitudinal y Transversal vs. Separación Apoyo-Punzón, Excentricidad vs. Separación Apoyo-Punzón y Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón.

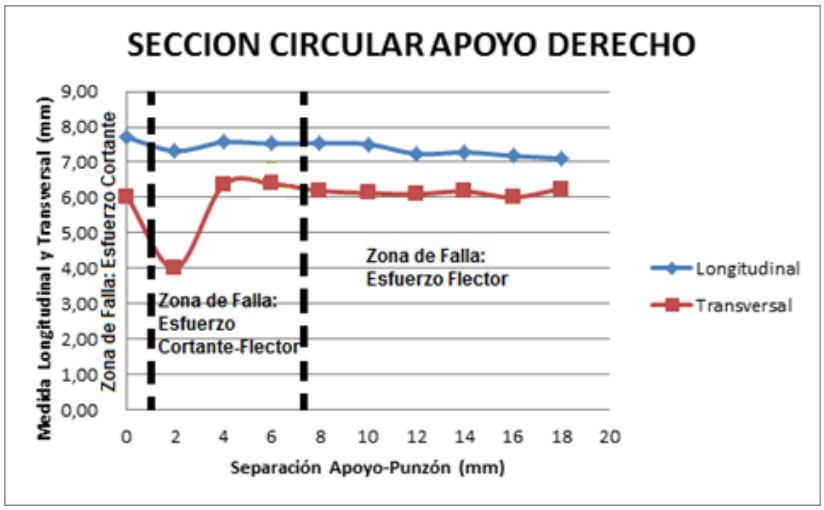


Figura 64: Procedimiento para el análisis de gráficas.

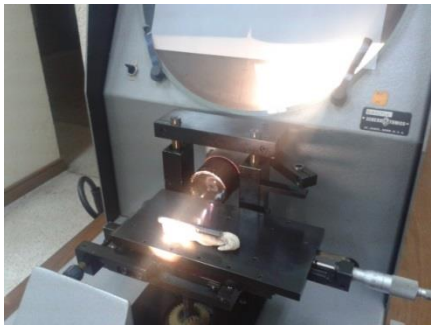
5. Una vez concluido el análisis de las secciones se procede a medir los radios de curvatura de las probetas correspondientes a los apoyos derecho e izquierdo, para lo cual se emplea el Proyector de Perfiles Meopta Magnifax 3 del laboratorio de Metrología de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. El procedimiento que se sigue para medir los radios de curvatura es el siguiente:

   Primero se coloca la probeta en el proyector de perfiles (ver Figura 65 a)), es necesario colocar la probeta completa, es decir, las tres secciones que conforman una probeta luego del ensayo destructivo. La probeta debe estar totalmente alineada y paralela al lente del proyector a fin de medir el radio de curvatura real, para garantizar el

paralelismo se emplean niveles y escuadras como se indica en la Figura 65 b). Finalmente se enfoca el radio de curvatura y se procede a dibujar el mismo en una hoja de papel pergamino de acuerdo a lo que indica las figuras 65 c) y d). Posteriormente se escanea el dibujo del radio de curvatura y empleando el software AutoCAD se obtiene el radio de curvatura de la probeta como se puede constatar en la Figura 65 e). Una vez obtenidos los radios de curvatura se elabora la gráfica Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón, se analiza la misma de acuerdo a lo especificado en el punto 4 y se concluye en función del análisis realizado.

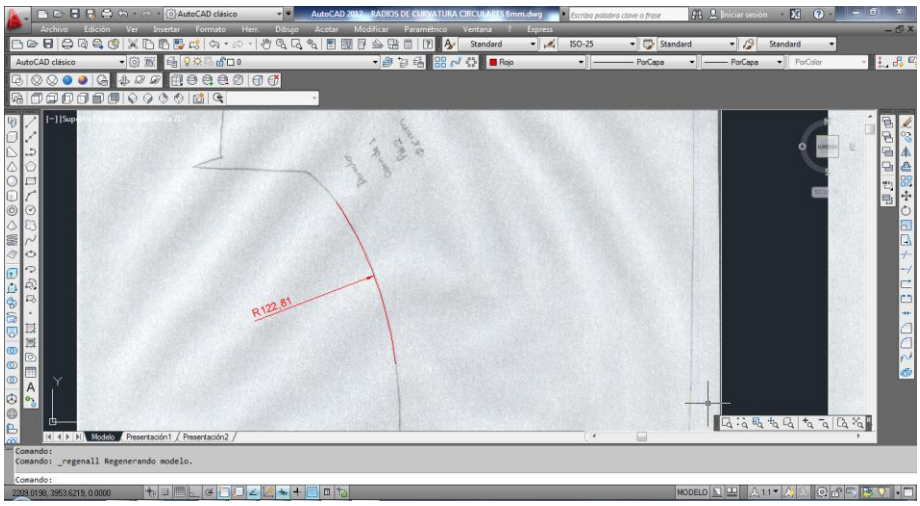
a)

b)



c)

d)



e)

Figura 65: Procedimiento para la medición de los radios de curvatura.

3.2.3.5 RESULTADOS DE LA PRUEBA PILOTO DEL EXPERIMENTO EN VIGAS DE ACERO

Al realizar las pruebas piloto del experimento se procedió a ensayar un lote completo de probetas de sección circular de diámetro 8 mm, 10 mm y 12 mm, un lote completo de pruebas piloto comprende la variación de la luz entre apoyo – punzón desde 0 mm hasta 18 mm para la sección circular de diámetro 8 mm, desde 0 mm hasta 20 mm para la sección circular de diámetro 10 mm, y desde 0 mm hasta 22 mm para la sección circular de diámetro 12 mm; con pasos (incrementos de la luz entre apoyo – punzón) de 2 mm en cada ensayo.

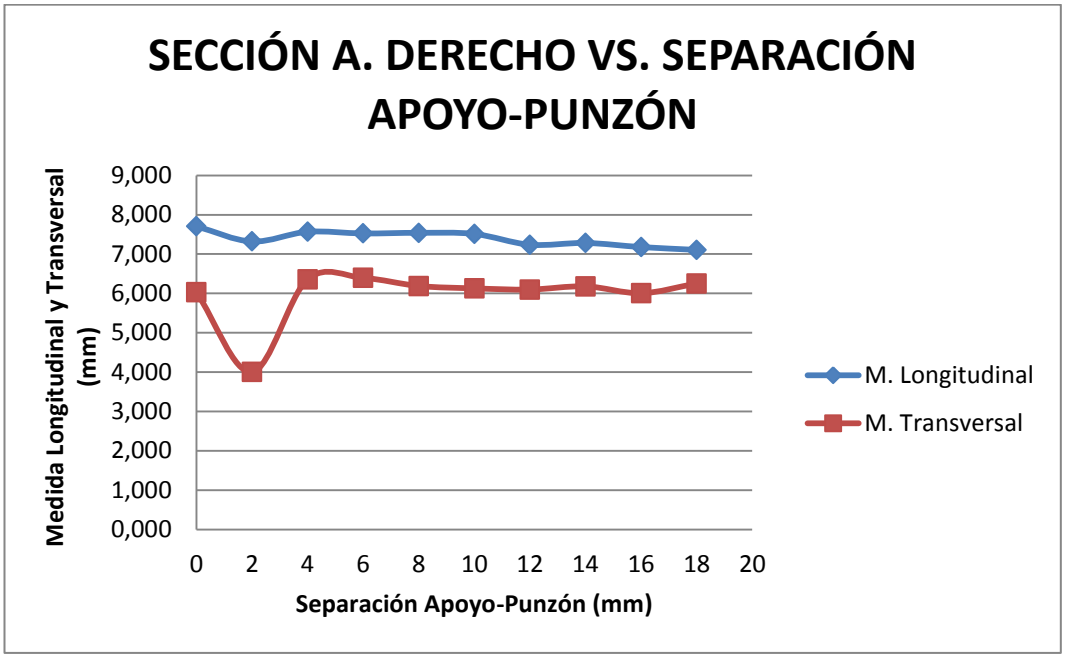
Los resultados obtenidos en estas pruebas se muestran en las gráficas y tablas siguientes.

A partir de los resultados obtenidos de estas pruebas piloto se definirá el paso para las corridas experimentales, es decir, la variación de la luz existente entre apoyo – punzón y el rango de prueba que se utilizarán en el experimento para cada una de las secciones de prueba.

Tabla 12

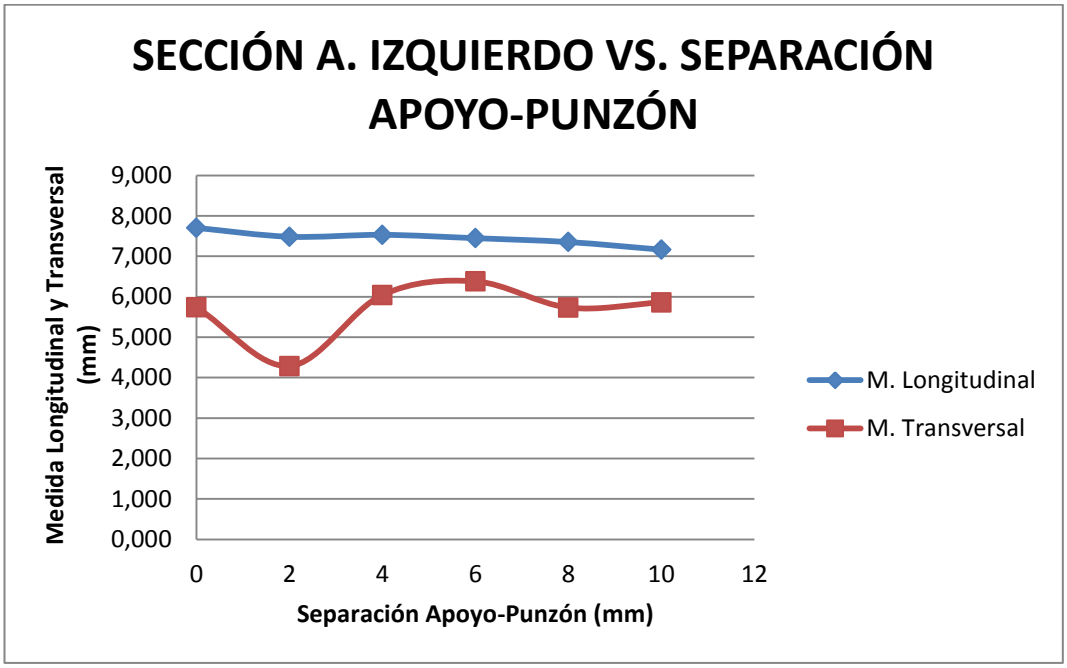
Resultados de las pruebas piloto de la sección circular de acero de diámetro 8 mm – Verificación de la sección (diámetro) luego del ensayo

TABLA DE RESUMEN							
SECCIÓN CIRCULAR DIÁMETRO 8 mm							
		APOYO DERECHO			APOYO IZQUIERDO		
Nº	LUZ (mm)	MEDIDA LONGITUDINAL (mm)	MEDIDA TRANSVERSAL (mm)	EXCENTRICIDAD	MEDIDA LONGITUDINAL (mm)	MEDIDA TRANSVERSAL (mm)	EXCENTRICIDAD
0	0	7,706	6,030	1,278	7,703	5,743	1,341
1	2	7,322	4,001	1,830	7,485	4,287	1,746
2	4	7,568	6,357	1,190	7,532	6,044	1,246
3	6	7,525	6,395	1,177	7,449	6,381	1,167
4	8	7,541	6,189	1,218	7,353	5,733	1,283
5	10	7,513	6,129	1,226	7,165	5,861	1,222
6	12	7,239	6,099	1,187	-	-	-
7	14	7,284	6,180	1,179	-	-	-
8	16	7,179	6,007	1,195	-	-	-
9	18	7,107	6,253	1,137	-	-	-



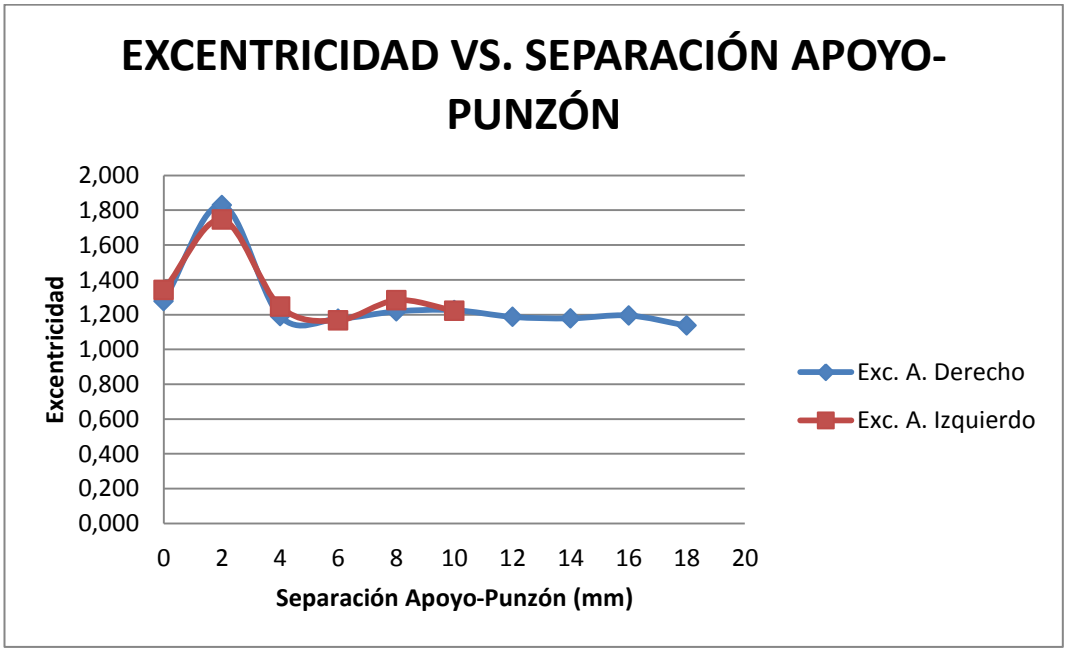
Gráfica 1: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 8 mm apoyo derecho – Medida Longitudinal y Transversal vs. Separación Apoyo-Punzón.

Las curvas de la Gráfica 1 presentan una tendencia prácticamente lineal y uniforme, en la curva de medidas transversales el segundo punto (correspondiente a 2 mm de separación apoyo – punzón) no sigue la tendencia lineal. De estas curvas no se obtiene información relevante respecto a la ubicación de la zona de transición.



Gráfica 2: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 8 mm apoyo izquierdo – Medida Longitudinal y Transversal vs. Separación Apoyo-Punzón.

La curva de medidas longitudinales de la Gráfica 2 tiene una tendencia lineal y no muestra cambios en su tendencia que permitan identificar las distintas zonas de falla. La curva de las medidas transversales presenta cambios en su concavidad, pero al no tener todos los datos debido a que no todas las probetas correspondientes al apoyo izquierdo llegaron a la fractura no se puede analizar toda la curva y consecuentemente no se obtiene un resultado confiable, por lo tanto las curvas de la Gráfica 2 no proporcionan información contundente de la zona de transición.



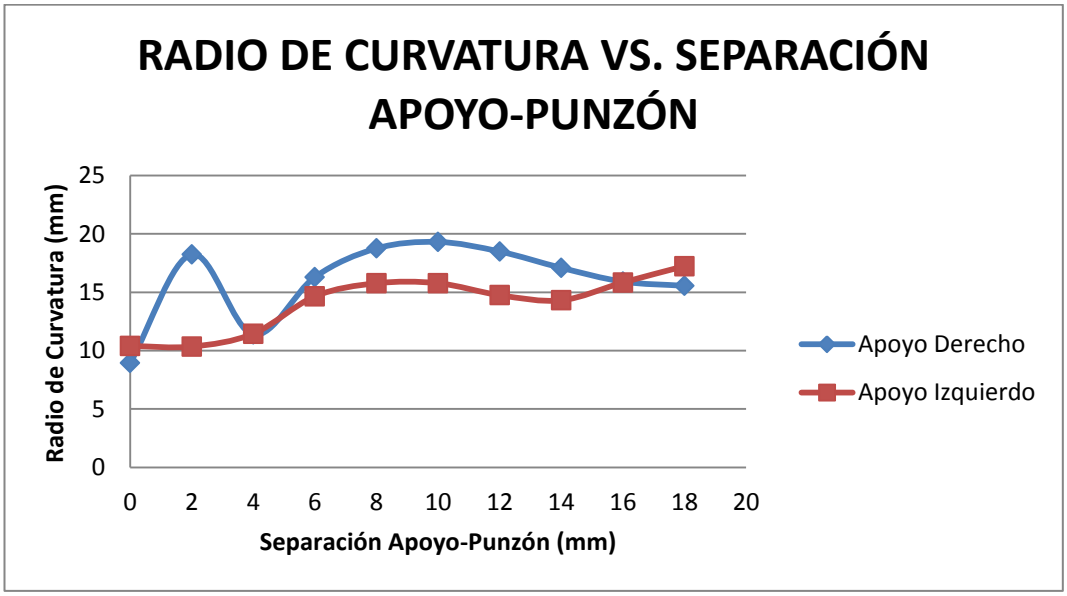
Gráfica 3: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 8 mm – Excentricidad vs. Separación Apoyo-Punzón.

La excentricidad al ser la relación entre las medidas longitudinales y las medidas transversales de la sección, tampoco proporciona información válida sobre la ubicación de la zona de transición. Al analizar las curvas de la Gráfica 3 estas tendrían una tendencia lineal si se excluye el segundo punto correspondiente a 2 mm de separación apoyo – punzón, lo cual es evidente en las gráficas 1 y 2.

