

ÍNDICE.	I
RESUMEN.	IX
CAPITULO 1. GENERALIDADES.	1
1.1 Introducción.	1
1.2 Objetivos.	4
1.3 Metas.	5
1.4 Justificación.	5
1.5 Antecedentes.	5
CAPÍTULO 2. ESFUERZO Y DEFORMACIÓN.	9
2.1.- Fuerzas.	9
2.2.- Tipos de fuerza.	9
2.2.1.- Las fuerzas de cuerpo o máscas.	9
2.2.2.- Las fuerzas de superficie.	9
2.3.- Unidades de Fuerza.	10
2.4.- Esfuerzo.	11
2.4.1.- Unidades de esfuerzo.	11
2.4.2.- Tipos de esfuerzo.	12
2.4.3.- Componentes del esfuerzo.	13
2.4.4.- Estado de esfuerzo, el tensor de esfuerzo y el elipsoide de Esfuerzo.	14
2.4.5.- Clases de estados de esfuerzo.	15
2.4.5.1.- Estado de esfuerzos uniaxial.	15
2.4.5.2.- Estado de esfuerzos biaxial.	16
2.4.5.3.- Estado de Esfuerzos Triaxial.	16
2.4.5.4.- Estado de Esfuerzo Poliaxial.	16
2.4.5.5.- Estado de Esfuerzo Axial.	16
2.4.5.6.- Estado de Esfuerzo Hidrostático.	16
2.4.6.- Origen de los esfuerzos.	17
2.5.- Causas del fracturamiento en las rocas y suelos.	20
2.6.- Factores que determinan las propiedades mecánicas del Fracturamiento.	21
2.6.1.- Propiedades intrínsecas.	21
2.6.2.- Propiedades ambientales.	23
2.7.- Mecanismos de deformación de las rocas.	24
2.7.1.- Movimientos Íntergranulares.	24
2.7.2.- Movimientos intragranulares.	24
2.7.3.- Disolución y recristalización.	24
2.7.4.- Deformación elástica.	24
2.7.5.- Deformación plástica.	25
2.7.6.- Ruptura.	25

2.8.- Principios de la mecánica del fracturamiento.	24
2.8.1.- Concepto de esfuerzo y deformación.	25
2.8.2.- Relación entre esfuerzo y deformación.	26
2.8.2.1.- La deformación frágil.	29
2.8.2.2.- La deformación dúctil.	29
2.8.2.3.- La deformación plástica y viscosa.	29
2.8.2.4.- Deformación finita.	31
2.8.2.5.- Deformación infinitesimal.	31
2.8.2.6.- El estado de esfuerzo en un punto y el campo de esfuerzo.	31
2.8.3.- Elasticidad.	32
2.8.4.- Plasticidad.	33
2.8.5.- Viscosidad.	33
2.9.- Conceptos de fracturamiento y fallamiento.	34
2.9.1.- El modo o forma de fracturamiento.	34
2.9.2.- Teorías y criterios de rompimiento y/o fallamiento.	36
2.9.2.1.- Rompimientos Griffith.	36
2.9.3.- Microfracturamiento precursivo.	37
2.10.- Criterios de fallamiento.	38
2.10.1.- Esfuerzo normal máximo.	38
2.10.2.- Esfuerzo de cizalla máximo.	39
2.10.3.- Deformación máxima.	39
2.10.4.- Energía de deformación.	39
2.10.5.- Energía de deformación o distorsión.	40
2.10.6.- Esfuerzo normal en función del esfuerzo de cizalla.	41
2.10.7.- Circulo de Mohr para esfuerzos.	41
2.10.8.- Esfuerzo medio y desviatorio.	49
2.10.9.- Campos y trayectorias de los esfuerzos.	51
CAPÍTULO 3	
FRACTURAMIENTO.	53
3.1.- Fractura.	53
3.2.- Características de las rocas fracturadas.	55
3.2.1.- juntas.	55
3.2.2.- Diaclasas.	55
3.2.2.1.- Clasificación descriptiva de las diaclasas.	55
3.2.2.1.1.- Según su forma.	55
3.2.2.1.2.- Clasificación Según su longitud.	55
3.2.2.1.3.- Clasificación según su importancia o presencia relativa.	56
3.2.2.2.- Sistemas de diaclasas.	56
3.2.2.3.- Conjunto de diaclasas.	57
3.2.2.4.- Juego o Familias de diaclasas.	57
3.2.2.5.- Diaclasas en capas o laminadas o diaclasas de exfoliación.	57
3.2.2.6.- Diaclasas en columnas.	57
3.2.2.7.- Diaclasas en lajas.	57
3.2.2.8.- Diaclasas plumosas o de cizallamiento.	57
3.2.3.- Vetas y venas.	58

