



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

26  
76

"Medición en campo de la resistencia, deformabilidad y estado natural de esfuerzos en las masas de roca"

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :  
INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

ARTURO GARCIA NARANJO





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## CONTENIDO :

### 1. INTRODUCCION.

1.1 OBJETO

1.2 ANTECEDENTES HISTORICOS DE LA MECANICA DE ROCAS.

1.3 NECESIDAD DE LOS ESTUDIOS DE MECANICA DE ROCAS.

### 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

2.1 DEFINICION DEL PROYECTO

2.2 PARAMETROS QUE SE DESEAN ESTIMAR

2.3 INFORMACION DISPONIBLE

2.4 SELECCION DE EQUIPO Y PROGRAMA DE TRABAJO

2.5 COSTO ESTIMADO

### 3. RESISTENCIA.

3.1 PLANOS DE DEBILIDAD Y GRADO DE ALTERACION EN LA ROCA

3.2 CRITERIOS DE FALLA

3.3 PRUEBAS DE RESISTENCIA "IN-SITU"

3.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS METODOS

### 4. DEFORMABILIDAD.

4.1 GENERALIDADES

4.2 FACTORES QUE AFECTAN LA DEFORMABILIDAD DE LA ROCA

4.3 PRUEBAS DE DEFORMABILIDAD "IN-SITU"

4.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS METODOS

5. ESFUERZOS NATURALES.

5.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL ESTADO DE ESFUERZOS  
NATURAL

5.2 ESFUERZOS VERTICALES Y ESFUERZOS HORIZONTALES

5.3 METODOS PARA MEDIR ESFUERZOS NATURALES "IN-SITU"

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

# I. INTRODUCCION

## I.1 OBJETO

EN LA ACTUALIDAD, RESULTAN COMUNES OBRAS TALES COMO: PRESAS, TUNELES, PUENTES, ETC. TODAS ELLAS - DE MAGNITUD IMPRESIONANTE; PERO, PARA QUE ESTAS OBRAS FUERAN REALIZADAS SE HIZO NECESARIO RESOLVER MUCHOS PROBLEMAS QUE EN OCASIONES ERAN SINGULARES Y CUYA SOLUCION DEBIA BUSCARSE APLICANDO CONOCIMIENTOS, EN OCASIONES DE VARIAS RAMAS DE LA INGENIERIA, ABRIENDO DE ESTA MANERA NUEVOS CAMPOS A LA MISMA. ASI, PODEMOS DECIR QUE RECIENTEMENTE, ES COMO HAN SURGIDO DIVERSAS ESPECIALIDADES; ENTRE ELLAS, LA MECANICA DE ROCAS. LA FACULTAD DE INGENIERIA, OBEDECIENDO A LA CADA VEZ MAS APREMIANTE NECESIDAD DE INGENIEROS EN ESTA RAMA, HA INCLUIDO DENTRO DEL PLAN DE ESTUDIOS DE LA CARRERA DE INGENIERO CIVIL UN CURSO DE INTRODUCCION A LA MECANICA DE ROCAS. ESTE TRABAJO, PRETENDE PRESENTAR, REVISAR Y COMENTAR DE UNA MANERA ACCESIBLE A LOS ESTUDIANTES DE DICHO CURSO, LOS METODOS DISPONIBLES PARA LA EVALUACION IN-SITU DE LAS PROPIEDADES Y ELEMENTOS MECANICOS DE LAS MASAS DE ROCA.

## I.2 ANTECEDENTES HISTORICOS DE LA MECANICA DE ROCAS.

DESDE LOS TIEMPOS PREHISTORICOS EL HOMBRE HA ESTADO LIGADO A LAS ROCAS. EN LA EDAD DE PIEDRA COMO SU NOMBRE LO INDICA, ERA LA ROCA UNO DE LOS MATERIALES CON QUE EL HOMBRE SE PROVEIA DE UTENSILIOS Y REFUGIO, PARA LO PRIMERO IMPORTABA LA DUREZA DE LA ROCA, PARA LO SEGUNDO LA ESTABILIDAD. AUNQUE NO ES FACIL DEMOSTRARLO, ES OBVIO QUE DE ALGUNA MANERA AQUEL SER PRIMITIVO SE CERCIORABA DE LAS PROPIEDADES QUE POSEIAN LAS ROCAS CON QUE SE RO--

DEABA.