Tabla 13

Resultados de las pruebas piloto de la sección circular de acero de diámetro 8 mm – Verificación del radio de curvatura luego del ensayo

TABLA DE RESUMEN			
SECCIÓN CIRCULAR DIÁMETRO 8 mm			
		RADIO DE CURVATURA (mm)	
Nº	LUZ	APOYO DERECHO	APOYO IZQUIERDO
0	0	8,932	10,398
1	2	18,243	10,345
2	4	11,377	11,452
3	6	16,300	14,646
4	8	18,751	15,770
5	10	19,306	15,775
6	12	18,485	14,746
7	14	17,089	14,311
8	16	15,907	15,836
9	18	15,550	17,235



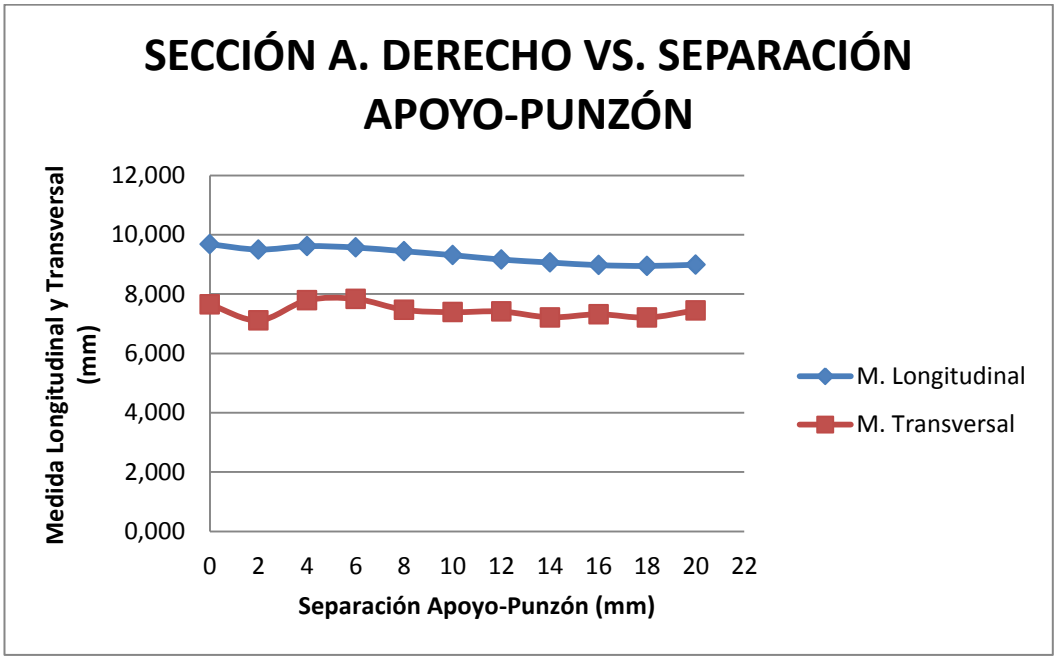
Gráfica 4: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 8 mm – Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón.

Las dos curvas de la Gráfica 4 tienen tendencias similares, los primeros puntos de las curvas (de izquierda a derecha) pertenecen a la zona de falla debida al esfuerzo cortante. Los puntos agrupados en el lado derecho de la gráfica se encuentran en la zona de falla debida al esfuerzo flector, entonces la zona de transición marca el inicio del cambio de concavidad de la curva. Es así que la zona de transición está ubicada entre 2 y 6 mm de separación apoyo – punzón.

Tabla 14

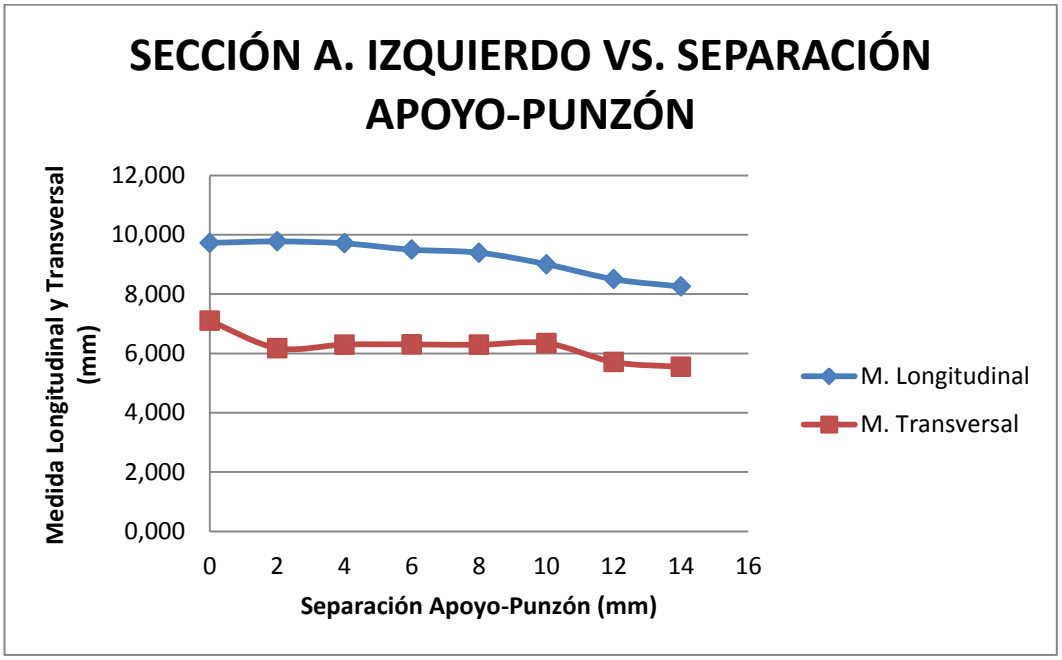
Resultados de las pruebas piloto de la sección circular de acero de diámetro 10 mm – Verificación de la sección (diámetro) luego del ensayo

TABLA DE RESUMEN							
SECCIÓN CIRCULAR DIÁMETRO 10 mm							
		APOYO DERECHO			APOYO IZQUIERDO		
Nº	LUZ (mm)	MEDIDA LONGITUDINAL (mm)	MEDIDA TRANSVERSAL (mm)	EXCENTRICIDAD	MEDIDA LONGITUDINAL (mm)	MEDIDA TRANSVERSAL (mm)	EXCENTRICIDAD
0	0	9,681	7,650	1,265	9,727	7,099	1,370
1	2	9,501	7,114	1,336	9,775	6,180	1,582
2	4	9,617	7,792	1,234	9,711	6,298	1,542
3	6	9,570	7,837	1,221	9,497	6,305	1,506
4	8	9,444	7,469	1,265	9,396	6,291	1,494
5	10	9,312	7,392	1,260	9,008	6,349	1,419
6	12	9,163	7,414	1,236	8,503	5,710	1,489
7	14	9,065	7,216	1,256	8,254	5,546	1,488
8	16	8,976	7,320	1,226	-	-	-
9	18	8,949	7,208	1,242	-	-	-
10	20	8,991	7,451	1,207	-	-	-



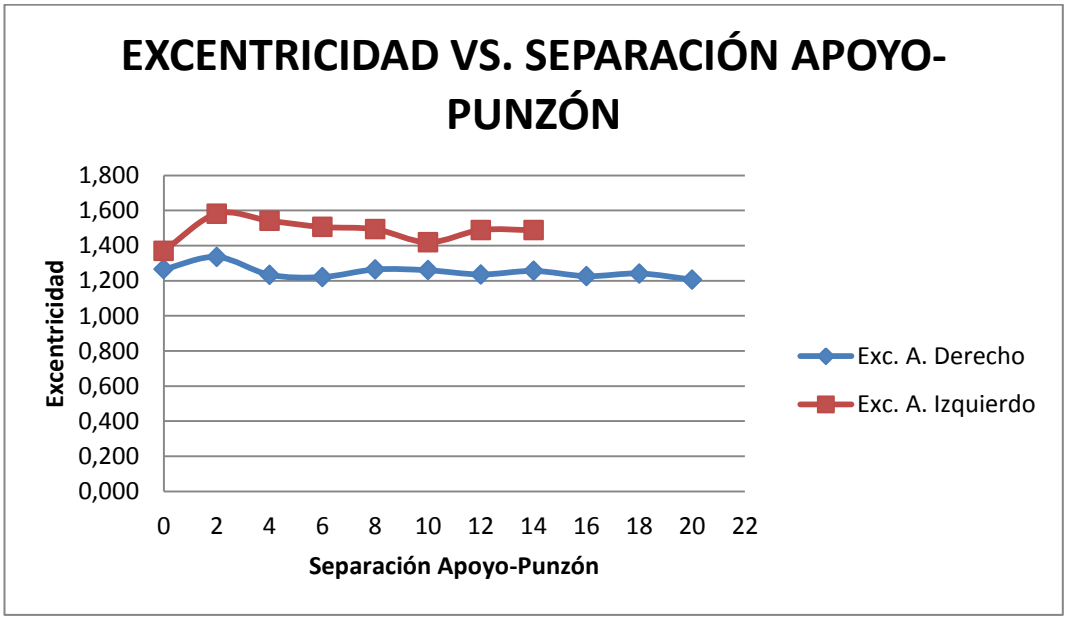
Gráfica 5: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 10 mm apoyo derecho – Medida Longitudinal y Transversal vs. Separación Apoyo-Punzón.

La tendencia de las curvas de la Gráfica 5 es prácticamente lineal, por lo que no se puede determinar la zona de transición.



Gráfica 6: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 10 mm apoyo izquierdo – Medida Longitudinal y Transversal vs. Separación Apoyo-Punzón.

Las curvas de la Gráfica 6 no presentan cambios de concavidad, son lineales y semejantes entre sí pero no son útiles para definir la zona de transición.



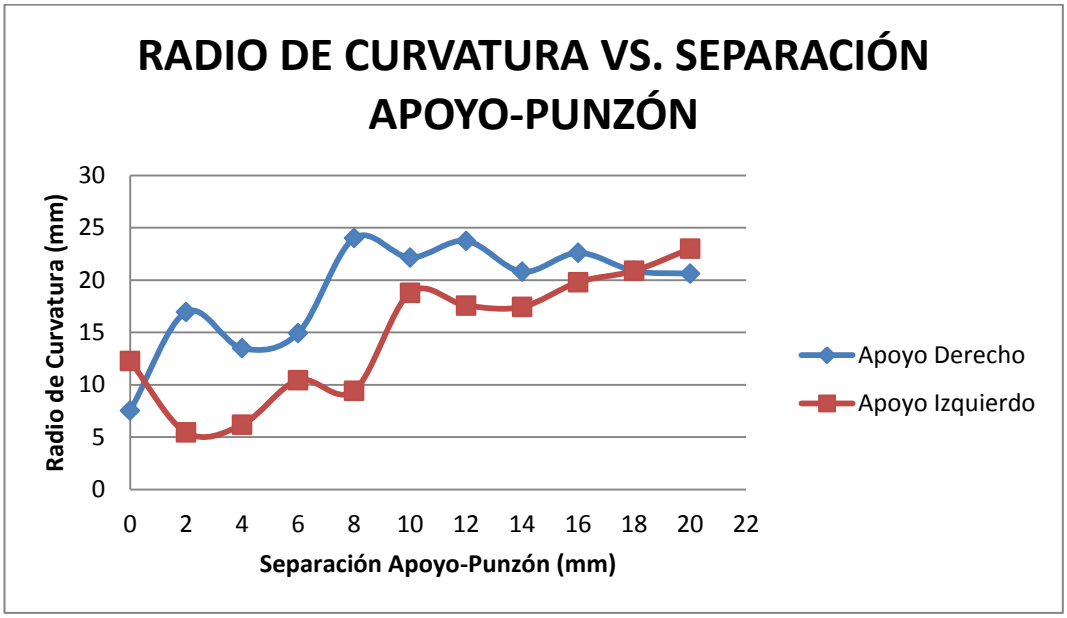
Gráfica 7: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 10 mm – Excentricidad vs. Separación Apoyo-Punzón.

Las curvas de la Gráfica 7 presentan una tendencia lineal, sin cambios de concavidad lo cual impide determinar la zona de transición. La Gráfica 7 depende de los valores obtenidos al medir las secciones longitudinal y transversalmente y ya que las gráficas 5 y 6 no proporcionan información significativa para definir la zona de transición, la Gráfica 7 tampoco lo hará.

Tabla 15

Resultados de las pruebas piloto de la sección circular de acero de diámetro 10 mm – Verificación del radio de curvatura luego del ensayo

TABLA DE RESUMEN			
SECCIÓN CIRCULAR DIÁMETRO 10 mm			
		RADIO DE CURVATURA (mm)	
Nº	LUZ	APOYO DERECHO	APOYO IZQUIERDO
0	0	7,514	12,263
1	2	16,949	5,445
2	4	13,494	6,181
3	6	14,929	10,434
4	8	24,004	9,426
5	10	22,157	18,788
6	12	23,747	17,573
7	14	20,797	17,439
8	16	22,605	19,802
9	18	20,878	20,890
10	20	20,615	22,993



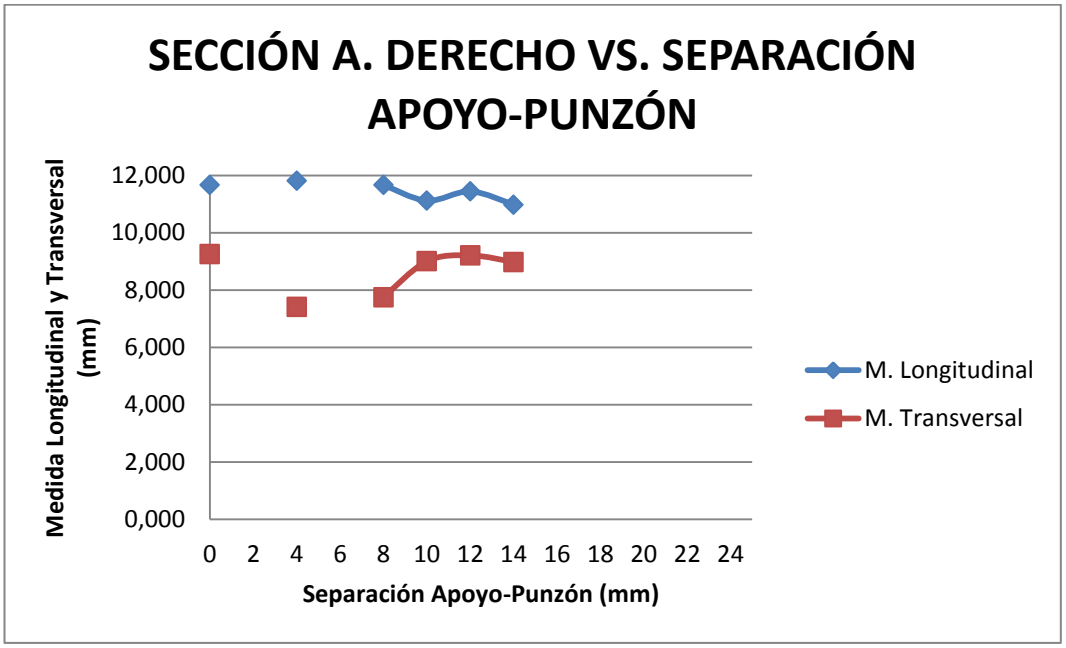
Gráfica 8: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 10 mm – Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón.

Al analizar la Gráfica 8 se toma en cuenta los cambios de concavidad de las curvas que delimitan las diferentes zonas de falla. De izquierda a derecha los primeros puntos corresponden a la falla debida al esfuerzo cortante, los puntos aglutinados al lado derecho de la gráfica presentan una tendencia estable y corresponden a la falla debida al esfuerzo flector, consecuentemente a zona de transición está entre 2 y 8 mm de separación apoyo – punzón.

Tabla 16

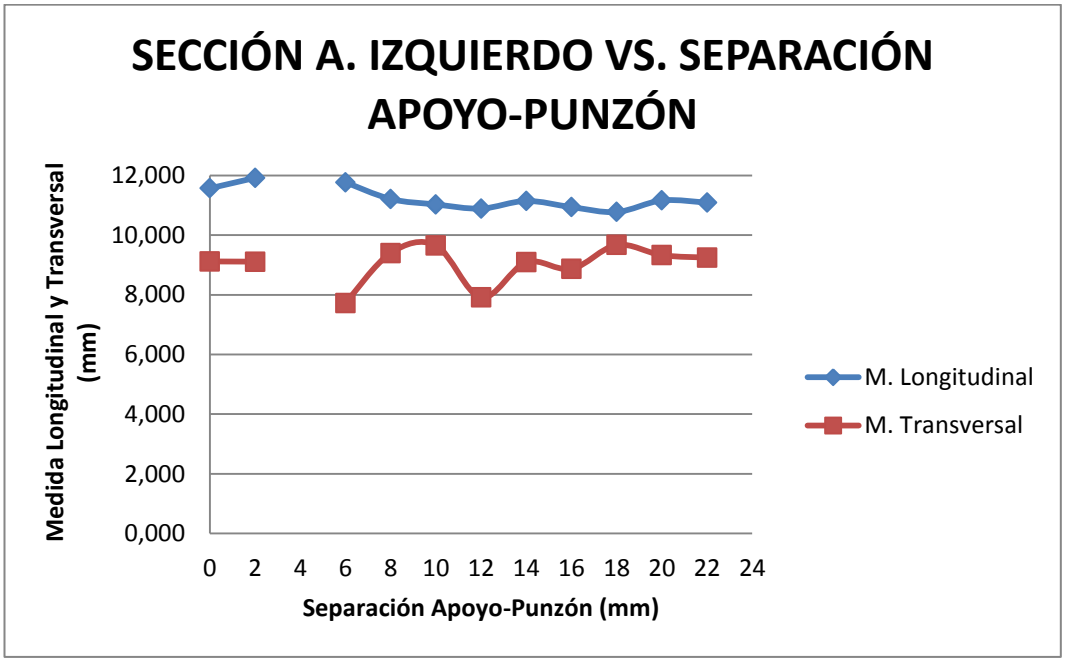
Resultados de las pruebas piloto de la sección circular de acero de diámetro 12 mm – Verificación de la sección (diámetro) luego del ensayo

TABLA DE RESUMEN							
SECCIÓN CIRCULAR DIÀMETRO 12 mm							
		APOYO DERECHO			APOYO IZQUIERDO		
Nº	LUZ (mm)	MEDIDA LONGITUDINAL (mm)	MEDIDA TRANSVERSAL (mm)	EXCENTRICIDAD	MEDIDA LONGITUDINAL (mm)	MEDIDA TRANSVERSAL (mm)	EXCENTRICIDAD
0	0	11,665	9,259	1,260	11,569	9,118	1,269
1	2	-	-	-	11,919	9,111	1,308
2	4	11,814	7,413	1,594	-	-	-
3	6	-	-	-	11,772	7,718	1,525
4	8	11,672	7,748	1,507	11,209	9,400	1,192
5	10	11,120	9,008	1,235	11,028	9,657	1,142
6	12	11,445	9,213	1,242	10,890	7,912	1,376
7	14	10,981	8,980	1,223	11,145	9,091	1,226
8	16	-	-	-	10,939	8,865	1,234
9	18	-	-	-	10,776	9,670	1,114
10	20	-	-	-	11,162	9,328	1,197
11	22	-	-	-	11,087	9,248	1,199



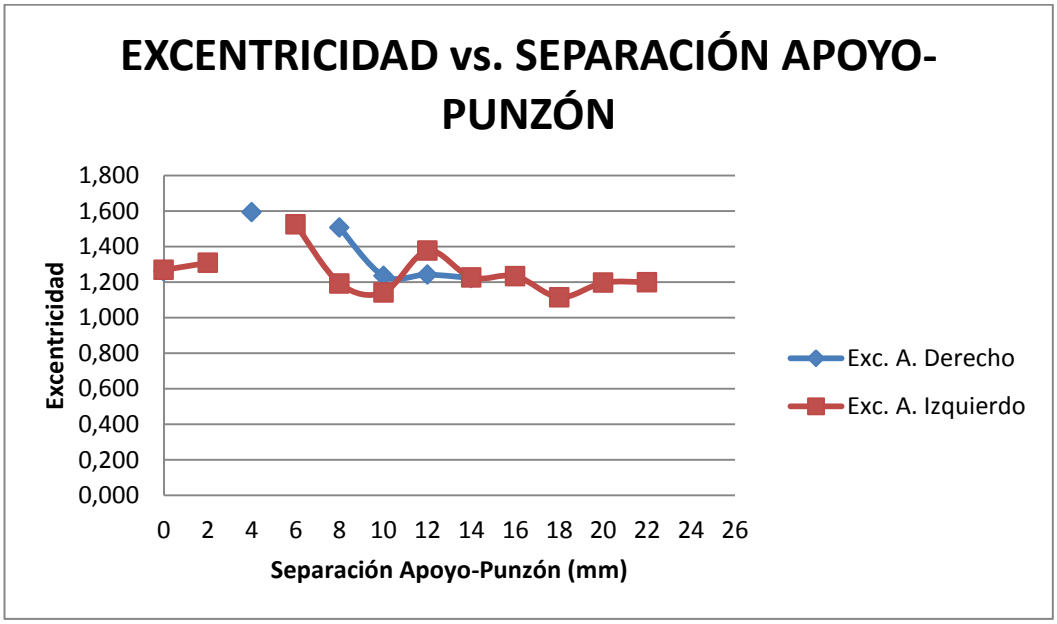
Gráfica 9: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 12 mm apoyo derecho – Medida Longitudinal y Transversal vs. Separación Apoyo-Punzón.