3.3.- Morfología de las fracturas.	59
3.3.1.- Fracturas abiertas.	59
3.3.2.- Fracturas deformadas.	60
3.3.2.1- fracturas de desgarre y relleno.	60
3.3.2.2.- Fracturas en planos de deslizamiento o lados alisados.	61
3.3.3.- Fracturas rellenas de mineral.	61
3.3.3.1.- fracturas completamente llenas.	61
3.3.3.2.- fracturas incompletamente llenas.	62
3.3.4.- Fracturas por cavidades o vugulos.	63
3.4.- Características particulares entre las relaciones de la microestructura interna de los minerales con la propagación de las microfracturas.	64
3.4.1.- Puentes de Mineral.	66
3.5.- Clasificación de las fracturas.	66
3.5.1.- Clasificación genérica de las fracturas.	68
3.5.1.1.- Fracturas de cizalla.	68
3.5.1.2.- Fracturas de extensión.	69
3.5.1.3.- Fracturas de tensión.	69
3.5.2.- Clasificación geológica de las fracturas.	69
3.5.2.1.- Fracturas tectónicas.	70
3.5.2.1.1.- Sistemas de fracturamiento asociados con fallas y productos pétreos relacionados.	70
3.5.2.1.2.- Fracturas asociadas a fallas normales.	72
3.5.2.1.3.- Fracturas relacionadas a fallas inversas.	73
3.5.2.1.4.- Fracturas relacionadas a cizalla simple.	73
3.5.2.1.5.- Las seudotaquilitas.	76
3.5.2.1.6.- Las milonitas.	77
3.5.3.- Zona de cizalla.	77
3.5.3.1.- Estructuras de rumbo.	80
3.5.3.2.- Transtensión y transpresión.	82
3.5.3.3.- Estructuras en flor (tulipán y palmera).	84
3.5.3.4.- Cuencas pull-apart.	85
3.5.3.5.- Sistemas de fracturas asociadas al plegamiento.	86
3.5.3.6.- Fracturas en domos.	89
3.5.3.7.- La litología y espesor de las capas como condicionantes del Fracturamiento.	89
3.5.4.- Fracturas regionales.	91
3.5.4.- Fracturas contraccionales.	92
3.5.4.1.- Fracturas por desecación.	92
3.5.4.2.- Fracturas por sinéresis.	93
3.5.4.3.- Fracturas contraccionales termales.	93
3.5.4.4.- Fracturas generadas por cambios de fase mineral.	94
3.5.4.5.- Estilolitos.	94
3.5.5.- Fracturas relacionadas a superficie.	95
3.6.- Fuentes de información sobre las características del fracturamiento	95
3.6.1.- Fuentes directas de información.	95
3.6.2.- Fuentes indirectas de información.	96

3.6.2.1.- Registros geofísicos de pozo.	96
3.7.- Propiedades de las fracturas que afectan el comportamiento de los yacimientos petroleros.	98
3.8.- Relación entre la morfología de las fracturas y su deformación en la conducción de los fluidos.	101
3.8.1.- Abertura de la fractura y permeabilidad.	102
3.8.2.- Ecuaciones del flujo de los fluidos.	102
3.8.3.- El efecto directo de las fracturas en el flujo de los fluidos.	106
3.8.4.- Espaciamiento del fracturamiento.	107
3.8.5.- Técnicas para calcular el espaciamiento de las fracturas.	107
3.9.- Clasificación de los yacimientos fracturados.	108

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍAS Y EQUIPO PARA LA EVALUACIÓN DE LAS FRACTURAS.