POSTERIORMENTE DURANTE LA EDAD DE BRONCE SE EXCAVARON TUNELES PARA LA EXTRACCION DE MINERAL DE COBRE. EN EGIPTO HACE 4 000 AÑOS YA SE USABAN LAS ROCAS CALIZAS COMO MATERIAL DE CONSTRUCCION.

EN EPOCAS RECIENTES (SIGLO I A.C.) SE PERFORARON TUNELES CON PROPOSITOS MUY DISTINTOS Y NO SOLO -- CON FINES MINEROS, UN EJEMPLO DE ESTOS ES EL TUNEL CONSTRUIDO EN EL AÑO 36 A.C. CERCA DE NAPOLES ITALIA, CON APROXIMADAMENTE 1 220 M. DE LONGITUD, 9.15 M. DE ALTURA Y 7.60 DE ANCHO.

DE ALGUNA MANERA LOS ENCARGADOS DE CONSTRUIR TALLE OBRAS TENIAN UN CONOCIMIENTO EMPIRICO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES CON QUE TRABAJABAN.

ES A PARTIR DEL SIGLO IXX QUE SE EMPIEZAN A BUSCAR FORMAS Y METODOS MAS RACIONALES EN LA CONSTRUCCION DE TUNELES PARA MINERIA, YA QUE LA LLEGADA DE LAS MAQUINAS OBLIGA A UN DESARROLLO MAS ACELERADO.

AHORA, NADIE PODRA NEGAR LA EXISTENCIA Y MAS QUENADA EL VALOR DE LA MECANICA DE ROCAS, DENTRO DEL DESARROLLO DE LOS GRANDES Y COMPLEJOS PROYECTOS, NO SOLO DE INGENIERIA CIVIL SINO TAMBIEN DE OTRAS RAMAS. PRUEBA DE ESTO ES EL SINNUMERO DE SOCIEDADES Y ORGANIZACIONES DE INGENIEROS DEDICADOS A LA PRACTICA DE LA MECANICA DE ROCAS, AMEN DE LA GRAN CANTIDAD DE PROBLEMAS QUE HAN ENCONTRADO LA SOLUCION EN LAS TEORIAS QUE LA MECANICA HA DESARROLLADO.

### 1.3 NECESIDAD DE LOS ESTUDIOS DE MECANICA DE ROCAS.

ES INDISCUTIBLE QUE PARA JUSTIFICAR UN ESTUDIO DE

MECANICA DE ROCAS PUEDEN EXISTIR MUCHAS RAZONES Y CADA PERSONA PODRA SIN DUDA ESGRIMIR MAS DE DOS, PERO LAS MAS OBIAS SON :

A) ECONOMIA.

B) SEGURIDAD.

UN ESTUDIO DE MECANICA DE ROCAS SE HACE NECESARIO POR ECONOMIA, YA QUE EL CONOCIMIENTO DE LAS CONDI-  
CIONES EXISTENTES EN UNA MASA DE ROCA NOS INDICA-  
RAN EN LA MAYORIA DE LOS CASOS LA GEOMETRIA DE --  
LAS ESTRUCTURAS QUE IMPLIQUE EL MINIMO DE INVER--  
SION ASI COMO EL MENOR COSTO DE MANTENIMIENTO, ES  
TO ES VALIDO PARA CUALQUIER TIPO DE PROYECTO VEA-  
MOS VARIOS EJEMPLOS :

- UN TUNEL. EN ESTE CASO EL CONOCIMIENTO DEL ES-  
TADO DE LA ROCA NOS DIRA COMO ESTAN DIRIGIDOS -  
LOS ESFUERZOS PRINCIPALES Y POR ENDE PODREMOS -  
DECIDIR EN FUNCION DE ESTO SI LA SECCION DEL TU-  
NEL SE HACE BAJA Y ANCHA O ALTA Y ANGOSTA, ESO  
SOLO TRATANDOSE DE LOS ESFUERZOS PRINCIPALES PE-  
RO ES OBVIO QUE AL CONSIDERAR UN MAYOR NUMERO -  
DE PARAMETROS SE PODRA HACER VARIAR LAS DIMEN--  
SIONES DEL TUNEL EN CUESTION.
- UN TALUD. PARA ESTE CASO EL CONOCIMIENTO DE --  
LAS DISCONTINUIDADES, LA RESISTENCIA AL ESFUER-  
ZO CORTANTE Y EL PESO VOLUMETRICO DEL MATERIAL-  
NOS LLEVARAN A UNA GEOMETRIA TAL QUE SU CONS- -  
TRUCCION SEA LA MAS ECONOMICA, ESTO ES QUE NO -  
NECESITE DE OBRAS ADICIONALES.