En las curvas de la Gráfica 9 faltan puntos debido a que no en todas las probetas el apoyo derecho se rompió. La curva de las medidas longitudinales presenta una tendencia lineal, mientras que la curva de las medidas transversales presenta dos cambios de concavidad, a pesar de ello es imposible determinar la zona de transición debido a la falta de puntos.



Gráfica 10: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 12 mm apoyo izquierdo – Medida Longitudinal y Transversal vs. Separación Apoyo-Punzón.

En la curva de medidas longitudinales de la Gráfica 10 los puntos presentan una tendencia lineal, la curva de las medidas transversales tiene una tendencia lineal a pesar de que ciertos puntos presentan variabilidad. Al no haber cambios bruscos en la tendencia de las curvas no se puede determinar la zona de transición en función de las dimensiones de la sección.



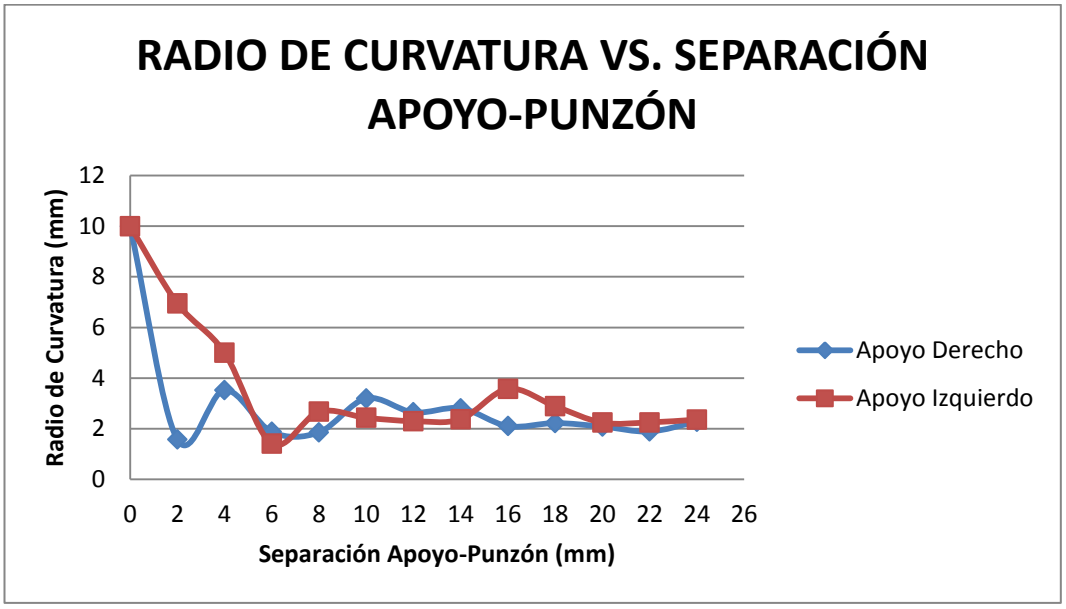
Gráfica 11: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 12 mm – Excentricidad vs. Separación Apoyo-Punzón.

Las curvas de la Gráfica 11 no tienen suficientes puntos por lo que no es posible analizar la tendencia de las mismas, además la excentricidad al ser la relación entre las medidas longitudinales y transversales de la sección analizada en las dos gráficas anteriores no aporta con información relevante para determinar la zona de transición.

Tabla 17

Resultados de las pruebas piloto de la sección circular de acero de diámetro 12 mm – Verificación del radio de curvatura luego del ensayo

TABLA DE RESUMEN			
SECCIÓN CIRCULAR DIÁMETRO 12 mm			
		RADIO DE CURVATURA (mm)	
Nº	LUZ	APOYO DERECHO	APOYO IZQUIERDO
0	0	10,000	10,000
1	2	1,577	6,950
2	4	3,528	5,000
3	6	1,875	1,415
4	8	1,859	2,672
5	10	3,198	2,433
6	12	2,646	2,303
7	14	2,807	2,378
8	16	2,103	3,577
9	18	2,225	2,888
10	20	2,085	2,243
11	22	1,893	2,251
12	24	2,278	2,362



Gráfica 12: Resultados de la prueba piloto en probetas de sección circular de diámetro 12 mm – Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón.

Finalmente al analizar la Gráfica 12 se determina que la zona de transición se encuentra entre 2 y 10 mm de separación apoyo – punzón, a partir de 10 mm de separación apoyo – punzón los puntos de la curva se estabilizan en una tendencia lineal correspondiente a la falla debida a la influencia del esfuerzo flector.

Las pruebas piloto se realizaron también en probetas de sección cuadrada crítica (11 mm de lado) y en probetas de sección cuadra de 8 mm de lado, obteniendo como resultado la rotura de los dados de corte, motivo por el cual las pruebas piloto no se pudieron concluir y consecuentemente no se obtuvieron datos analizables.

a) b) c)

Figura 66: Prueba piloto en probetas de sección circular de acero.

La Figura 66 indica las probetas de las pruebas piloto de la sección circular de acero luego de la rotura, el literal a) corresponde a las probetas de 8 mm de diámetro, el literal b) a las probetas de 10 mm de diámetro, y el literal c) a las probetas de 12 mm de diámetro.

El análisis visual de las probetas de las pruebas piloto se realiza considerando el radio de curvatura de las probetas y la deformación respecto al eje radial. Las probetas que fallan debido a la influencia del esfuerzo cortante no presentan radios de curvatura y la deformación respecto al eje radial es mínima, esto se evidencia en las primeras probetas de la Figura 66, las últimas en cambio presentan radios de curvatura y una considerable deformación respecto al eje radial lo cual es característica propia de la falla debida a la influencia del esfuerzo flector. Entonces del análisis visual el rango de transición para las probetas de 8 mm de diámetro está entre las probetas 2 y 4 correspondientes a 4 y 8 mm de separación apoyo – punzón, para las probetas de 10 mm de diámetro entre las probetas 3 y 5 correspondientes a 6 y 10 mm de separación apoyo – punzón, y para las probetas de 12 mm de diámetro está entre las probetas 4 y 6 correspondientes a 8 y 12 mm de separación apoyo – punzón.

3.2.3.5.1 DEFINICIÓN DEL PASO DE LAS PROBETAS DE ACERO

El paso (variación de la separación apoyo – punzón) que se empleará en las corridas experimentales para las secciones circulares de acero será cada 2 mm, y en la zona de transición el paso será de 1 mm para obtener mayor cantidad de datos en esta zona.

El rango de prueba varía para cada sección ya que la zona de transición en cada una es distinta. Para cada sección se realizarán tres corridas experimentales, cada corrida experimental comprende diez ensayos en los

cuales se variará la separación apoyo – punzón. En la siguiente tabla se detallan los valores que tomará la separación apoyo – punzón para cada sección de prueba. Las separaciones apoyo – punzón se han definido teniendo en cuenta la zona de transición entre la falla debida al esfuerzo cortante y la falla debida al esfuerzo flector de cada sección de prueba.

Tabla 18

Tabla de resumen del rango de prueba y el paso para cada sección circular de acero

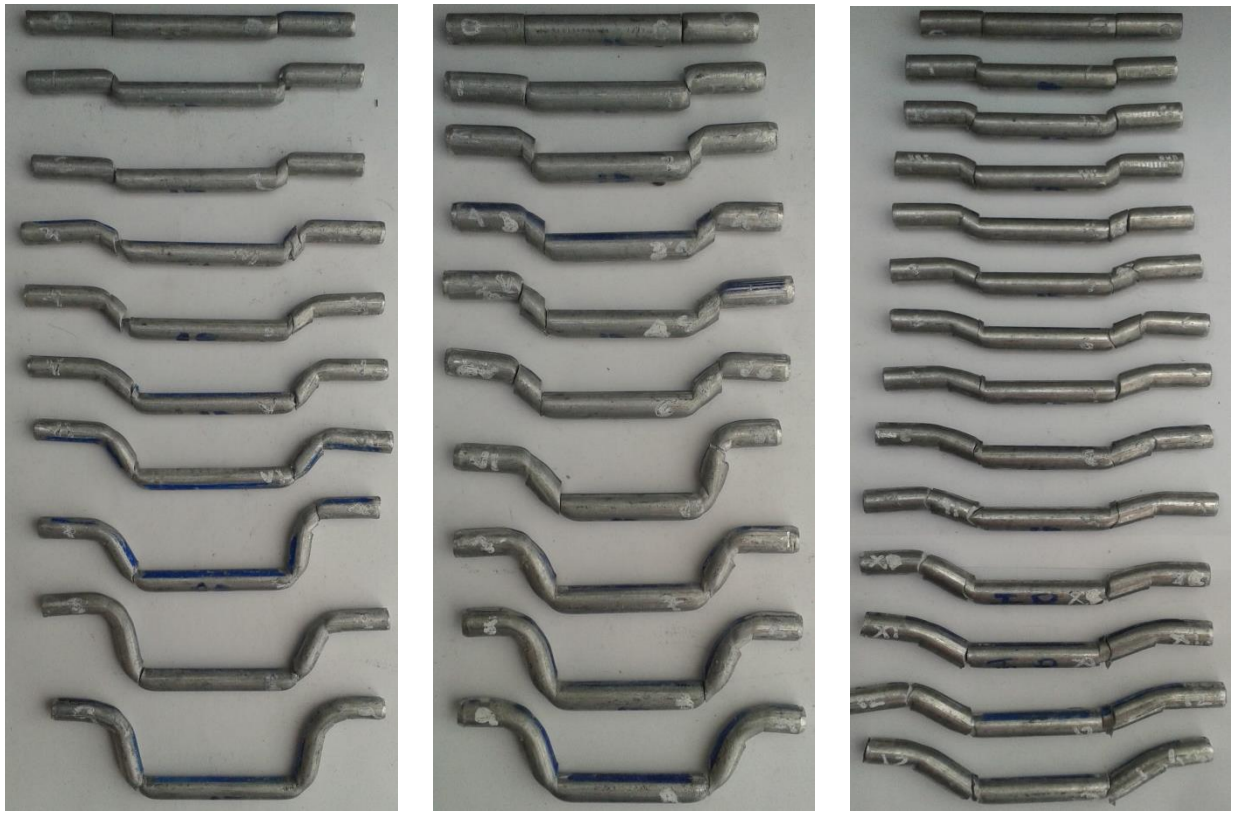
	DIÁMETRO DE LA SECCIÓN CIRCULAR DE ACERO		
	8 mm	**10 mm**	**12 mm**
SEPARACIÓN APOYO – PUNZÓN (mm)	0	0	0
	2	2	4
	4	4	8
	5	6	9
	6	7	10
	7	8	11
	8	9	12
	10	10	14
	12	12	16
	14	14	18

3.2.3.6 RESULTADOS DE LA PRUEBA PILOTO DEL EXPERIMENTO EN VIGAS DE ALUMINIO

En el procesamiento de resultados de las pruebas piloto de las probetas de aluminio no se analiza las dimensiones de las secciones ya que no proporcionan datos útiles, y ya que el análisis visual proporciona datos semejantes a los datos obtenidos a partir del análisis de los radios de curvatura el rango experimental y el paso para las corridas experimentas de las probetas de aluminio se define en base al análisis visual únicamente ya que este proporciona datos certeros de manera instantánea.

El análisis visual de las probetas de las pruebas piloto se realiza teniendo en cuenta los radios de curvatura de las probetas y la deformación respecto al eje radial. Del análisis visual de las probetas de aluminio mostradas en la Figura 67 se define al rango de transición para las probetas de 7 mm de diámetro entre las probetas 2 y 4 correspondientes a 4 y 8 mm de separación apoyo – punzón, para las probetas de 9,5 mm de diámetro entre las probetas 2 y 5 correspondientes a 4 y 10 mm de separación apoyo – punzón, y para las probetas de 12,7 mm de diámetro está entre las probetas 2 y 6 correspondientes a 4 y 12 mm de separación apoyo – punzón.

La Figura 67 indica las probetas de las pruebas piloto de la sección circular de aluminio luego de la rotura, el literal a) corresponde a las probetas de 7 mm de diámetro, el literal b) a las probetas de 9,5 mm de diámetro, y el literal c) a las probetas de 12,7 mm de diámetro.



a) b) c)

Figura 67: Prueba piloto en probetas de sección circular de aluminio.

3.2.3.6.1 DEFINICIÓN DEL PASO DE LAS PROBETAS DE ALUMINIO

El paso que se empleará en las corridas experimentales de las probetas de aluminio será de 2 mm. El rango de prueba varía para cada sección ya que la zona de transición en cada una es distinta. Para cada sección se realizarán tres corridas experimentales, cada corrida experimental comprende diez ensayos en los cuales se variará la separación apoyo – punzón. En la siguiente tabla se detallan los valores que tomará la separación apoyo – punzón para cada sección de prueba.

Tabla 19

Tabla de resumen del rango de prueba y el paso para cada sección circular de aluminio

	DIÁMETRO DE LA SECCIÓN CIRCULAR DE ALUMINIO		
	7 mm	**9,5 mm**	**12,7 mm**
SEPARACIÓN APOYO – PUNZÓN (mm)	0	0	0
	2	2	4
	4	4	8
	6	6	10
	8	8	12
	10	10	14
	12	12	16
	14	14	18
	16	16	22
	18	18	26

CAPÍTULO 4

PROCESAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 PROCESAMIENTO DE DATOS

Al realizar cada ensayo es necesario tomar datos para su posterior análisis, los datos que se deben tomar en cada ensayo son:

- El valor de la carga máxima aplicada, este valor es proporcionado por la máquina de ensayos universal al momento de realizar el ensayo.
- Las gráficas correspondientes a cada ensayo de Esfuerzo vs. Deformación que proporciona la máquina. Las unidades de mencionadas gráficas son mm de la gráfica que entrega la máquina. (Ver Anexo D).
- Las gráficas son útiles en el cálculo del trabajo. El primer paso es encontrar el área bajo la curva, para lo cual se escanea la gráfica, posteriormente se delimita el área (se considera que el área total divida para dos es el área de uno de los apoyos), y con la ayuda del software AutoCAD se determina el área, posteriormente se realizan los cálculos y transformaciones respectivas y se obtiene el trabajo.
- Una vez concluidos los ensayos se procede a medir la sección resultante (luego del ensayo) de las probetas para lo cual se emplea el procedimiento mencionado en el capítulo 3.2.3.4.
- Posteriormente se obtiene el radio de curvatura de las probetas siguiendo los pasos del procedimiento detallado en el capítulo 3.2.3.4 y se realiza la inspección visual de las probetas (Ver Anexo E).

Una vez obtenidos los datos previamente mencionados se procede al análisis de los mismos.

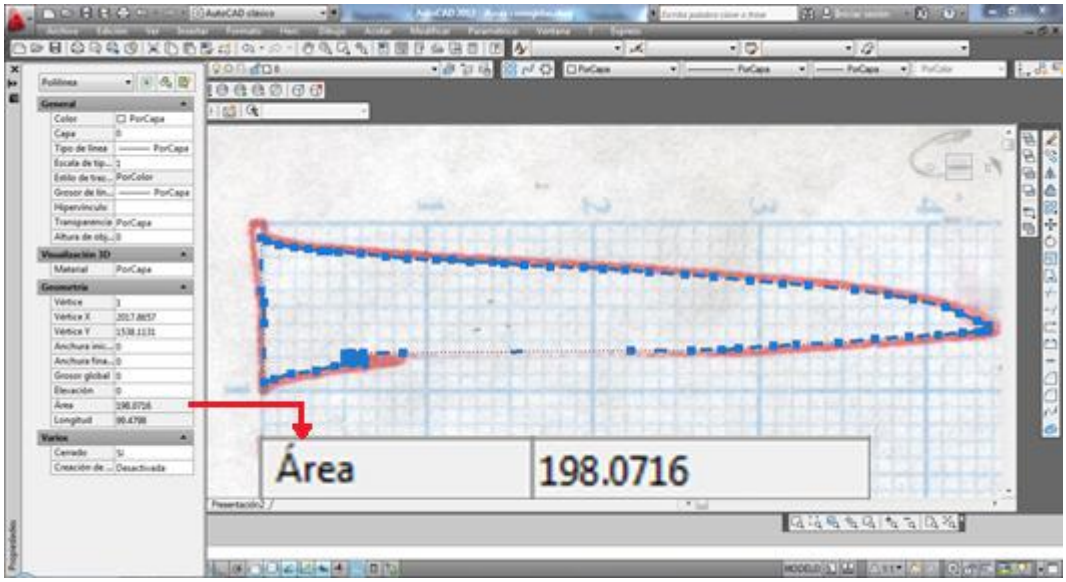


Figura 68: Procedimiento para determinar el área bajo la curva Esfuerzo vs. Deformación.

Ejemplo de cálculo de trabajo.