110

4.1.- Caracterización de un sistema de fracturamiento.	111
4.1.1.- Enfoque conceptual.	111
4.1.2.- Muestreo de fracturas.	112
4.1.2.1.- Fuentes de información sobre el fracturamiento.	112
4.1.2.2.- Consideraciones en el muestreo sobre afloramientos.	113
4.1.2.3.- Consideraciones en el muestreo del subsuelo.	114
4.1.2.4.- Introducción al estudio de los núcleos.	115
4.1.2.5.- Tipos de Núcleos.	116
4.1.2.5.1.- Núcleos convencionales.	117
4.1.2.5.2.- Núcleos encamisados.	117
4.1.2.5.3.- Núcleos orientados.	117
4.1.2.5.4.- Núcleos Presurizados.	118
4.1.2.5.5.- Núcleos de pared.	118
4.1.2.6.- Factores que afectan los núcleos.	118
4.1.2.7.- Análisis convencional de la información proveniente del Núcleos.	119
4.1.2.7.1.- Perfil de rayos gamma de superficie.	119
4.1.2.7.2.- Perfil rayos gamma espectral.	119
4.1.2.7.3.- Densidad de granos.	119
4.1.2.7.4.- Análisis Granulométricos.	119
4.1.2.7.5.- Análisis especiales de núcleos.	119
4.1.2.8.- Descripciones de núcleos de roca.	120
4.1.2.8.1.- Análisis de fracturas.	121
4.1.2.8.2.- Registro de la información proveniente de los núcleos de roca	128
4.1.2.9.- Características distintivas entre microfracturas y macrofracturas	129
4.1.3.- Clasificación de las fracturas.	130
4.1.3.1.- Orientación de las fracturas.	131
4.1.3.2.- Calidad de las fracturas.	132
4.1.3.3.- Fracturas y tipos de cementante.	122
4.1.4.- Escalamiento.	135

4.1.6.1.- Autosimilaridad y longitud total de las fracturas.	136
4.1.6.2.- Métodos que permiten la evaluación de las dimensiones promedio y distribución geométrica de los sistemas de fracturamiento.	138
4.1.6.3.- Fundamentos y métodos para la estimación de las densidades, distribuciones de longitud y longitud total de fracturas.	139
4.1.6.3.1.- Metodología.	139
4.1.6.3.2.- Interpretación de los resultados.	140
4.1.6.3.3.- La longitud total de la fractura.	140
4.1.6.3.4.- La intensidad de fracturas.	141
4.1.6.3.5.- La densidad de fracturas.	142
4.1.6.3.6.- Conclusiones de este método.	144
4.1.6.4.- Acercamiento hacia una escala independiente sobre la intensidad del fracturamiento y medida del promedio de espaciamento.	144
4.1.6.4.1.- Recolección de los datos del fracturamiento.	145
4.1.6.4.2.- Determinación del sistema de fracturamiento.	146
4.1.6.4.3.- Datos sobre el tamaño del fracturamiento.	147
4.1.6.4.4.- Normalización de la intensidad del fracturamiento.	148
4.1.6.4.5.- Cálculo de la intensidad del fracturamiento normalizada.	149
4.2.- Instrumentos para microscopía y métodos para obtener imágenes (microfotografías), que permiten la detección del Microfracturamiento.	151
4.2.1.- Análisis de lamina delgada.	151
4.2.2.- Microscopio de polarización.	151
4.2.3.- Microscopio de fluorescencia.	152
4.2.4.- Imágenes de alta resolución utilizadas para la detección de Microestructuras.	153
4.2.4.1.- Las Técnicas de Radiografía-X.	153
4.2.4.2.- La Fotografía Digital a Color.	153
4.2.5.- Microscopio de catodoluminiscencia.	154
4.2.6.- Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).	155
4.2.6.1.- Preparación de muestras.	155
4.2.6.2.- Preparación de la muestra de Molde Puro.	155
4.2.6.3.- Fundamentos de Operación.	156
4.3.- Métodos geofísicos.	159
4.3.1.- Los datos sísmicos marinos 4C.	162
4.3.2.- Los métodos sísmicos pasivos.	162
4.4.- Aplicación de la fotografía digital para el mapeo del fracturamiento, con la utilización de datos 3d obtenidos con tecnología de detección de luz y distancia (LIDAR).	163
4.5.- Participación del fracturamiento en la modelación integral de yacimientos petroleros.	167
4.5.1.- Los simuladores por diferencias finitas.	170
4.5.2.- Los simuladores de líneas de flujo.	170
4.6.- Enfoque analítico dentro de la modelación integral de yacimientos petroleros.	171