ASI PODRIAMOS ENUMERAR MUCHOS EJEMPLOS EN LOS QUE  
POR ECONOMIA SE MANIFIESTA LA NECESIDAD DE UN ES-  
TUDIO DE MECANICA DE ROCAS.

POR OTRO LADO, LA SEGURIDAD DE LOS BIENES Y PERSONAS MAS DE LAS PERSONAS QUE DE LOS BIENES, JUEGA UN PAPEL MUY IMPORTANTE EN LA SELECCION DE UN CIERTO TIPO DE ESTRUCTURA. UN ESTUDIO DE MECANICA DE ROCAS, NOS PERMITIRA PROPONER LA GEOMETRIA QUE GARANTICE DE UNA MANERA RACIONAL LA ESTABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS A CONSTRUIR, DANDO POR CONSECUENCIA UN GRADO DE SEGURIDAD A LAS PERSONAS QUE USEN, OPEREN O ESTEN CERCA DE DICHAS ESTRUCTURAS. PARA LOS EJEMPLOS ANTERIORES SE GARANTIZARIA EN AMBOS CASOS LA ESTABILIDAD DE LOS MISMOS LOGRANDO ESTO YA SEA DE UNA MANERA NATURAL O BIEN CON AYUDA DE OBRAS ADICIONALES TALES COMO INYECCIONES, ANCLAS, DRENES, ETC.

ASI, PODEMOS AFIRMAR QUE PARA CUALQUIER OBRA QUE SE VAYA A REALIZAR EN MANTOS ROCOSOS ES NECESARIO EJECUTAR UN PROYECTO DE INVESTIGACION DE LAS PROPIEDADES DE LAS ROCAS QUE ESTAN PRESENTES.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

### 2.1 DEFINICION DEL PROYECTO.

COMO YA SE DIJO, EN LA ACTUALIDAD LA INGENIERIA CIVIL CONCIBE Y LO QUE ES AUN MEJOR CONCRETA OBRAS CADA VEZ DE MAYOR ENVERGADURA, ESTO SE DEBE EN GRAN MEDIDA A QUE EL CONOCIMIENTO DE LOS MATERIALES SUBYACENTES AL LUGAR DE LA OBRA ES MAS CONFIABLE PUES SE DISPONE DE UNA GRAN VARIEDAD DE TECNICAS PARA INVESTIGAR LAS PROPIEDADES DE DICHOS MATERIALES.

AHORA BIEN, COMO LO QUE SE DESEA SABER DEPENDERA EN GRAN MEDIDA DEL TIPO DE OBRA DE QUE SE TRATE ES DE IMPORTANCIA DEFINIR ESTA LO MAS CLARAMENTE-

POSIBLE. EN GENERAL SE PUEDEN TENER LOS SIGUIENTES CASOS, CADA UNO CON UNA GRAN CANTIDAD DE VARIANTES :

- CIMENTACIONES.
- TALUDES.
- CAMARAS, GALERIAS Y TUNELES.
- POZOS.
- EXPLOTACION DE PEDRERAS.
- EXCAVACION A CIELO ABIERTO.
- CARRETERAS Y VIAS FERREAS.
- PUERTOS.

ESTA PARTE DEL TRABAJO NO REVISTE MAYOR PROBLEMA YA QUE EN GENERAL SE CONTARA CON UN PAQUETE DE PLANOS QUE DEFINIRAN AUNQUE EN FORMA MUY GENERAL Y A NIVEL DE ANTEPROYECTO EL TIPO DE OBRA DE QUE SE TRATE.