El ejemplo de cálculo se realizará para la probeta 01 de la sección circular de acero de diámetro 8 mm.

$$A_{Total} = 198.072\ mm^2$$

$$A_{Un\ apoyo} = \frac{A_{Total}}{2} = \frac{198.072\ mm^2}{2} = 99.036\ mm_{graficador} * mm_{graficador}$$

Relación de transformación de fuerza:

$$44.5\ mm_{graficador} \rightarrow 2960\ Kg$$

Relación de transformación de desplazamiento:

$$18\ mm_{graficador} \rightarrow 10\ mm$$

Entonces se tiene:

$$W = 99.036\ mm_{graficador} * mm_{graficador}\left(\frac{2960\ Kg}{44.5\ mm_{graficador}}\right)\left(\frac{10\ mm}{18\ mm_{graficador}}\right)$$

$$W = 3659.757\ Kg * mm = 35.866\ J$$

Nota: La relación de transformación de fuerza es particular para cada uno de los ensayos y se obtiene de la gráfica Esfuerzo vs. Deformación. La relación de transformación del desplazamiento es la misma para todos los ensayos ya que cada 10 mm de desplazamiento real del pistón equivalen a 18 mm de desplazamiento del graficador de la máquina de ensayos universal.

4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS VIGA DE ACERO

El análisis de la deformación de la sección de la viga posterior a la rotura y el cálculo del trabajo no aportan información útil para el presente estudio por lo que se muestran en el Anexo F.

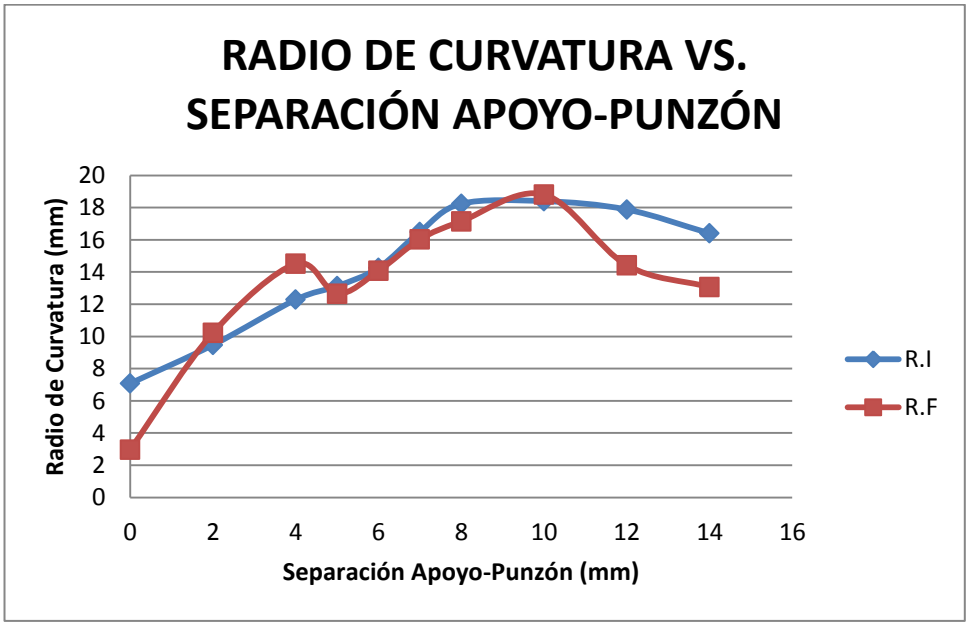
4.2.1 SECCIÓN CIRCULAR DE ACERO DE DIÁMETRO 8 mm

4.2.1.1 RADIOS DE CURVATURA

Tabla 20

Resultados de las pruebas definitivas de la sección circular de acero de diámetro 8 mm – Radio de curvatura luego del ensayo

TABLA DE RESUMEN							
SECCION CIRCULAR DIAMETRO 8 mm							
		CORRIDA EXPERIMENTAL 1		CORRIDA EXPERIMENTAL 2		CORRIDA EXPERIMENTAL 3	
		RADIO DE CURVATURA (mm)		RADIO DE CURVATURA (mm)		RADIO DE CURVATURA (mm)	
Nº	LUZ (mm)	IZQUIERDO	DERECHO	IZQUIERDO	DERECHO	IZQUIERDO	DERECHO
0	0	2,968	7,078	3,926	4,973	2,839	4,433
1	2	10,215	9,468	9,054	10,731	10,204	12,664
2	4	14,511	12,281	15,771	10,235	11,175	13,878
3	5	12,654	13,121	14,712	14,332	12,772	14,709
4	6	14,072	14,256	17,243	17,491	15,644	16,346
5	7	16,029	16,492	15,163	18,055	15,522	17,048
6	8	17,148	18,242	16,922	17,109	15,134	19,247
7	10	18,821	18,404	14,132	18,576	14,913	17,842
8	12	14,426	17,883	14,3	17,788	13,929	18,514
9	14	13,066	16,406	14,481	16,632	14,169	16,186



Gráfica 13: Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón de la sección circular de acero de diámetro 8 mm.

En la Gráfica 13 se aprecian las curvas de Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón de la sección circular de acero de 8 mm de diámetro correspondiente a la corrida experimental 1, las gráficas de las corridas experimentales restantes se muestran en el Anexo F.

Las curvas de rotura inicial son motivo de análisis en todas las corridas experimentales. Las curvas de rotura inicial de las tres corridas experimentales presentan tendencias similares. En las curvas de los radios de curvatura se evidencian las distintas zonas de falla ya que la tendencia cambia a lo largo de la curva y ese cambio es prácticamente el mismo en las tres corridas experimentales. En base al análisis mencionado se afirma que la zona de falla debida a cortante puro se encuentra alrededor de los dos primeros puntos (rango 0 a 2 mm de separación apoyo – punzón), la zona de transición está en el rango 2 a 6 mm de separación apoyo – punzón y la zona de falla debida a flector puro a partir de 6 mm de separación apoyo –

punzón ya que a partir de este valor la curva tiende a estabilizarse y conserva su tendencia. Entonces en la zona de transición de la corrida experimental 1 está entre 2 y 8 mm de separación apoyo – punzón, en la corrida experimental 2 como se explicó anteriormente la transición está entre 2 y 6 mm de separación apoyo – punzón, y en la corrida experimental 3 la transición está entre 4 y 8 mm de separación apoyo – punzón.

En la Figura 69 se señala con una línea negra la tendencia de la curva y sus tres zonas de falla claramente definidas. Las mismas consideraciones se tienen en cuenta para los análisis posteriores.

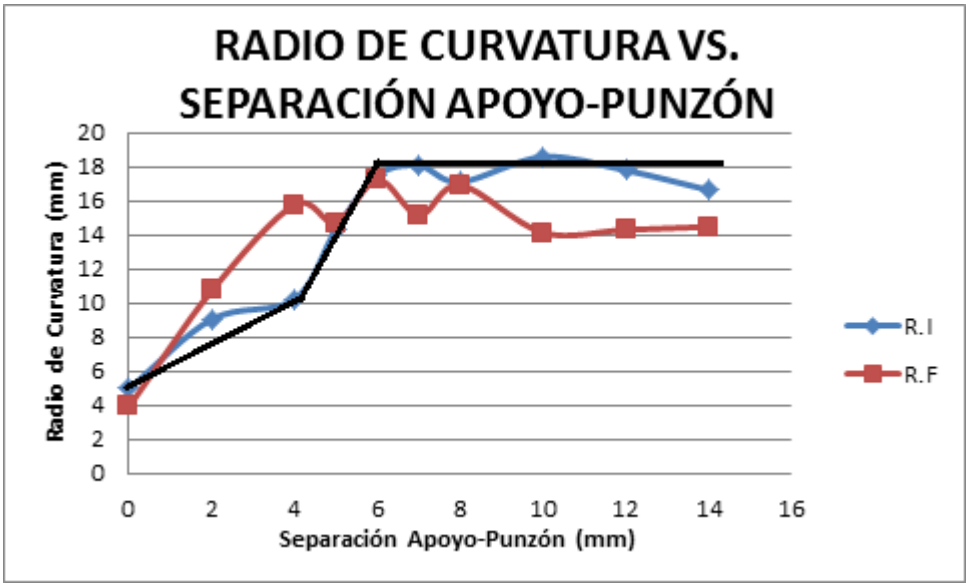


Figura 69: Tendencia considerada para el análisis de las gráficas Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón para el acero.

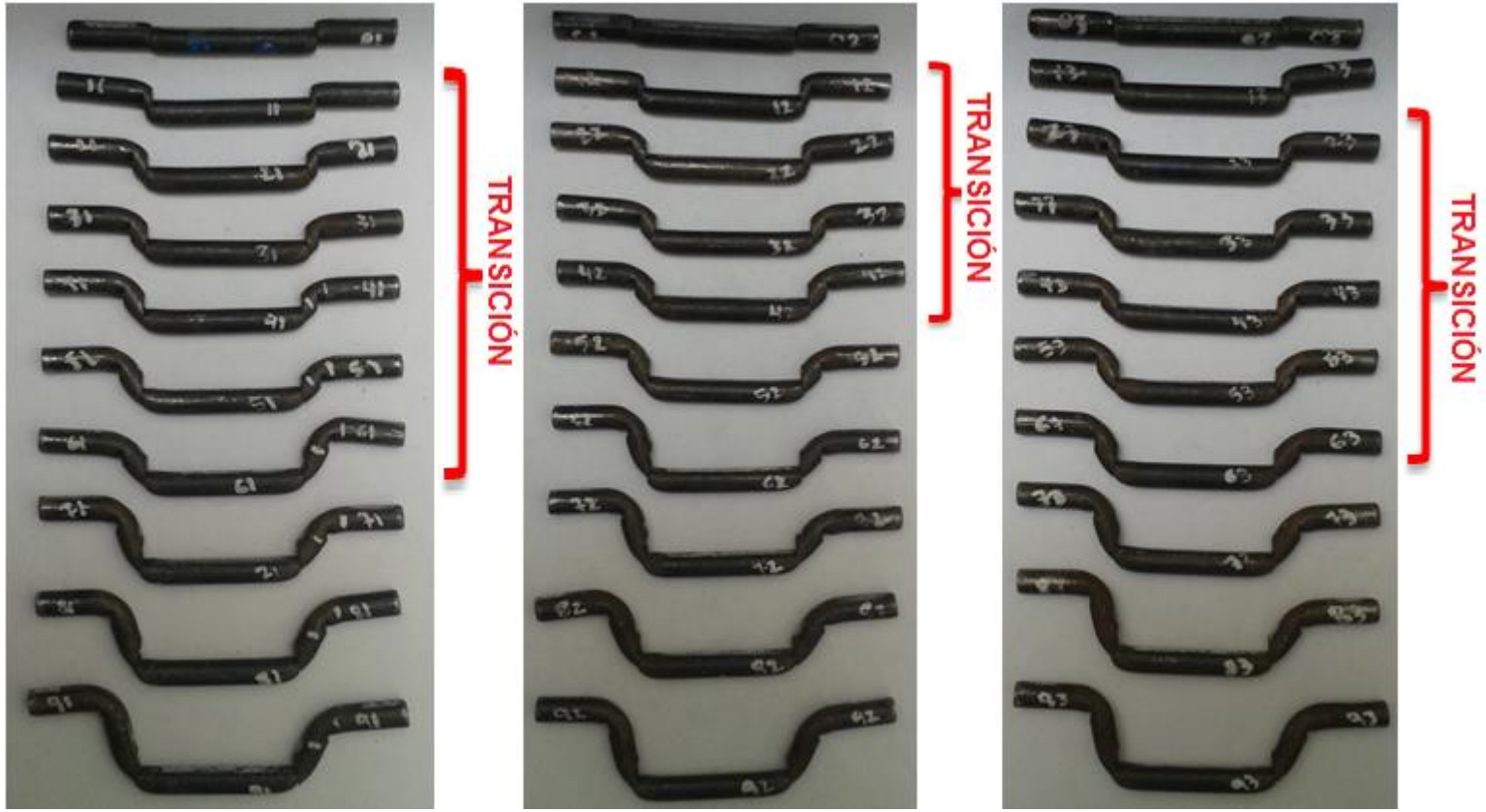
El análisis visual de las probetas luego de la rotura es parte del análisis de los radios de curvatura. En las tres corridas experimentales el primer ensayo se realiza a cortante puro (0 mm de separación apoyo – punzón) en la Figura 70 se evidencia que las probetas correspondientes al primer ensayo presentan mínima deformación respecto al eje radial, lo cual es una

característica propia de la falla debida al esfuerzo cortante. Al analizar la última probeta de cada corrida experimental se aprecia que la deformación de la viga respecto al eje radial es significativa y cuenta además con marcados radios de curvatura, por lo que consideramos que la falla se debe al esfuerzo flector.

Los radios de curvatura al final de la corrida experimental donde la falla se debe al esfuerzo flector son bien definidos no así los primeros, ya que conforme se avanza hacia el primer ensayo cuya falla se debe al esfuerzo cortante, los radios de curvatura se van perdiendo.

Es así que el análisis visual de las probetas corrobora los rangos de transición obtenidos a partir del análisis de los radios de curvatura como se observa en la Figura 70.

La Figura 70 muestra las probetas de las tres corridas experimentales de la sección circular de acero de 8 mm diámetro; los literales a), b) y c) corresponden a la corrida experimental 1, corrida experimental 2 y corrida experimental 3, respectivamente.



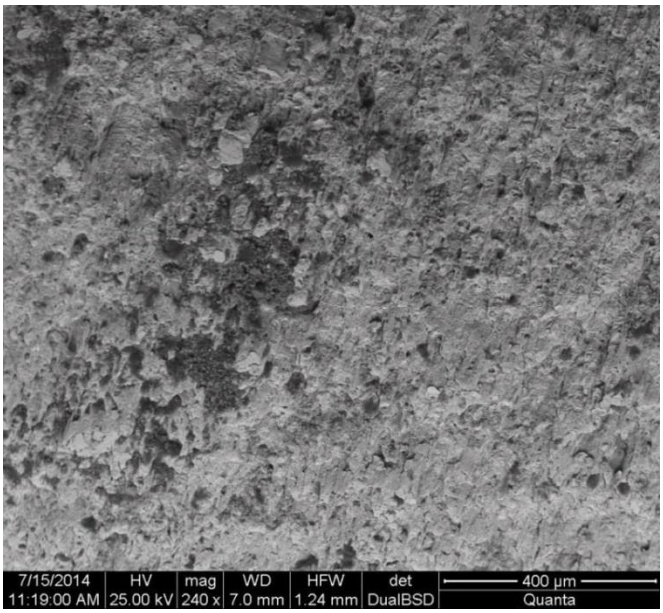
a) b) c)

Figura 70: Probetas de sección circular de acero de diámetro 8 mm luego de la rotura.

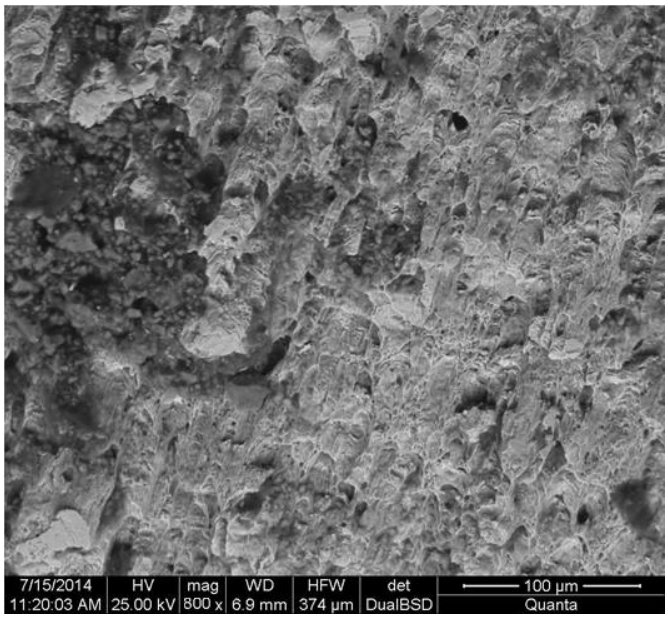
4.2.1.2 FRACTOGRAFÍAS

El análisis fractográfico se realizó en tres probetas pertenecientes a una misma corrida experimental a fin de determinar si las microestructuras varían de acuerdo al tipo de falla.