4.6.1.- La modelación matemática.	171
4.6.2.- Caracterización estática.	171
4.6.2.1.- Modelo geológico.	172
4.6.2.2.- Modelo Estructural.	172
4.6.2.3.- Modelo estratigráfico.	172
4.6.2.4.- Modelo litológico.	173
4.6.2.5.- Modelo de heterogeneidades del yacimiento.	173
4.6.2.6.- Modelo petrofísico.	173
4.6.3.- Simulación numérica.	173
4.6.4.- Geoestadística.	173
4.6.5.- Estimaciones.	174
4.7.- Conclusión de capítulo.	174
CAPÍTULO 5.	
APLICACIÓN DEL ESTUDIO DETALLADO DEL FRACTURAMIENTO EN DIFERENTES RAMAS DE LA GEOLOGÍA.	176
5.1.- Los campos ku maloob zaap, como ejemplo de yacimiento naturalmente fracturado en México.	176
5.1.1.- Condiciones generales.	176
5.1.2.- Ubicación.	177
5.1.3.- Marco Geológico Regional.	178
5.1.4.- Generalidades de la cuenca del Golfo de México.	179
5.1.5.- Unidades litoestratigráficas de los campos de KMZ.	181
5.1.5.1.- Mioceno Temprano.	182
5.1.5.2.- Mioceno Medio.	182
5.1.5.3.- Mioceno Superior.	183
5.1.5.4.- Plio-Pleistoceno.	183
5.1.5.5.- Plioceno Temprano.	183
5.1.5.6.- Plioceno Medio.	183
5.1.5.7.- Plioceno Superior-Pleistoceno.	183
5.1.6.- Geología estructural.	184
5.1.6.1.- Antigua Plataforma de Yucatán.	185
5.1.6.2.- Zona de Talud.	185
5.1.6.3.- Fosa de Macuspana.	185
5.1.6.4.- Pilar de Akal.	185
5.1.6.5.- Fosa de Le-Acach.	185
5.1.6.6.- Zona de Domos.	185
5.1.7.- Elementos Estructurales de la Sonda de Campeche.	185
5.1.7.1.- Falla de desplazamiento lateral.	187
5.1.7.2.- Estructuras de cabalgamiento.	188
5.1.7.3.- Fallas antitéticas.	188
5.1.7.4.- Fallas inversas y pliegues.	188
5.1.7.5.- Fallas normales.	188
5.1.7.6.- Superficie de erosión.	189
5.1.7.7.- Estructuras producidas por gravedad.	189
5.1.7.7.1. Evento distensivo.	189