## 2.2 PARAMETROS QUE SE DESEAN ESTIMAR.

HABIENDO YA DEFINIDO EL TIPO DE OBRA, ES COMUN PASAR A DETERMINAR QUE PARAMETROS DE LA ROCA Y DEL MACIZO ROCOSO INTERESA CONOCER, YA QUE ESTOS TIENEN UNA IMPORTANCIA QUE VARIA DE PROYECTO A PROYECTO. POR EJEMPLO SI LA OBRA DE QUE SE TRATA ES UNA PRESA, TENDRAN PARTICULAR INTERES LA RESISTENCIA, LA PERMEABILIDAD Y LA ALTERABILIDAD; SI SE TRATA DE UN TUNEL TENDRA MAYOR IMPORTANCIA EL ESTADO DE ESFUERZOS NATURAL DE LA ROCA Y LA RESISTENCIA. ASI, PODRIAMOS DAR UNA CANTIDAD MUY GRANDE DE EJEMPLOS Y EN LOS QUE UNO A UNO FUERAN TENIENDO IMPORTANCIA VARIABLE CADA UNO DE LOS PARA-

METROS DE LA ROCA. EN GENERAL LOS PARAMETROS QUE SE INVESTIGAN EN LOS MACIZOS ROCOSOS SON LOS SIGUIENTES :

- RESISTENCIA
- POROSIDAD
- DEFORMABILIDAD
- DENSIDAD
- PERMEABILIDAD
- ALTERABILIDAD
- ESTADO NATURAL DE ESFUERZOS
- SENSITIVIDAD
- CONTENIDO DE AGUA
- ALTERACION

ALGUNOS DE ESTOS PARAMETROS SON EVALUADOS EN LABORATORIO Y OTROS EN CAMPO, EXISTIENDO TAMBIEN EN ALGUNOS CASOS LA POSIBILIDAD DE REALIZAR PRUEBAS TANTO EN CAMPO COMO EN LABORATORIO, ES DECIR SE PUEDEN EVALUAR EN AMBOS AMBIENTES. POR EJEMPLO EN EL CASO DE LA PERMEABILIDAD, ESTA SE PUEDE DETERMINAR TANTO EN CAMPO COMO EN LABORATORIO, NO ASI EL ESTADO NATURAL DE ESFUERZOS EL CUAL SOLO ES POSIBLE DETERMINARLO EN CAMPO.

ES NECESARIO QUE SE DEFINA DE MANERA GENERAL LO QUE SE ENTIENDE POR CADA UNO DE LOS PARAMETROS MENCIONADOS CON ANTERIORIDAD, AUNQUE EN ESTE CAPITULO NO SE DARAN LOS METODOS PARA SU EVALUACION, ADEMAS SIENDO EL OBJETO DE ESTE TRABAJO EL PRESENTAR LOS METODOS PARA DETERMINAR RESISTENCIA, DEFORMABILIDAD Y ESTADO DE ESFUERZO NATURAL, SOLO -

SE PRESENTARAN ESTOS :

**RESISTENCIA:** ES UNA MEDIDA DE LA CAPACIDAD DE LA ROCA PARA SOPORTAR CARGAS.

**POROSIDAD :** ES UNA MEDIDA DE LA CANTIDAD DE HUECOS QUE TIENE LA ROCA.

**DENSIDAD :** ES UNA MEDIDA DE SU PESO VOLUMETRICO-UNITARIO RESPECTO AL DEL AGUA.

**PERMEABILIDAD:** ES UNA MEDIDA DE LA RESISTENCIA QUE OPONE LA ROCA PARA QUE UNA CORRIENTE DE AGUA FLUYA EN SU SENO.

**ALTERABILIDAD:** ES UNA MEDIDA DE LA VELOCIDAD CON QUE PUEDEN CAMBIAR LAS PROPIEDADES DE LAS ROCAS - EN PRESENCIA DE AGENTES EXTERNOS.

**FRAGMENTACION NATURAL:** ESTA PROPIEDAD REVISTE PARTICULAR INTERES CUANDO SE TRATA DE EXPLOTACION DE PEDRERAS, YA QUE NO PROPORCIONA INFORMACION ACERCA DE LA FORMA QUE ADOPTEN LAS PARTICULAS DE ROCA AL SER FRAGMENTADA.

**SENSITIVIDAD:** ES UNA MEDIDA DEL CAMBIO EN LA PERMEABILIDAD AL CAMBIAR EL ESTADO DE ESFUERZOS A -- QUE ESTA SOMETIDA LA ROCA.