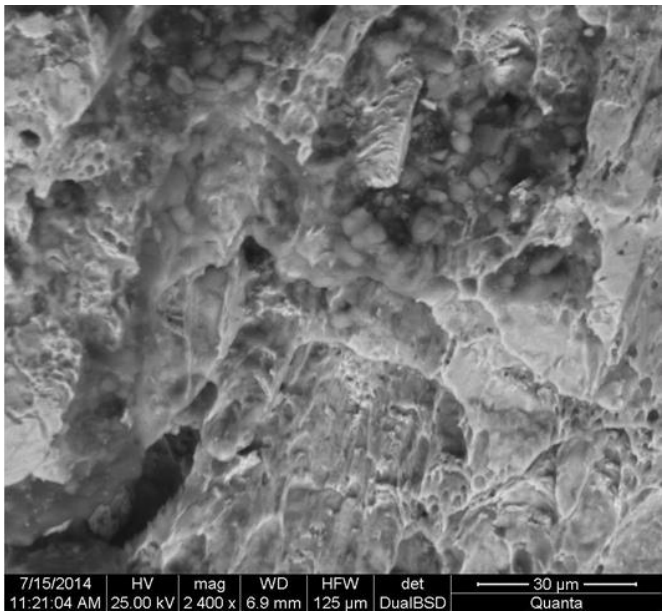
Las probetas analizadas son 0, 4 y 9; la primera falló debido a la influencia del esfuerzo cortante, la segunda debido al esfuerzo cortante – flector y la tercera debido al esfuerzo flector, todas las probetas pertenecen a la corrida experimental 1. En las figuras correspondientes a las fractografías de las probetas, el literal a) tiene 240x de ampliación, el literal b) 800x de ampliación y el literal c) 2400x de ampliación.



a)



b)



c)

Figura 71: Fractografía de la probeta 0 de la corrida experimental 1. (Fuente: Microscopio FEI Quanta 400 Departamento de Criminalística de Pichincha Sección Microscopia Electrónica)

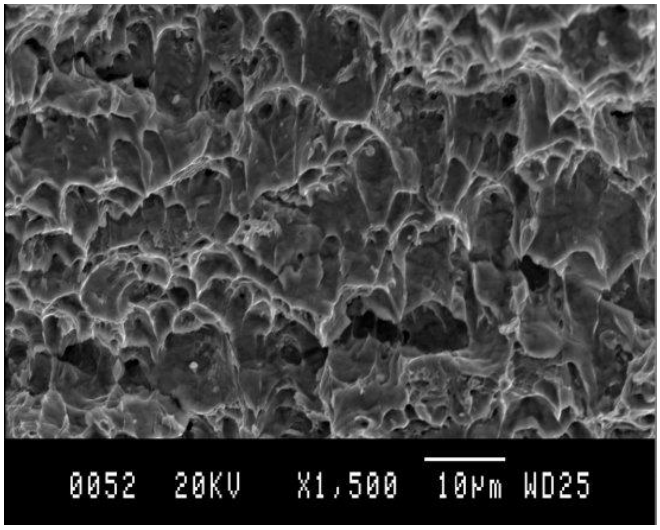
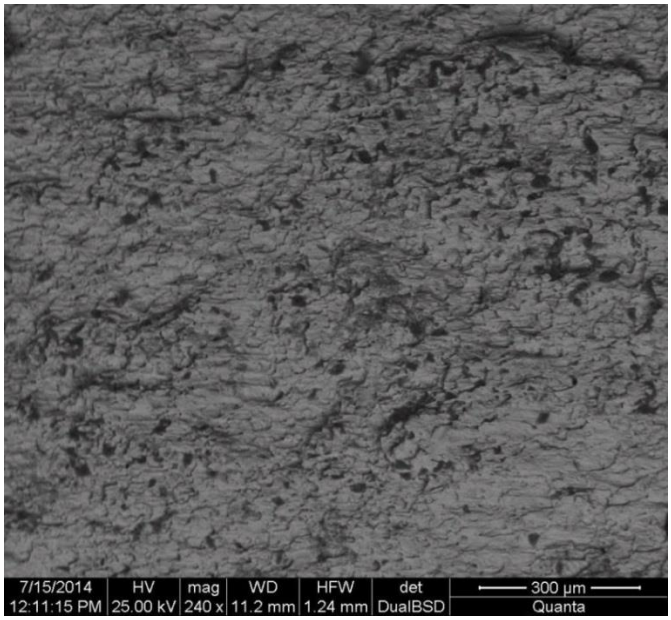
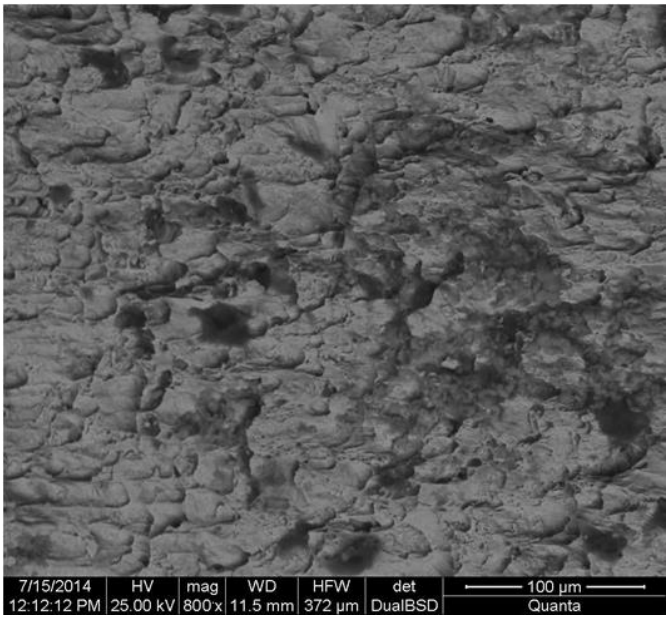


Figura 72: Fractografía de la falla debida a cortante de un acero AISI 1040. (Fuente: Análisis de Falla - Estudio de casos industriales)

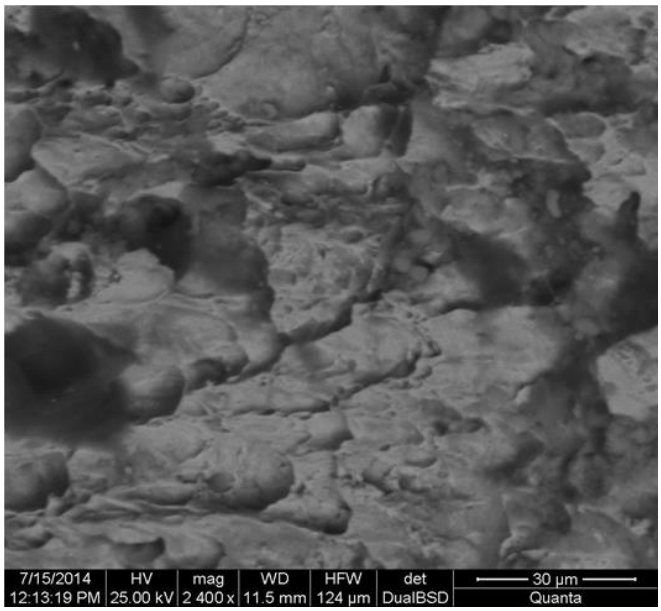
La Figura 71 c) y la Figura 72 presentan la misma estructura en la cual se observan micro hendiduras características de la fractura dúctil cortante del acero. A pesar de que la ampliación de las figuras no es la misma es posible identificar semejanzas entre las dos estructuras, el material de la fractografía de la Figura 71 c) es acero estructural A36 cuyas características son similares a las del acero AISI 1040. Consecuentemente la fractografía mostrada en la Figura 71 corrobora que la falla de la probeta 01 se da debido a la influencia del esfuerzo cortante.


7/15/2014
12:11:15 PM
HV
25.00 kV
mag
240 x
WD
11.2 mm
HFW
1.24 mm
det
DualBSD
300 µm
Quanta

a)


7/15/2014
12:12:12 PM
HV
25.00 kV
mag
800 x
WD
11.5 mm
HFW
372 µm
det
DualBSD
100 µm
Quanta

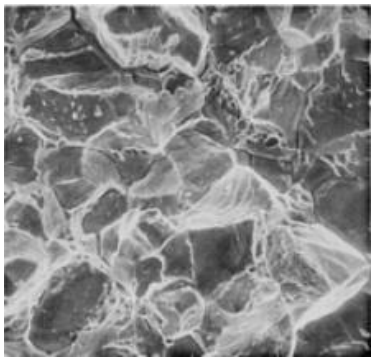
b)



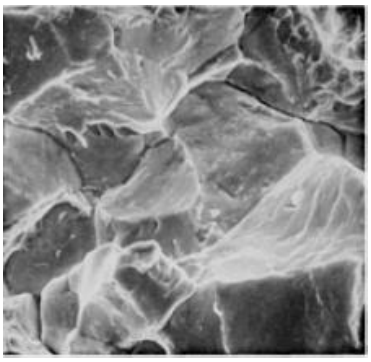
c)

Figura 73: Fractografía de la probeta 9 de la corrida experimental 1. (Fuente: Microscopio FEI Quanta 400 Departamento de Criminalística de Pichincha Sección Microscopia Electrónica)

a)



b)

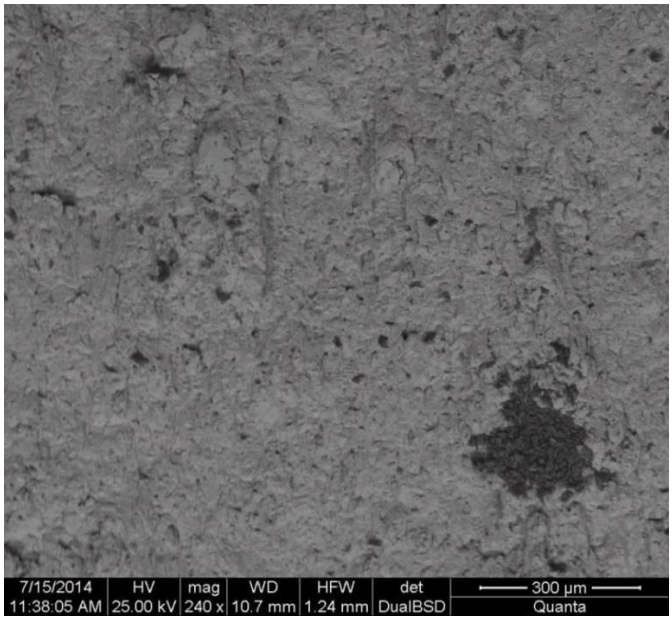


c)

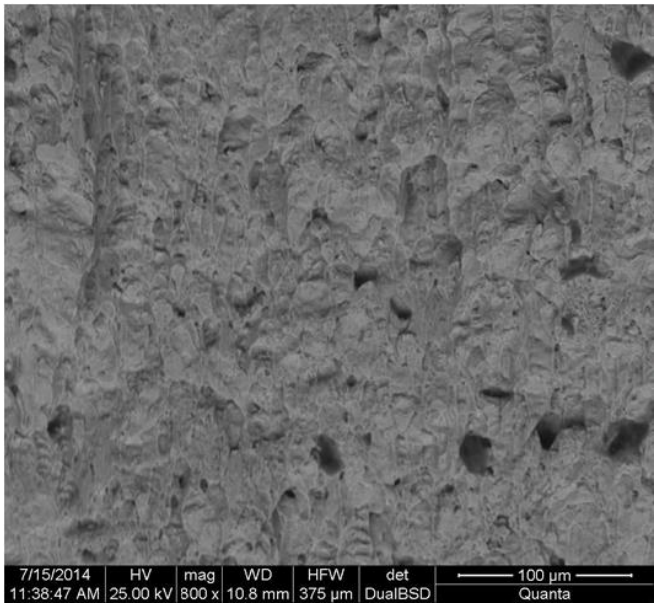
Figura 74: Fractografía de la fractura de un eje de acero SAE 1050 debida a carga de flexión. (Fuente: ASM Handbook - Volúmen 12)

En la Figura 74 el literal a) representa 20x de ampliación, el literal b) 1000x de ampliación y el literal c) 2000x de ampliación.

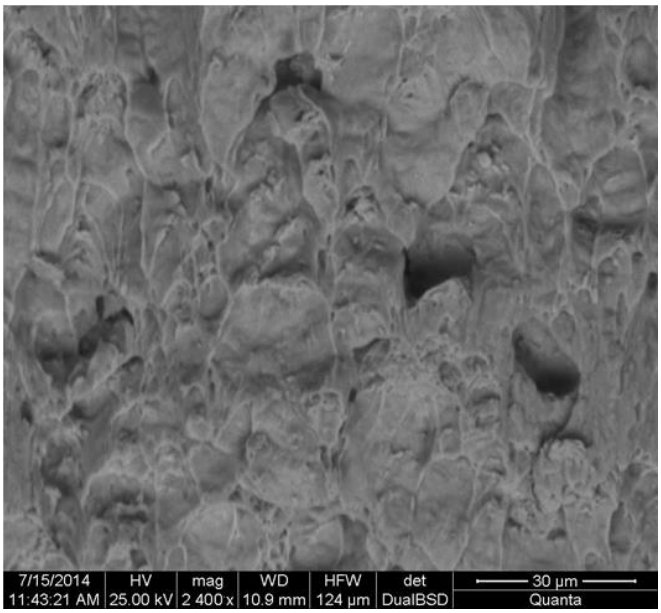
Comparando la Figura 73 c) que muestra la falla de la probeta 91 con la Figura 74 c) tomada del ASM Handbook se identifican estructuras similares por lo que se concluye que la falla de mencionada probeta se debe a la influencia del esfuerzo flector.


7/15/2014
11:38:05 AM
HV
25.00 kV
mag
240 x
WD
10.7 mm
HFW
1.24 mm
det
DualBSD
300 µm
Quanta

a)


7/15/2014
11:38:47 AM
HV
25.00 kV
mag
800 x
WD
10.8 mm
HFW
375 µm
det
DualBSD
100 µm
Quanta

b)



c)

Figura 75: Fractografía de la probeta 4 de la corrida experimental 1. (Fuente: Microscopio FEI Quanta 400 Departamento de Criminalística de Pichincha Sección Microscopia Electrónica)

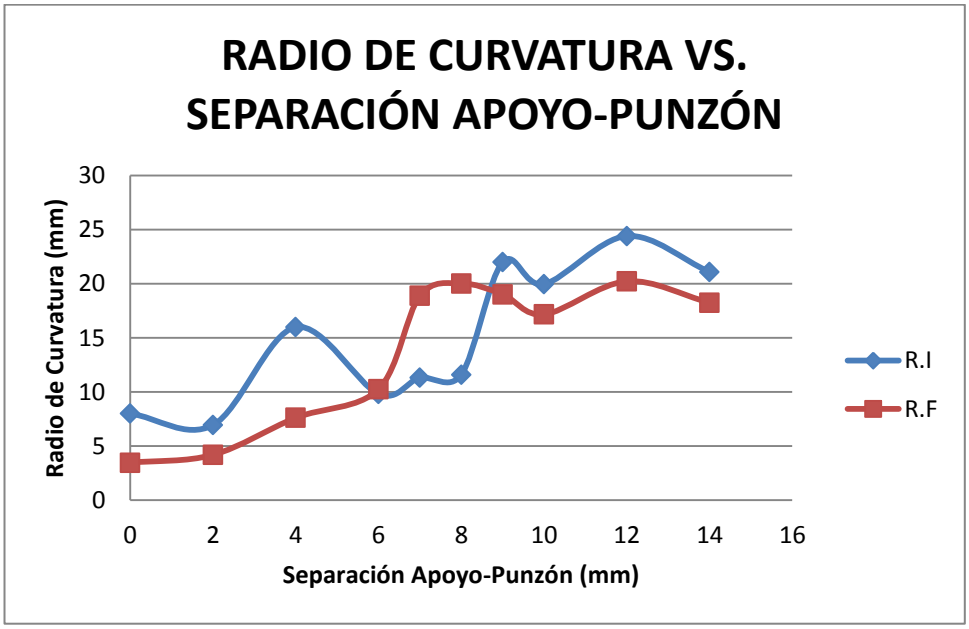
La bibliografía no presenta fractografías correspondientes a la falla debida al esfuerzo cortante – flector, pero al comparar la Figura 75 c) con la Figura 72 correspondiente a la falla debida al esfuerzo cortante y la Figura 74 correspondiente a la falla debida al esfuerzo flector se observa que la Figura 75 c) presenta una mezcla de ambas estructuras observándose claramente la transición entre la falla debida al esfuerzo cortante (estructura fibrosa) y la falla debida al esfuerzo flector (estructura globular).

4.2.2 SECCIÓN CIRCULAR DE ACERO DE DIÁMETRO 10 mm – RADIOS DE CURVATURA

Tabla 21

Resultados de las pruebas definitivas de la sección circular de acero de diámetro 10 mm – Radio de curvatura luego del ensayo

TABLA DE RESUMEN							
SECCION CIRCULAR DIAMETRO 10 mm							
		CORRIDA EXPERIMENTAL 1		CORRIDA EXPERIMENTAL 2		CORRIDA EXPERIMENTAL 3	
		RADIO DE CURVATURA (mm)		RADIO DE CURVATURA (mm)		RADIO DE CURVATURA (mm)	
Nº	LUZ (mm)	IZQUIERDO	DERECHO	IZQUIERDO	DERECHO	IZQUIERDO	DERECHO
0	0	3,463	8,009	7,862	10,954	8,111	10,082
1	2	4,189	6,940	6,467	5,965	15,693	21,623
2	4	7,612	15,994	11,57	10,976	10,266	13,379
3	6	10,247	9,823	9,834	10,833	17,218	14,276
4	7	18,876	11,309	18,466	10,42	19,487	19,369
5	8	20,022	11,59	19,323	21,851	19,995	17,126
6	9	19,02	21,988	21,819	19,205	25,524	12,112
7	10	17,164	19,961	17,779	23,174	15,822	18,966
8	12	20,222	24,403	19,285	22,596	18,404	20,659
9	14	18,249	21,082	18,273	22,98	17,002	21,295



Gráfica 14: Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón de la sección circular de acero de diámetro 10 mm.

En la Gráfica 14 se aprecian las curvas de Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón de la sección circular de acero de 10 mm de diámetro correspondientes a la corrida experimental 1, las gráficas de las corridas experimentales restantes se muestran en el Anexo F.

Las curvas de rotura inicial son motivo de análisis en las gráficas de los radios de curvatura ya que se diferencian las tres zonas de falla y presentan tendencia similar en las tres corridas experimentales. En la corrida experimental 1 la zona de transición se ubica entre 4 y 9 mm de separación apoyo – punzón, en la corrida experimental 2 entre 4 y 8 mm de separación apoyo – punzón y en la corrida experimental 3 el rango de la zona de transición está dado de 4 a 7 mm de separación apoyo – punzón.

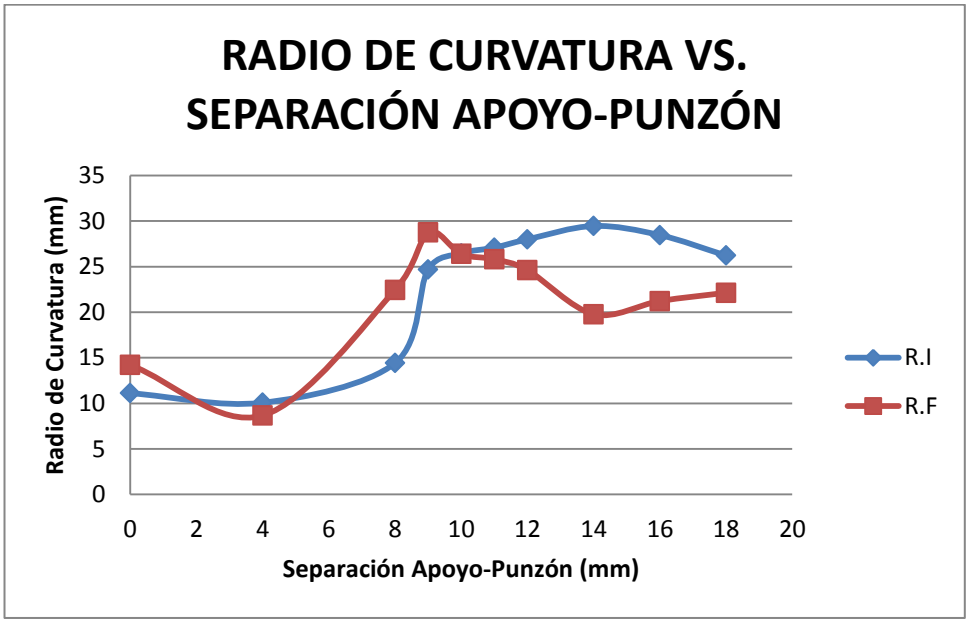
El análisis visual de las probetas luego de la rotura corrobora los rangos de transición obtenidos a partir del análisis de los radios de curvatura (ver Anexo F). En el análisis visual se aprecia que las probetas de diámetro 10 mm presentan una tendencia de falla igual que las probetas de diámetro 8 mm, es decir, que conforme la separación apoyo – punzón aumenta también aumenta la deformación de la probeta respecto a la dirección radial así como los radios de curvatura de la misma.