5.1.7.7.2. Estabilidad Tectónica.	189
5.1.7.7.3. Evento compresivo.	190
5.1.7.7.4.- Etapa distensiva.	190
5.1.8.- Desarrollo de las estructuras de Ku-Maloob-Zaap.	191
5.1.9.- Evolución tectónica estructural.	194
5.1.9.1.- Superficie de despegue.	195
5.2.- Metodología empleada en la caracterización del fracturamiento en los yacimientos fracturados.	196
5.3.- Aplicación del estudio del fracturamiento en suelos y estructuras civiles, como base en la determinación de los parámetros de riesgo aplicados para evaluar la vulnerabilidad de los asentamientos humanos.	203
5.3.1.- Problemática de fracturamiento y hundimiento del suelo en la zona oriente del valle de México.	204
5.3.2.- Marco geológico de la cuenca de México.	211
5.3.3.- Principales Eventos Geológicos en la Cuenca de México.	211
5.3.4.- Depositación de los Sedimentos Lacustres.	214
5.3.4.1.- Capa Dura (CD).	216
5.3.4.2.- Formación Arcillosa Inferior (FAI)..	216
5.4.- Condiciones Hidrogeológicas de la Cuenca de México.	218
5.4.1.- Extracción del agua subterránea y la subsidencia.	218
5.4.2.- Propiedades Hidráulicas de los Sedimentos Lacustres.	218
5.4.3.- Conductividad Hidráulica.	219
5.5.- Metodología aplicada en el estudio del fracturamiento con el objetivo de prevenir el riesgo hacia los inmuebles vulnerables a las afectaciones por hundimiento y fracturamiento del suelo en zonas urbanas.	220
5.5.1.- Descripción de las características del fracturamiento en las estructuras civiles.	224
5.5.1.1.- Fracturamiento en muros de mampostería.	224
5.5.1.2.- Fracturamiento en miembros estructurales.	225
5.6.- Ejemplos de zonas especiales de prevención (ZEP) con mayor vulnerabilidad asociada a la potencial afectación generada por el fracturamiento y hundimiento del suelo al Oriente del Valle de México.	227
5.6.1.- ZEP (1), Colonia Peñón de los Baños en la Delegación Venustiano Carranza.	288
5.6.2.- ZEP (2) Peñón del Márquez o Peñón Viejo, en la Delegación Iztapalapa.	231
5.6.3.- ZEP (3) Periferia sur de la Sierra de Santa Catarina. Colonias Lomas de San Lorenzo, San Lorenzo Tezonco, el Molino, Cananea y la Planta, en la Delegación Iztapalapa y Colonias del Mar, Agrícola Metropolitana, Miguel Hidalgo, Barrios de Zapotitlan y Santa Catarina en la Delegación Tlahuac.	236
5.6.4.- ZEP (3-A) Colonia Lomas de San Lorenzo Tezonco, Delegación Iztapalapa	238
5.6.5.- ZEP (3-B1) Colonia Jardines de San Lorenzo, El Molino Lorenzo,	

La Planta Y Canannea. Delegación Iztapalapa.	241
5.6.6.- ZEP (3-B2) Colonia del Mar. delegación Tláhuac.	
5.6.7.- ZEPS 3 (C, D, E). Barrio de Zapotitlan, Colonia Ojo de Agua, Barrio Santa Catarina, en la periferia sur, central y este, de la Sierra de Santa Catarina, Delegación Tlahuac.	245
5.6.8.- ZEP (3-C) Barrio de Zapotitlán, en la delegación Tláhuac.	245
5.6.9.- ZEP (3-D) Colonia Ojo de Agua, en la Delegación Tlahuac.	247
5.6.10.- ZEP (3-E) Colonia Guadalupe Santa Catarina Yecahuizotl, en la Delegación Tláhuac.	248
5.6.11.- ZEP (4) Pueblo de San Andrés Mixquic, Delegación Tlahuac	250
5.6.12.- ZEP (5) Pueblo de San Antonio Tecomitl, Delegación Tlahuac. Y ZEP (6) San Luis Tlaxialtemalco, Delegación Xochimilco.	252
5.7.- Resultados.	253
5.8.- Probables causas de los procesos de hundimiento y fracturamiento de suelo en la zona oriente del valle de México	254
5.9.- Mecanismos de propagación de grietas.	256
5.9.1.- Grietas hidrodinámicas.	256
5.9.2.- Grietas regionales.	257
5.9.3.- Grietas tectónicas.	257
5.10.- Recomendaciones ante la problemática del fracturamiento y hundimiento.	260
CAPÍTULO. 6	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	261
Conclusiones.	261
Recomendaciones.	262
BIBLIOGRAFÍA.	253
APÉNDICES.	i
APÉNDICES A.	
GLOSARIO.	i
APENDICE B.	
TABLASDE CARACTERIZACIÓN DE LAS FRACTURAS.	Vi