**CONTENIDO DE AGUA:** ES UNA MEDIDA DE LA CANTIDAD - DE AGUA EXISTENTE DENTRO DE LA ROCA.

**ALTERACION:** ES UNA MEDIDA DEL CAMBIO EN LAS PROPIEDADES DE LA ROCA QUE YA TUVO LUGAR.

ES COMUN EVALUAR OTROS PARAMETROS QUE SI BIEN NO SON INDICADORES DE LA ROCA EN SI, SI LO SON DEL MACIZO ROCOSO EN GENERAL, POR LO QUE SU CONOCIMIENTO ES DE GRAN AYUDA PARA DEFINIR POSTERIORMENTE OTROS TRABAJOS.

ESTOS INDICADORES SON :

- ÍNDICE DE CALIDAD DE LA ROCA.
- ESTADO DE ESFUERZOS NATURAL.
- RAZGOS ESTRUCTURALES (FISURAS, FALLAS Y FRACTURAS, DIQUES, CONTACTOS LITOLÓGICOS, PLIEGUES, - ETC.)

EL ÍNDICE DE CALIDAD DE LA ROCA ES UN INDICADOR - QUE SE PUEDE RELACIONAR CON DIFERENTES PRUEBAS, - EN FORMA GENERAL SE ACEPTA COMO EL COCIENTE DE LA SUMA DE LAS LONGITUDES MAYORES DE 10 CM. DE TRAMOS RECUPERADOS EN UN SONDEO ENTRE LA LONGITUD TOTAL DEL AVANCE LOGRADO. EL ÍNDICE DE CALIDAD DE LA ROCA PUEDE OBTENERSE TAMBIÉN A PARTIR DE UN ENSAYE GEOSISMICO, EN CUYO CASO SE TENDRÁ UNA RELACION ENTRE LA VELOCIDAD DE PROPAGACION DE LA ONDA Y EL ÍNDICE EN CUESTION. EN GENERAL LA VELOCIDAD AUMENTA A MEDIDA QUE LA ROCA SE HACE DE MEJOR CALIDAD.

RESPECTO AL ESTADO DE ESFUERZOS NATURAL SE PUEDE DECIR QUE SU CONOCIMIENTO SE TORNA EN OCASIONES DE FUNDAMENTAL IMPORTANCIA. POR EJEMPLO, EN EL CASO DE TUNELES DE GEOMETRIA Y RUMBO QUE SE ADOPTA PARA ESTOS DEPENDERÁ DE LA ORIENTACION DE LOS ESFUERZOS PRINCIPALES. TOMANDO EL CASO DE LA EXPLOTACION DE UNA PEDRERA TAMBIÉN INFLUIRÁ EN FORMA MUY MARCADA PARA DEFINIR LA SECUELA DE EXPLOTACION.

LOS RAZGOS ESTRUCTURALES, COMO LAS FISURAS, FALLAS, FRACTURAS, ETC. AFECTAN GRANDEMENTE A LA RESISTENCIA, LA PERMEABILIDAD Y DEFORMABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO EN SU CONJUNTO POR LO QUE SU DEFINICION ES DE MUCHA IMPORTANCIA. POR EJEMPLO EN EL CASO DE TALUDES, LA ORIENTACION DE ESTOS RAZGOS PUEDE LIMITAR GRANDEMENTE LA GEOMETRIA DEL MISMO.

UN ESTUDIO DE MECANICA DE ROCAS DEBERA PRESENTAR DATOS REFERENTES (CUALITATIVA Y CUANTITATIVAMENTE) A CADA UNO DE LOS PUNTOS ANTES MENCIONADOS DE TAL MANERA QUE EL PROYECTISTA PUEDA EJECUTAR UN DISEÑO RACIONAL, CONFIABLE Y ECONOMICO.

### 2.3 INFORMACION DISPONIBLE.

EN ESTE PUNTO SE PUEDE GENERALMENTE CONTAR CON -- UNA SERIE DE DOCUMENTOS QUE PERMITEN INICIAR LOS TRABAJOS DE GABINETE, ESTOS DOCUMENTOS SE PUEDEN DIVIDIR EN DOS GRUPOS :

- DOCUMENTOS PROPIOS DEL PROYECTO.
- DOCUMENTOS DE LA ZONA DONDE SE REALIZARA EL PROYECTO.