4.2.3 SECCIÓN CIRCULAR DE ACERO DE DIÁMETRO 12 mm – RADIOS DE CURVATURA

Tabla 22

Resultados de las pruebas definitivas de la sección circular de acero de diámetro 12 mm – Radio de curvatura luego del ensayo

TABLA DE RESUMEN							
SECCION CIRCULAR DIAMETRO 12mm							
		CORRIDA EXPERIMENTAL 1		CORRIDA EXPERIMENTAL 2		CORRIDA EXPERIMENTAL 3	
		RADIO DE CURVATURA (mm)		RADIO DE CURVATURA (mm)		RADIO DE CURVATURA (mm)	
Nº	LUZ (mm)	IZQUIERDO	DERECHO	IZQUIERDO	DERECHO	IZQUIERDO	DERECHO
0	0	14,214	11,114	16,439	18,786	10,012	12,27
1	4	8,663	10,067	17,54	21,143	14,422	17,832
2	8	22,435	14,413	20,924	12,334	22,924	19,086
3	9	28,752	24,67	22,743	23,751	22,456	24,147
4	10	26,389	26,445	25,531	25,536	26,371	23,925
5	11	25,812	27,084	26,191	23,166	26,846	26,573
6	12	24,613	27,987	27,304	25,303	26,767	19,415
7	14	19,781	29,457	20,76	29,276	21,341	29,267
8	16	21,218	28,455	27,612	23,873	20,651	32,814
9	18	22,131	26,213	27,068	20,728	27,129	20,913



Gráfica 15: Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón de la sección circular de acero de diámetro 12 mm.

En la Gráfica 15 se aprecian las curvas de Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón de la sección circular de acero de 12 mm de diámetro correspondientes a la corrida experimental 1.

Las curvas de rotura inicial son motivo de análisis en las gráficas de los radios de curvatura. En la corrida experimental 1 la zona de transición se ubica entre 8 y 11 mm de separación apoyo – punzón, en la corrida experimental 2 la zona de transición se ubica desde 8 hasta 11 mm de separación apoyo – punzón y en la corrida experimental 3 la zona de transición inicia en 8 mm y finaliza en 10 mm de separación apoyo – punzón. A partir de la finalización de la zona de transición la gráfica tiende a estabilizarse conservando su tendencia.

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS VIGA DE ALUMINIO

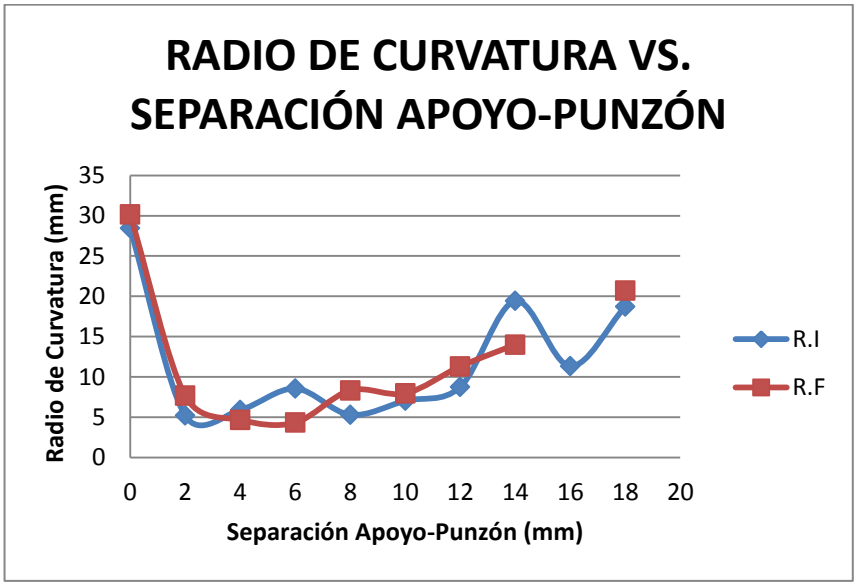
En las vigas de aluminio no se realizó la medición de las secciones posterior a la realización del ensayo, ni el cálculo del trabajo debido a que estos parámetros no proporcionan información útil sobre el rango de transición de la zona de falla debida a cortante – flector, esto último se puede evidenciar en los análisis realizados en las probetas de acero.

4.3.1 SECCIÓN CIRCULAR DE ALUMINIO DE DIÁMETRO 7 mm – RADIOS DE CURVATURA

Tabla 23

Resultados de las pruebas definitivas de la sección circular de aluminio de diámetro 7 mm – Radio de curvatura luego del ensayo

TABLA DE RESUMEN							
SECCION CIRCULAR DIAMETRO 7mm							
		CORRIDA EXPERIMENTAL 1		CORRIDA EXPERIMENTAL 2		CORRIDA EXPERIMENTAL 3	
		RADIO DE CURVATURA (mm)		RADIO DE CURVATURA (mm)		RADIO DE CURVATURA (mm)	
Nº	LUZ (mm)	IZQUIERDO	DERECHO	IZQUIERDO	DERECHO	IZQUIERDO	DERECHO
0	0	30,146	28,466	22,863	11,911	16,979	15,932
1	2	7,655	5,201	10,167	16,555	19,231	6,74
2	4	4,66	5,899	8,552	6,696	14,288	5,902
3	6	4,317	8,541	10,28	7,843	13,809	11,075
4	8	8,321	5,297	13,599	10,718	19,099	19,319
5	10	7,947	7,026	7,962	6,052	7,955	9,229
6	12	11,295	8,75	28,045	18,287	7,976	15,336
7	14	13,997	19,416	7,938	17,175	14,685	15,757
8	16	-	11,332	14,879	15,905	14,103	15,916
9	18	20,722	18,726	17,093	20,894	14,142	18,362



Gráfica 16: Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón de la sección circular de aluminio de diámetro 7 mm.

En la Gráfica 16 se aprecian las curvas de Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón de la sección circular de aluminio de 7 mm de diámetro correspondientes a la corrida experimental 1.

Manteniendo los criterios de análisis utilizados en el capítulo anterior en las probetas de acero, se considera y analiza la curva de la rotura inicial. En mencionadas curvas es evidente el cambio de tendencia y con ello la diferenciación de las zonas de falla, consecuentemente la zona de transición queda definida para la corrida experimental 1 entre 2 y 10 mm de separación apoyo – punzón, para la corrida experimental 2 entre 4 y 10 mm de separación apoyo – punzón y para la corrida experimental 3 entre 4 y 8 mm de separación apoyo – punzón.

En la Figura 76 se señala con una línea negra la tendencia de la curva y sus tres zonas de falla claramente definidas. Las mismas consideraciones se tienen en cuenta para los análisis posteriores.

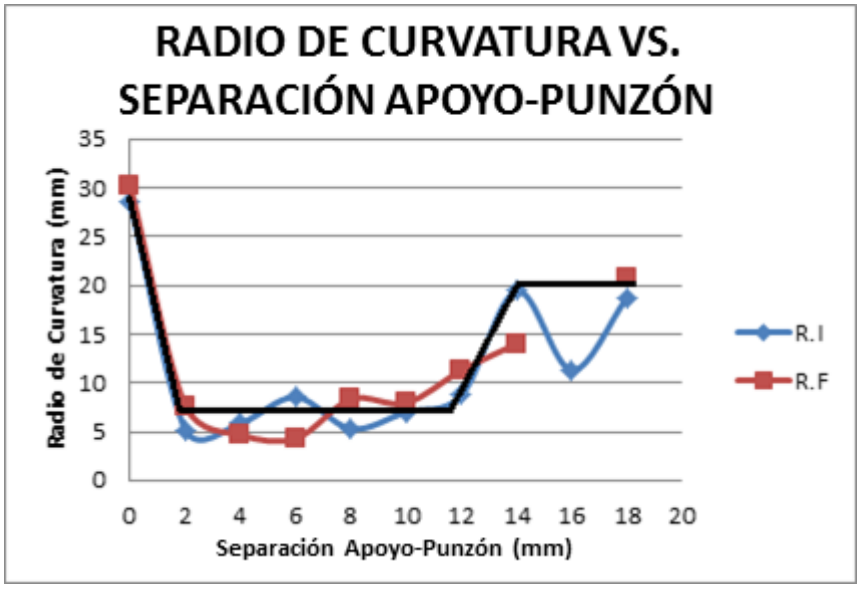


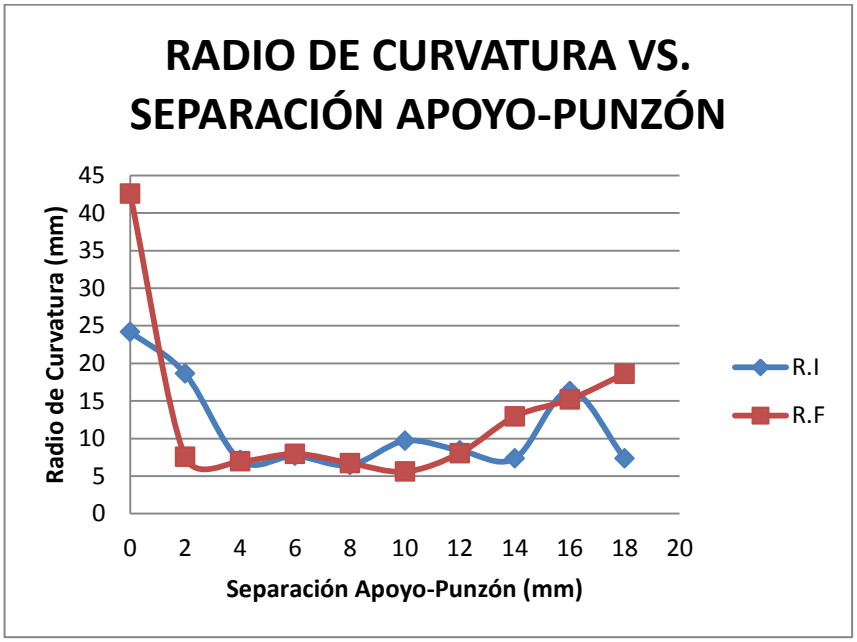
Figura 76: Tendencia considerada para el análisis de las gráficas Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón para el aluminio.

4.3.2 SECCIÓN CIRCULAR DE ALUMINIO DE DIÁMETRO 9,5 mm – RADIOS DE CURVATURA

Tabla 24

Resultados de las pruebas definitivas de la sección circular de aluminio de diámetro 9,5 mm – Radio de curvatura luego del ensayo

TABLA DE RESUMEN							
SECCION CIRCULAR DIAMETRO 9.5 mm							
		CORRIDA EXPERIMENTAL 1		CORRIDA EXPERIMENTAL 2		CORRIDA EXPERIMENTAL 3	
		RADIO DE CURVATURA (mm)		RADIO DE CURVATURA (mm)		RADIO DE CURVATURA (mm)	
Nº	LUZ (mm)	IZQUIERDO	DERECHO	IZQUIERDO	DERECHO	IZQUIERDO	DERECHO
0	0	42,579	24,196	34,035	26,512	6,782	18,038
1	2	7,594	18,63	11,776	12,111	20,724	10,531
2	4	6,977	7,143	6,936	6,643	6,65	7,059
3	6	7,957	7,684	6,503	7,158	15,114	11,39
4	8	6,742	6,453	6,169	6,887	7,005	6,323
5	10	5,599	9,689	12,885	5,935	9,25	15,903
6	12	8,425	8,056	8,487	11,485	13,391	20,667
7	14	7,348	12,932	17,899	7,825	16,236	18,653
8	16	15,204	16,325	24,693	10,703	25,4	21,017
9	18	7,359	18,61	17,488	9,68	20,024	18,824



Gráfica 17: Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón de la sección circular de aluminio de diámetro 9,5 mm.

En la Gráfica 17 se aprecian las curvas de Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón de la sección circular de aluminio de 9,5 mm de diámetro correspondientes a la corrida experimental 1.

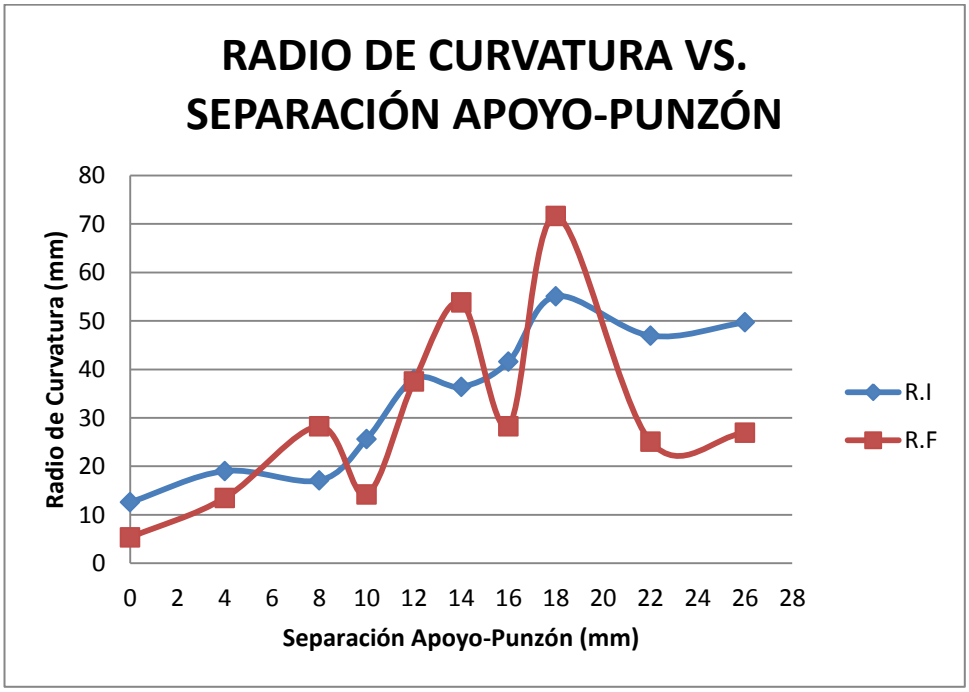
Al igual que en las gráficas anteriores el análisis se centra en la curva de la rotura inicial y se define la zona de transición en función del cambio de tendencia de mencionada curva. Se puede constatar que la tendencia que siguen las gráficas de las corridas experimentales 1 y 2 es muy similar y que la tendencia en la corrida experimental 3 difiere un poco de las dos primeras. La zona de transición se ubica para la corrida experimental 1 en el rango 4 a 10 mm de separación apoyo – punzón, para la corrida experimental 2 en el rango 4 a 10 mm de separación apoyo – punzón y para la corrida experimental 3 de 4 a 8 mm de separación apoyo – punzón.

4.3.3 SECCIÓN CIRCULAR DE ALUMINIO DE DIÁMETRO 12,7 mm – RADIOS DE CURVATURA

Tabla 25

Resultados de las pruebas definitivas de la sección circular de aluminio de diámetro 12,7 mm – Radio de curvatura luego del ensayo

TABLA DE RESUMEN							
SECCION CIRCULAR DIAMETRO 12,7 mm							
		CORRIDA EXPERIMENTAL 1		CORRIDA EXPERIMENTAL 2		CORRIDA EXPERIMENTAL 3	
		RADIO DE CURVATURA (mm)		RADIO DE CURVATURA (mm)		RADIO DE CURVATURA (mm)	
Nº	LUZ (mm)	IZQUIERDO	DERECHO	IZQUIERDO	DERECHO	IZQUIERDO	DERECHO
0	0	5,344	12,590	6,519	8,952	5,597	4,824
1	4	13,48	19,026	20,634	13,261	14,734	17,78
2	8	17,102	28,262	22,145	26,453	25,509	30,44
3	10	14,189	25,611	48,484	23,039	20,262	19,648
4	12	37,492	37,987	33,639	31,049	88,633	43,185
5	14	53,775	36,401	58,226	39,363	38,37	36,714
6	16	41,572	28,27	38,58	45,225	38,596	43,68
7	18	71,634	55,079	56,649	44,881	39,227	35,635
8	22	25,114	46,954	18,847	49,107	40,94	38,449
9	26	26,912	49,684	47,205	28,923	25,625	37,356



Gráfica 18: Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón de la sección circular de aluminio de diámetro 12,7 mm.

En la Gráfica 18 se aprecian las curvas de Radio de Curvatura vs. Separación Apoyo-Punzón de la sección circular de aluminio de 12,7 mm de diámetro correspondientes a la corrida experimental 1.

Las tendencias de las curvas de rotura inicial de las probetas de 12,7 mm de diámetro no siguen una tendencia determinada, para cada corrida la tendencia es distinta y en ninguna de las curvas se logra diferenciar claramente las zonas de falla por lo que no se puede definir un rango para la zona de transición.

4.4 ANÁLISIS DE LAS GRÁFICAS ESFUERZO – DEFORMACIÓN

Las gráficas Esfuerzo vs. Deformación de cada ensayo se obtienen de la Máquina de Ensayos Universal al momento de realizar el ensayo destructivo de la probeta, a continuación se analizan las gráficas para cada sección de prueba.

4.4.1 GRÁFICAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN SECCIÓN CIRCULAR DE ACERO DE DIÁMETRO 8 mm

Las gráficas Esfuerzo vs. Deformación de las tres corridas experimentales de la sección circular de diámetro 8 mm se pueden observar en el Anexo D, mencionadas gráficas son muy similares en las tres corridas experimentales.

Para el siguiente análisis se consideran las gráficas de la corrida experimental 1. La primera curva presenta mínima deformación y es la que posee máxima fuerza en relación a las demás, esta curva pertenece a la falla debida a cortante puro, a partir de la segunda curva se observa que la deformación va incrementando al mismo tiempo que la fuerza va disminuyendo. Desde la segunda curva se considera que la falla se debe a una mezcla entre cortante y flector. Ahora bien desde la sexta curva se observa una especie de linealización antes de llegar a la cresta de la curva, dicha linealización de la curva es más evidente a partir de la séptima curva y en el resto de ellas.

Entonces en función de esta linealización se define que el rango de transición finaliza en la séptima curva y a partir de allí se tiene falla debida a flector puro. En función de la luz existente entre el apoyo y el punzón se define que el rango de transición finaliza a 8 mm de separación apoyo – punzón. Al realizar el mismo análisis en las dos corridas experimentales restantes se obtiene el mismo resultado.

4.4.2 GRÁFICAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN SECCIÓN CIRCULAR DE ACERO DE DIÁMETRO 10 mm

En el Anexo D se encuentran las gráficas Esfuerzo vs. Deformación de las probetas de acero de 10 mm de diámetro.

El análisis de estas gráficas se desarrolla de la misma manera que el anterior, para el presente análisis se considerarán las gráficas de la corrida experimental 2. La primera curva y la segunda curva presentan mínima deformación y corresponden a la falla debida a cortante puro, a partir de la tercera curva las probetas fallan debido a una mezcla de esfuerzos (cortante – flector), la linealidad en la cual se basa el análisis aparece en la séptima curva y es claramente visible a partir de la octava curva, la misma que corresponde a 10 mm de separación apoyo – punzón. El análisis se realiza en las corridas restantes obteniendo el mismo resultado.

4.4.3 GRÁFICAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN SECCIÓN CIRCULAR DE ACERO DE DIÁMETRO 12 mm

Las gráficas Esfuerzo vs. Deformación de las probetas de acero de 12 mm de diámetro se muestran en el Anexo D.

Para el presente análisis se considera la corrida experimental 3. Como en los casos anteriores se identifica los tipos de falla y su gráfica en función de sus características. La primera curva corresponde a la falla debida a cortante puro debido a que su deformación es mínima y la fuerza requerida para la falla es la mayor respecto al resto de curvas, la curva es prácticamente vertical. La segunda curva muestra una ligera inclinación antes de su punto máximo y su deformación aumenta, a partir de esta curva se considera que la falla se debe a cortante – flector. Desde la sexta curva se empieza a vislumbrar la linealización de la curva previa al pico máximo de la misma y desde la séptima curva la linealidad es claramente identificable. Esta curva corresponde a 12 mm de separación apoyo – punzón.

4.4.4 GRÁFICAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN SECCIÓN CIRCULAR DE ALUMINIO DE DIÁMETRO 7 mm

Para el análisis de las gráficas Esfuerzo vs. Deformación del aluminio se busca la linealidad de la curva antes de su pico máximo al igual que en el análisis de las gráficas Esfuerzo vs. Deformación del acero. El presente análisis se lleva a cabo en la corrida experimental 3. La primera curva presenta una mínima deformación junto con la máxima fuerza, lo cual es característico de la falla debida a cortante puro, en las siguientes curvas la deformación aumenta mientras que la fuerza disminuye.

La linealidad empieza a aparecer a partir de la cuarta curva pero es notoria desde la sexta curva, a partir de esta última se considera que la falla se debe a flector puro. Mencionada curva corresponde a 10 mm de separación apoyo – punzón.

El análisis se realiza con las gráficas de las corridas experimentales restantes y se obtienen resultados similares, cabe mencionar que se presta especial atención a la corrida experimental 3 debido a que todas las gráficas se realizaron en la Máquina de Ensayos Universal MTS 810-14-2, no así las corridas experimentales 1 y 2 cuyas gráficas se realizaron tanto en la MTS 810-14-2 como en la AMSLER. Las gráficas Esfuerzo vs. Deformación de estas probetas se encuentran en el Anexo D.

4.4.5 GRÁFICAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN SECCIÓN CIRCULAR DE ALUMINIO DE DIÁMETRO 9,5 mm

El análisis de las gráficas Esfuerzo vs. Deformación de las probetas de aluminio de diámetro 9,5 mm se realiza en la corrida experimental 1, del cual se concluye que la primera curva corresponde a una falla debida a cortante puro ya que presenta mínima deformación, máxima fuerza y sus ramas son prácticamente verticales hasta llegar al pico de la curva. A partir de la segunda curva la concavidad del pico máximo es mucho más evidente en

comparación con la primera curva, es decir, se visualiza el incremento de la deformación. Finalmente la linealidad en la curva previa a su pico aparece en la séptima curva que corresponde a 12 mm de separación apoyo – punzón, a partir de la cual se considera que la falla se debe a flector puro. Al analizar las corridas experimentales restantes se obtiene el mismo resultado. Las gráficas mencionadas en el presente análisis se muestran en el Anexo D.

4.4.6 GRÁFICAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN SECCIÓN CIRCULAR DE ALUMINIO DE DIÁMETRO 12,7 mm

Las gráficas Esfuerzo vs. Deformación de las probetas de aluminio de 12,7 mm de diámetro se muestran en el Anexo D.

La corrida experimental 2 se considera para el presente análisis y el mismo se realiza posteriormente para las corridas restantes. La primera curva presenta las características propias de una falla debida a cortante puro (mínima deformación y máxima fuerza), a partir de la segunda curva se visualiza el incremento gradual de la deformación. La linealidad en la curva antes de su pico es evidente a partir de la novena curva que corresponde a 22 mm de separación apoyo – punzón.

4.5 RELACIÓN DE TIMOSHENKO

En capítulos anteriores se menciona la relación de S. Timoshenko entre la longitud de la viga y la altura de la misma para delimitar la falla debida a cortante y la falla debida a flector. Si la relación L/h es mayor o igual a 10 la falla de la viga se debe a la influencia del esfuerzo flector.

Esta relación se aplica al presente proyecto con una variación en L, para este caso particular L es la luz o separación entre el apoyo y el punzón mas

no la longitud entre apoyos. Si la relación es igual o mayor a 1 la viga falla debido a flector puro, siempre y cuando el punzón tenga 50 mm de espesor. Obteniéndose los resultados mostrados a continuación.

4.5.1 RELACIÓN DE TIMOSHENKO VIGAS DE ACERO

Tabla 26

Relación de Timoshenko para vigas de acero de diámetro 8 mm

SECCION CIRCULAR DIAMETRO 8 mm			
Nº	**LUZ L (mm)**	**DIÁMETRO h (mm)**	**RELACIÓN TIMOSHENKO**
0	0	8	0,00
1	2	8	0,25
2	4	8	0,50
3	5	8	0,63
4	6	8	0,75
5	7	8	0,88
6	8	8	1,00
7	10	8	1,25
8	12	8	1,50
9	14	8	1,75

Tabla 27

Relación de Timoshenko para vigas de acero de diámetro 10 mm

SECCION CIRCULAR DIAMETRO 10 mm			
Nº	**LUZ L (mm)**	**DIÁMETRO h (mm)**	**RELACIÓN TIMOSHENKO**
0	0	10	0,00
1	2	10	0,20
2	4	10	0,40

Continúa →

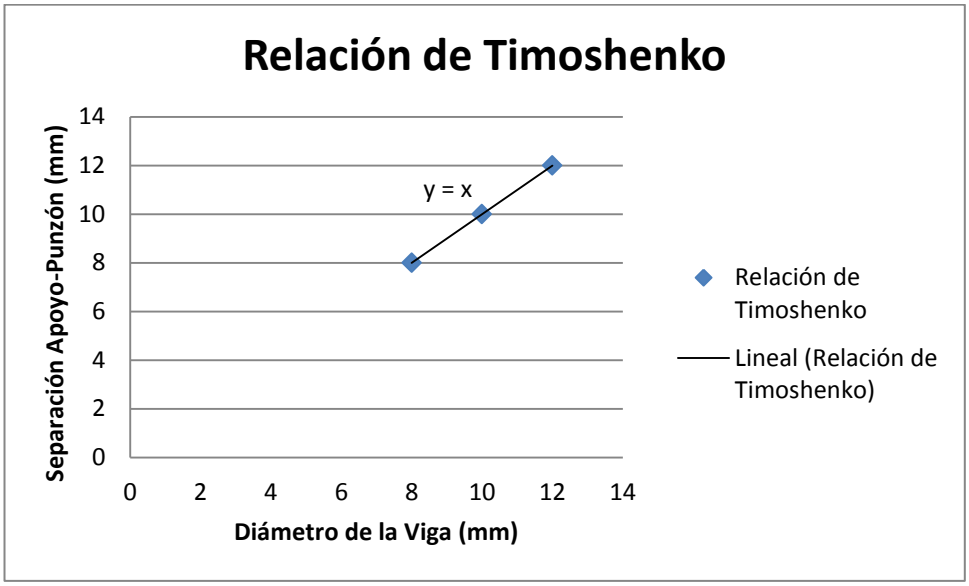
3	6	10	0,60
4	7	10	0,70
5	8	10	0,80
6	9	10	0,90
7	10	10	1,00
8	12	10	1,20
9	14	10	1,40

Tabla 28

Relación de Timoshenko para vigas de acero de diámetro 12 mm

SECCION CIRCULAR DIAMETRO 12 mm			
Nº	**LUZ L (mm)**	**DIÁMETRO h (mm)**	**RELACIÓN TIMOSHENKO**
0	0	12	0,00
1	4	12	0,33
2	8	12	0,67
3	9	12	0,75
4	10	12	0,83
5	11	12	0,92
6	12	12	1,00
7	14	12	1,17
8	16	12	1,33
9	18	12	1,50

Según los resultados obtenidos al aplicar la relación de Timoshenko en las vigas de acero de los diámetros motivo de estudio, la viga falla debido a la influencia del esfuerzo flector desde que la separación apoyo-punzón es igual a su diámetro, esto último se puede constatar también en las gráficas Esfuerzo vs. Deformación analizadas anteriormente ya que la linealidad en las curvas se identifica desde que la relación de Timoshenko es igual a uno. Siempre que se trabaje con un punzón de 50 mm de espesor.



Gráfica 19: Separación Apoyo – Punzón vs. Diámetro de la viga – Probetas de acero diámetros 8, 10 y 12 mm.

La Gráfica 19 indica que la relación entre el diámetro de la viga y la separación apoyo – punzón es directamente proporcional y se describe mediante una recta de pendiente igual a la unidad.

La relación planteada por S. Timoshenko considera una viga simplemente apoyada sometida a una carga transversal, y la longitud que se considera para el cálculo de la relación es la distancia existente entre apoyos.

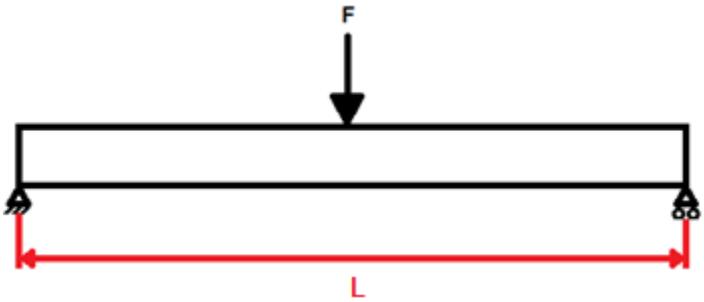


Figura 77: Esquema de la viga de Timoshenko.

Al aplicar la relación de Timoshenko al presente proyecto la longitud que se utilizada para el cálculo de la relación es la distancia entre un apoyo y el punzón de carga. Es necesario verificar que esta relación entrega resultados semejantes a los resultados que se obtienen a partir de la relación de Timoshenko, por lo tanto se calcula la relación de Timoshenko para los casos particulares del proyecto como se muestra a continuación.

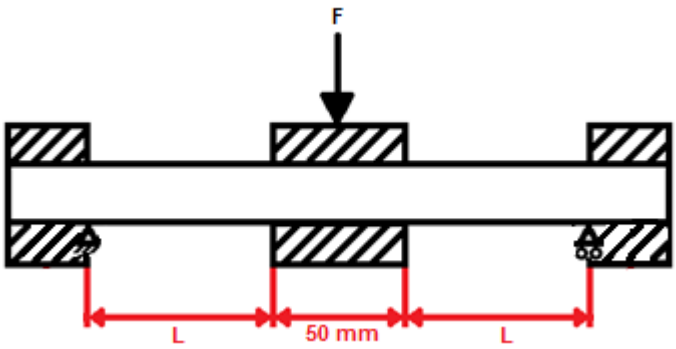


Figura 78: Viga del estudio de la influencia del esfuerzo cortante.

En la figura anterior se considera que los simples apoyos se encuentran en el extremo de los apoyos utilizados en el ensayo, la longitud L es la longitud a partir de la cual la viga falla debido al esfuerzo flector que depende del diámetro de la viga y se indica en las Tablas 26, 27 y 28. El ejemplo de cálculo se realiza para una viga de 8 mm de diámetro con un L de 8 mm.

Ejemplo de cálculo

$\emptyset = h = 8\,mm$

$L = 8\,mm$

$L_T = 2(8) + 50 = 66\,mm$

$$R_{Timoshenko} = \frac{L}{h} = \frac{66\ mm}{8\ mm} = 8{,}25 \leq 10$$

Tabla 29

Resultados del cálculo de la relación de Timoshenko en vigas de acero

DIÁMETRO DE LA VIGA (mm)	L_T (mm)	RELACIÓN DE TIMOSHENKO	CAUSA DE LA FALLA
8	66	8,25	Esfuerzo cortante
10	70	7	Esfuerzo cortante
12	74	6,17	Esfuerzo cortante

En los resultados obtenidos al usar la longitud total de la viga para el cálculo de la relación de Timoshenko se observa que las vigas fallan debido al esfuerzo cortante usando para el cálculo su longitud entre apoyos (L_T), entonces la relación promedio para las vigas de acero es 7 lo que representa un error del 30% respecto a la relación de Timoshenko, cuyo valor debe ser 10 o más para que la viga falle debido a la influencia del esfuerzo flector.

Esta diferencia en los resultados se debe a que el ensamble de la viga de Timoshenko es distinto al ensamble de la viga de este estudio.

4.5.2 RELACIÓN DE TIMOSHENKO VIGAS DE ALUMINIO

Tabla 30

Relación de Timoshenko para vigas de aluminio de diámetro 7 mm

SECCION CIRCULAR DIAMETRO 7mm			
Nº	**LUZ L (mm)**	**DIÁMETRO h (mm)**	**RELACIÓN TIMOSHENKO**
0	0	7	0,00
1	2	7	0,29
2	4	7	0,57
3	6	7	0,86
4	8	7	1,14
5	10	7	1,43
6	12	7	1,71
7	14	7	2,00
8	16	7	2,29
9	18	7	2,57

Tabla 31

Relación de Timoshenko para vigas de aluminio de diámetro 9,5 mm

SECCION CIRCULAR DIAMETRO 9,5mm			
Nº	**LUZ L (mm)**	**DIÁMETRO h (mm)**	**RELACIÓN TIMOSHENKO**
0	0	9,5	0,00
1	2	9,5	0,21
2	4	9,5	0,42
3	6	9,5	0,63
4	8	9,5	0,84
5	10	9,5	1,05
6	12	9,5	1,26

Continúa →

7	14	9,5	1,47
8	16	9,5	1,68
9	18	9,5	1,89

Tabla 32

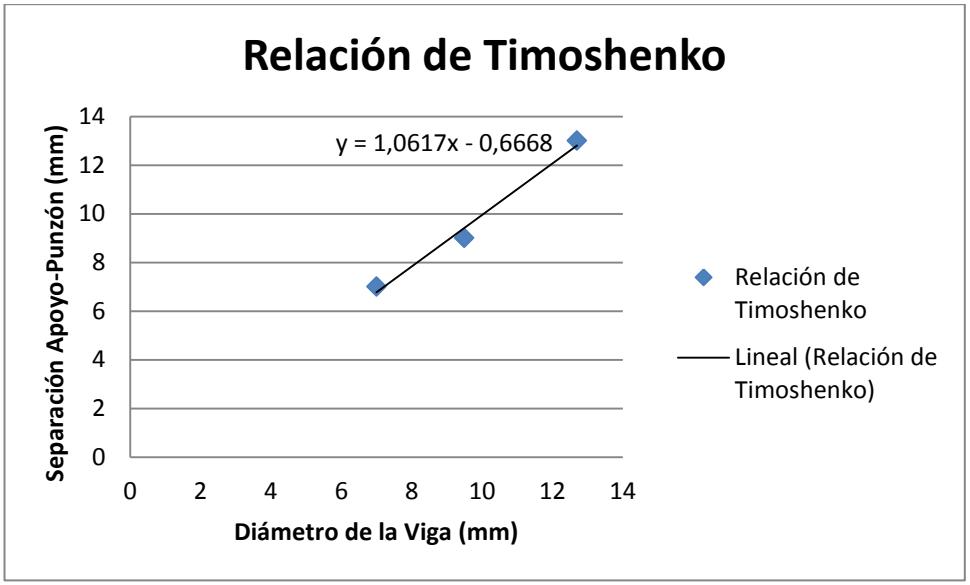
Relación de Timoshenko para vigas de aluminio de diámetro 12,7 mm

SECCION CIRCULAR DIAMETRO 12,7mm			
Nº	**LUZ l (mm)**	**DIÁMETRO h (mm)**	**RELACIÓN TIMOSHENKO**
0	0	12,7	0,00
1	4	12,7	0,31
2	8	12,7	0,63
3	10	12,7	0,79
4	12	12,7	0,94
5	14	12,7	1,10
6	16	12,7	1,26
7	18	12,7	1,42
8	22	12,7	1,73
9	26	12,7	2,05

Al igual que en las vigas de acero, las vigas de aluminio empiezan a fallar debido al esfuerzo flector desde que la separación apoyo – punzón es igual a su diámetro, en las vigas de aluminio no se observa que la relación sea igual a la unidad ya que los diámetros de prueba no son números enteros ni pares, aun así estos resultados son aceptables.

Entonces se tiene que las vigas de 7 mm de diámetro fallan debido al esfuerzo flector entre 6 y 8 mm de separación apoyo – punzón, las vigas de 9,5 mm de diámetro entre 8 y 10 mm de separación apoyo – punzón, y las vigas de 12,7 mm de diámetro entre 12 y 14 mm de separación apoyo – punzón.

Al comparar los resultados obtenidos a partir de la relación de Timoshenko con los resultados que arroja el análisis de las gráficas Esfuerzo vs. Deformación no se obtienen resultados idénticos pero al traslapar ambos resultados se tiene que la transición se delimita no por un valor puntual como en el caso del acero pero si con un rango, entonces para las probetas de diámetro 7 mm la transición está entre 6 y 10 mm de separación apoyo – punzón, para las probetas de diámetro 9,5 mm entre 8 y 12 mm de separación apoyo – punzón y para las probetas de 12,7 mm entre 12 y 22 mm de separación apoyo – punzón.



Gráfica 20: Separación Apoyo-Punzón vs. Diámetro de la viga – Probetas de aluminio diámetros 7, 9,5 y 12,7 mm.

La Gráfica 20 indica que la relación entre el diámetro de la viga y la separación apoyo – punzón para vigas de aluminio es directamente proporcional al igual que para las vigas de acero. Mencionada relación se describe mediante una recta cuya ecuación está dada en la gráfica.

Es necesario verificar que esta relación entrega resultados semejantes a los resultados que se obtienen a partir de la relación de Timoshenko, por lo tanto se calcula la relación de Timoshenko para los casos particulares de las vigas de aluminio obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 33. Como la separación apoyo – punzón para estas vigas no es igual al diámetro se utiliza para el cálculo el promedio del rango de transición obtenido a partir de los resultados mostrados en las Tablas 30, 31 y 32.

Ejemplo de cálculo

$$\emptyset = h = 7\ mm$$

$$L = \frac{6+8}{2} = 7\ mm$$

$$L_T = 2(7) + 50 = 64\ mm$$

$$R_{Timoshenko} = \frac{L}{h} = \frac{64\ mm}{7\ mm} = 9{,}14 \leq 10$$

Tabla 33

Resultados del cálculo de la relación de Timoshenko en vigas de aluminio

DIÁMETRO DE LA VIGA (mm)	LT (mm)	RELACIÓN DE TIMOSHENKO	CAUSA DE LA FALLA
7	64	9,14	Esfuerzo cortante
9,5	68	7,16	Esfuerzo cortante
12,7	76	5,98	Esfuerzo cortante

En los resultados obtenidos al usar la longitud total de la viga de aluminio para el cálculo de la relación de Timoshenko se observa que las vigas fallan debido al esfuerzo cortante usando para el cálculo su longitud entre apoyos (L_T), entonces la relación promedio para las vigas de aluminio es 7 lo que

representa un error del 30% respecto a la relación de Timoshenko, cuyo valor debe ser 10 o más para que la viga falle debido a la influencia del esfuerzo flector. Cabe mencionar que las vigas de aluminio presentan igual error que las vigas de acero, el cual como se explicó anteriormente se debe a que el ensamble de la viga de Timoshenko es distinto al ensamble de la viga de este estudio.

4.6 ANÁLISIS DE LA VARIANZA

El análisis de varianza requiere los datos experimentales, los mismos que se muestran en la siguiente tabla. Los datos empleados en el análisis de varianza se obtienen a partir del análisis de las gráficas de los radios de curvatura excepto para las probetas de aluminio de diámetro 12,7 mm ya que dichas gráficas no arrojan ningún valor, es así que para estas últimas se emplean los datos obtenidos a partir de las gráficas esfuerzo-deformación.

Tabla 34

Datos experimentales del diseño factorial 3x2

		B: Material				
		Acero		**Aluminio**		**Total $Y_{i..}$**
A: Diámetro	**Pequeño (8 y 7 mm)**	8	22	10	28	50
		6		10		
		8		8		
	Mediano (10 y 9,5 mm)	9	24	10	28	52
		8		10		
		7		8		
	Grande (12 y 12,7 mm)	11	32	22	66	98
		11		22		
		10		22		
	Total $Y_{.j.}$	78		122		$Y_{...}$=200

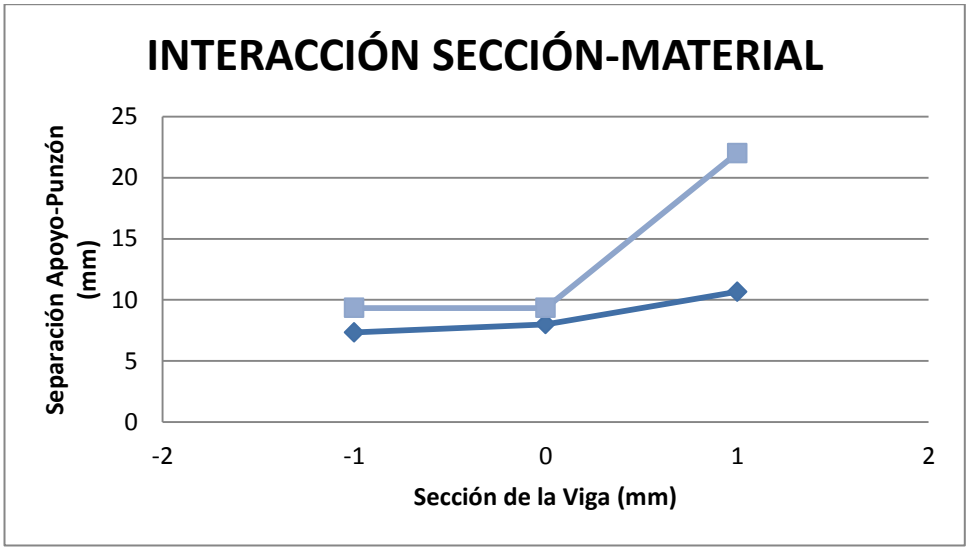
Aplicando las fórmulas mencionadas en el capítulo 2.7.7.1 se hacen los cálculos respectivos para llenar la tabla ANOVA (Ver Anexo G).

Tabla 35

ANOVA del experimento

ANOVA						
FV	**SC**	**GL**	**CM**	**Fo**	**F**	**Ho**
Efecto A	245,778	2	122,889	138,25	3,89	Rechaza
Efecto B	107,556	1	107,556	121	4,75	Rechaza
Efecto AB	93,778	2	46,889	52,75	3,89	Rechaza
Error	10,667	12	0,889			
Total	457,778	17				

Como las hipótesis nulas del efecto A, efecto B y efecto AB se rechazan, entonces se afirma que tanto la sección como el material de la viga influyen en la variable de respuesta (longitud a la cual la viga deja de fallar debido al esfuerzo cortante y empieza a fallar debido al efecto flector).



Gráfica 21: Efecto de la interacción de la sección y el material de la viga.

4.7 RESUMEN DE RESULTADOS

Tabla 36

Resumen de resultados de los análisis realizados a las probetas concluidos los ensayos

RANGO DE TRANSICIÓN – FINALIZACIÓN DE LA TRANSICIÓN (mm)							
MATERIAL	**DIÁMETRO (mm)**	**CORRIDA EXPERIMENTAL**	**RADIO DE CURVATURA**	**GRÁFICAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN**	**RELACION DE TIMOSHENKO**	**PROMEDIO**	**PROMEDIO TOTAL**
ACERO	8	1	2 – 8	8	8	8	7,78 = 8
		2	2 – 6	8	8	7,33	
		3	4 – 8	8	8	8	
	10	1	4 – 9	10	10	9,67	9,33 = 9
		2	4 – 8	10	10	9,33	
		3	4 – 7	10	10	9	
	12	1	8 – 11	12	12	11,67	11,56 = 12
		2	8 – 11	12	12	11,67	
		3	8 – 10	12	12	11,33	
ALUMINIO	7	1	2 – 10	10	6 – 10	10	9,78 = 10
		2	4 – 10	10	6 – 10	10	
		3	4 – 8	10	6 – 10	9,33	
	9,5	1	4 – 10	12	8 – 12	11,33	11,11 = 11
		2	4 – 10	12	8 – 12	11,33	
		3	4 – 8	12	8 – 12	10,67	
	12,7	1	-	22	12 – 22	22	22
		2	-	22	12 – 22	22	
		3	-	22	12 – 22	22	

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE COSTOS

5.1 COSTOS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Los costos totales del proyecto de investigación están compuestos por costos directos (tienen influencia directa en la investigación), y por costos indirectos (influyen indirectamente en la investigación). Los costos del proyecto se detallan en la Tabla 37 y el financiamiento de los mismos en la Tabla 38.

Tabla 37

Costos totales del proyecto de investigación

	ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO ($)	COSTO TOTAL ($)
COSTOS DIRECTOS	1	Acero A-588	Kilogramo	12	4	48
	2	Acero A36	Kilogramo	4	2,5	10
	3	Acero K455	Kilogramo	15	15	225
	4	Acero DF-2	Kilogramo	12	12	144
	5	Acero AISI 1018	Kilogramo	1	2	2
	6	Acero AISI 4130	Kilogramo	2	4	8
	7	Electromaquinado	Unidad	9	20	180
	8	Maquinado	Hora	40	8	320
	9	Tratamiento térmico	Kilogramo	15	5	75
	10	Re - maquinado	Unidad	18	7	126
	11	Pernos y arandelas	Unidad	5	1	5
	12	Varilla de acero φ 8 mm	Metro	6	0,5	3
	13	Varilla de acero φ 10 mm	Metro	6	0,72	4,32
	14	Varilla de acero φ 12 mm	Metro	12	1,05	12,6
	15	Varilla de acero 8x8 mm	Metro	6	0,62	3,72
	16	Varilla de acero 9x9 mm	Metro	12	0,74	8,88

Continúa →

	17	Varilla de acero 11x11 mm	Metro	6	1,11	6,66
	18	Varilla de aluminio φ 7 mm	Metro	8	5	40
	19	Varilla de aluminio φ 9,5 mm	Metro	8	9	72
	20	Varilla de aluminio φ 12,7 mm	Metro	8	10	80
	21	Rectificado de galgas	Hora	2	25	50
	22	Herramientas y utillajes	-	-	-	100
	23	Uso de taller	Hora	50	60	3000
	24	Ensayos destructivos	Unidad	255	15	3825
	25	Uso del laboratorio - metrología	Unidad	255	20	5100
	26	Fractografías	Unidad	30	200	6000
	27	Mano de obra directa	Mes	12	350	4200
COSTOS INDIRECTOS	1	Asesoría	Hora	25	50	1250
	2	Movilización	Mes	12	20	240
	3	Misceláneos	-	-	-	1000
			TOTAL			**26139,18**

Tabla 38

Financiamiento del proyecto de investigación

FINANCIAMIENTO			
RESPONSABLE	**DESCRIPCIÓN**	**COSTO ($)**	**PORCENTAJE (%)**
Diana Puga Gallegos	Materiales, maquinado, tratamiento térmico y probetas.	6864,18	26
Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE	Laboratorios y asesoría.	13275	51
Laboratorio de Criminalística de Pichincha Sección de Microscopía Electrónica	Microscopio electrónico de barrido.	6000	23
	TOTAL	26139,18	100

Es necesario mencionar que los costos correspondientes a uso del taller, ensayos destructivos, uso del laboratorio de metrología y asesoría fueron cortesía de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, así también las fractografías fueron cortesía del Departamento de Criminalística de Pichincha Sección Microscopía Electrónica.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Las vigas de acero A36 y aluminio de sección circular cargadas transversalmente fallan debido a la influencia del esfuerzo flector si la relación L/h es mayor o igual a 1, siempre que L sea la separación existente entre el apoyo y el punzón, con un punzón de 50 mm de espesor. Entonces la falla debida a la influencia del esfuerzo flector en vigas de acero de 8 mm de diámetro es a partir de 8 mm de separación apoyo – punzón, 10 mm de diámetro a partir de 9 mm de separación apoyo – punzón y 12 mm de diámetro a partir de 12 mm de separación apoyo – punzón. En vigas de aluminio de 7 mm de diámetro a partir de 10 mm de separación apoyo – punzón, 9,5 mm de diámetro a partir de 11 mm de separación apoyo – punzón y 12,7 mm de diámetro a partir de 22 mm de separación apoyo – punzón.
- Debido a la forma de trabajo durante el ensayo la deformación de la viga incrementa de manera exponencial cambiando bruscamente de la falla por cortante a la falla por flector, además incluso en los ensayos de cortante puro existe deformación de la viga ya que la longitud mínima de esta es 50 mm debido al espesor del punzón.
- El accesorio diseñado para llevar a cabo el ensayo destructivo de las vigas presenta como limitante el uso de dispositivos previamente diseñados, debido a esto y a los esfuerzos de contacto generados entre la viga y el dado de corte, los dados de corte son incapaces de resistir las cargas aplicadas al ensayar las probetas de sección cuadrada y se rompen, además de ello la fragilización del material del dado de corte y las aristas vivas de la sección de la probeta coadyuvan a la falla inminente de elemento mencionado.
- La relación entre el diámetro de la viga y la separación apoyo-punzón en vigas de acero se describe mediante una recta de ecuación $y = x$ siendo

y la separación apoyo – punzón y x el diámetro de la viga, en vigas de aluminio se describe mediante una recta de ecuación $y = 1{,}0617x - 0{,}6668$; estos resultados se verifican aplicando la relación de Timoshenko y el error tanto para vigas de acero como de aluminio es 30% respecto al valor $\frac{L}{h} \geq 10$ establecido por Timoshenko a partir del cual inicia la falla debida al esfuerzo flector.

- En base al análisis microscópico de las secciones luego de la falla mediante fractografía la falla del acero debida a la influencia del esfuerzo cortante puro presenta una estructura fibrosa, con filamentos claramente identificables, y la falla del acero debida a la influencia del esfuerzo flector puro presenta una estructura globular.
- La formación académica de la Carrera de Ingeniería Mecánica fue una herramienta valiosísima para la realización del presente proyecto, aun así falta generar conocimiento sobre diseño experimental en los estudiantes de Ingeniería Mecánica.

6.2 RECOMENDACIONES

- Con un volumen muestral mayor los resultados son más concluyentes y confiables, por lo tanto se recomienda realizar más corridas experimentales, incrementar el número de muestras y disminuir el paso (variación de la separación apoyo-punzón) entre los ensayos a fin de obtener mejores resultados. Además el paso debería establecerse como un valor adimensional resultante de la relación L/h.
- Rediseñar el accesorio disminuyendo el espesor del punzón para evitar la deformación de la viga en los ensayos a cortante y observar más claramente la transición entre la falla debida al cortante y la falla debida al flector. Adicionalmente es necesario mejorar el sistema de control de la separación entre apoyo y punzón, a fin de que esta condición sea totalmente controlada antes, durante y después de realizar el ensayo. Es necesario que se garantice un diámetro constante en toda la longitud de

viga y que la longitud total de la viga sea la misma para todos los ensayos.

- Un rediseño del accesorio es necesario considerando la carrera del pistón de la máquina de ensayos universales en la cual se desarrollará la investigación a fin de poder ensayar probetas de mayor longitud y materiales de mayor ductilidad, así también el accesorio deberá ser capaz de ensayar probetas de sección cuadrada sin fallar, para lo cual es necesario rediseñar el accesorio completamente evitando el uso de elementos previamente diseñados. La ranura de los dados de corte debería ser cónica (al igual que los extremos de las probetas) para garantizar el contacto superficial entre los dados y los extremos de la viga.
- Se recomienda ensayar más secciones comerciales de viga a fin de que la relación entre el diámetro y la separación apoyo – punzón sea más generalizada y aplicable en cualquier sección de viga.
- Es recomendable realizar un estudio fractográfico de las secciones de las probetas luego de la rotura a fin de determinar si la falla se debe a la influencia del esfuerzo cortante o a la influencia del esfuerzo flector a partir del análisis de las estructuras de falla para mejorar el análisis referente a la influencia del esfuerzo cortante en la falla de vigas dúctiles cargadas transversalmente.
- Se recomienda que la Carrera de Ingeniería Mecánica implemente cursos y seminarios sobre diseño experimental dirigidos a los estudiantes a fin de incrementar sus conocimientos sobre este tema.

BIBLIOGRAFÍA

Acero de Herramientas para Trabajo en Frío Böhler K 455. (s.f.). Obtenido de http://www.acerosboehler.com.ar/english/files/downloads/K455FSp.pdf

Acero de Herramientas para Trabajo en Frío Böhler K 460. (s.f.). Obtenido de http://www.bohler-edelstahl.com/files/K460DE.pdf

Aceros Bonificados para Maquinaria. (s.f.). Obtenido de http://www.elacero.com.ec/pdf/aceros.pdf

ASM Handbook Committe. (1987). Fractography Volume 12.

(s.f.). ASTM E 290 - 97a Métodos de Prueba Estándar para Ensayo de Doblado para la Ductilidad del Material.

Beer Ferdinand P., J. R. (2005). Mecánica Vectorial para Ingenieros - Estática. México: McGraw Hill.

Budynas Richard G., N. J. (2008). Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. México: McGraw Hill.

Cernica John N. (1972). Resistencia de Materiales. México: Compañía Editorial Continental S.A.

Cervera Ruiz Miguel & Blanco Díaz Elena. (2001). *Mecánica de Estructuras Libro 1 Resistencia de Materiales*. Obtenido de http://books.google.com.ec/books?id=ILz1f0cfOjYC&pg=PA50&dq=tipos+de+apoyos+para+vigas&hl=es&sa=X&ei=d_5mUpKKLILE4APTooHwCw&ved=0CEsQ6AEwBQ#v=onepage&q=tipos%20de%20apoyos%20para%20vigas&f=false

Dalmau M. R. & Vilardell J. (2003). Análisis Plástico de Estructuras Introducción. Barcelona: Ediciones UPC.

Deutschman Aaron D., M. W. (1987). Diseño de Máquinas Teoría y Práctica. Mexico: Compañia Editorial Continental S.A.

Failure Analysis - Industrial Case Studies. (s.f.). Obtenido de http://www.tech.plymouth.ac.uk/sme/Interactive_Resources/tutorials/FailureAnalysis/Fractography/Fractography_Resource4.htm

Fitzgerald Robert W. (s.f.). Mecánica de Materiales. México: Alfaomega.

Gere James M. (2008). Mecánica de Materiales. México: CENGAGE Learning.

González Cuevas O. M. (s.f.). *Análisis Estructural*. Obtenido de http://books.google.com.ec/books?id=0Ztw0Q-ywAoC&pg=PA19&dq=tipos+de+apoyos&hl=es&sa=X&ei=b_1mUp6oCMuh4APo3oHICA&ved=0CCwQ6AEwAA#v=onepage&q=tipos%20de%20apoyos&f=false

Gutiérrez Pulido Humberto & De la Vara Salazar Román. (s.f.). Análisis y Diseño de Experimentos. Mc Graw Hill.

Hibbeler R.C. (2006). Mecánica de Materiales. México: Pearson Educación.

Hirschfeld K. (1975). *Estática de la Construcción*. Obtenido de http://books.google.com.ec/books?id=ZToL08fbE00C&pg=PA15&dq=tipos+de+apoyos&hl=es&sa=X&ei=b_1mUp6oCMuh4APo3oHICA&ved=0CDIQ6AEwAQ#v=onepage&q=tipos%20de%20apoyos&f=false

IIRSACERO S.A de C.V. (s.f.). Obtenido de http://iirsacero.com.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=34&Itemid=49

Manual de Diseño para la Construcción con Acero. (s.f.). Obtenido de www.ahmsa.com

Módulo de Corte o de Rigidez Transversal del Acero. (s.f.). Obtenido de http://www.elconstructorcivil.com/2011/01/modulo-de-corte-o-de-rigidez.html

Moeser Martin. (s.f.). *Fractography with the SEM*. Obtenido de http://martin-moeser.de/Images/Fractography.html

Mott Robert L. (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas*. Obtenido de http://books.google.com.ec/books?id=nrYd_BjTL0UC&pg=PA104&dq=esfuerzo+cortante+en+vigas&hl=es-419&sa=X&ei=sqLJUpSSMNGrkQflx4HgAw&ved=0CEQQ6AEwAw#v=onepage&q=esfuerzo%20cortante%20en%20vigas&f=false

Nash William A. (1996). Resistencia de Materiales. México: McGraw Hill.

Popov Egor P. (1990). Mecánica de Materiales. México: Limusa Noriega.

Riley William F., S. L. (2001). Mecánica de Materiales. México: Limusa Wiley.

Timoshenko S. (1957). Resistenica de Materiales Primera Parte Teoría Elemental y Problemas. Madrid: Espasa - Calpe S.A.