LOS DOCUMENTOS PROPIOS DEL PROYECTO SON LOS PLANOS GENERALES DE INGENIERIA BASICA Y LAS NORMAS DE DISEÑO SOBRE LOS CUALES SE DESARROLLARA EL PROYECTO. LA INFORMACION CONTENIDA EN LOS PLANOS -- COMPRENDERA LO SIGUIENTE :

- ARREGLO GENERAL DEL PROYECTO.
- LOCALIZACION.
- ZONA DE INFLUENCIA.

EN LO QUE RESPECTA A LA INFORMACION DE LA ZONA, -- EN GENERAL SE PUEDE CONTAR CON LO SIGUIENTE :

- PLANOS TOPOGRAFICOS DEL LUGAR A DIFERENTES ESCALAS.
- PLANOS GEOLOGICOS DE LA ZONA.
- PLANOS DE USO DEL SUELO.
- PLANOS DE CAMINOS Y VIAS DE COMUNICACION.

ESTA INFORMACION ES NECESARIA POR DOS RAZONES :

10. CON LA INFORMACION DEL PROYECTO SE TIENEN LOS ELEMENTOS NECESARIOS PARA HACER UN PRIMER PROGRAMA DE EXPLORACION Y MUESTREO YA QUE DEPENDIENDO DEL O DE LOS TIPOS DE CONSTRUCCION QUE CONTEMPLE EL PROYECTO, SERA LA MAGNITUD Y DENSIDAD DE LOS SONDEOS; POR EJEMPLO, SI DENTRO DEL PROYECTO SE CONTEMPLA UN EDIFICIO ALTO, - UN CAMINO Y UN TUNEL ES OBVIO QUE PARA CADA - UNO DE ESTOS SE NECESITARA UNA CIERTA DENSIDAD, ORIENTACION Y LOCALIZACION DE LOS SONDEOS.
20. CON LA INFORMACION DE LA ZONA Y UNA VEZ DEFINIDO EL PROGRAMA DE SONDEOS SE PUEDE SELECCIONAR EL TIPO O TIPOS DE EQUIPO QUE SE USARAN - YA QUE EL USO DE UN TIPO O DE OTRO DEPENDE EN GRAN MEDIDA DE LAS CARACTERISTICAS DE LA ROCA QUE SE MUESTREARA POR LO QUE RESULTA ALTAMENTE ATRACTIVO INVESTIGAR TODAS LAS FUENTES POSIBLES DE INFORMACION ACERCA DEL SITIO.

#### 2.4 SELECCION DE EQUIPO Y PROGRAMA DE TRABAJO.

UNA VEZ QUE SE HA HECHO UNA RECOPIACION DE LA INFORMACION DISPONIBLE SE PROCEDE A LA SELECCION DEL EQUIPO QUE SE USARA EN LOS TRABAJOS, ESTA SELECCION SE HARA CONSIDERANDO LOS SIGUIENTES FACTORES :

- TIPO DE MUESTREO O EXPLORACION QUE SE PRETENDE REALIZAR.
- TIEMPO DE EJECUCION DE LOS TRABAJOS.
- DISPONIBILIDAD DEL EQUIPO EN EL MERCADO.

- POSIBILIDAD DE USAR EL EQUIPO EN CAMPO.
- DISPONIBILIDAD DE PERSONAL CAPACITADO.

CONJUGANDO ESTOS FACTORES CON EL ANTEPROYECTO DE SONDEOS SE PODRA ELABORAR EL PROGRAMA DE EXPLORACION DEL CUAL DEBERA SER OBSERVADO SU CUMPLIMIENTO EN LA MEDIDA DE LO POSIBLE. EL PROGRAMA DE -- TRABAJO PODRA TENER LAS SIGUIENTES ETAPAS :

- TRANSPORTE DE EQUIPO A CAMPO.
- INSTALACION DEL EQUIPO EN CAMPO Y MUESTREO.
- TRANSPORTE DE MUESTRAS Y REGISTROS DE CAMPO A LABORATORIO.
- ENSAYES DE LABORATORIO.
- EN BASE A REPORTES DE LABORATORIO CONTINUACION DE MUESTREO O TERMINACION DEL MISMO.
- PRUEBAS DE CAMPO.
- ELABORACION DE REPORTES EN GABINETE.
- CONCLUSIONES DE LAS PRUEBAS Y RECOMENDACIONES DE DISEÑO.
- TRANSPORTE DE EQUIPO A ALMACEN.

EN ESTE PUNTO CABE MENCIONAR QUE EN OCASIONES EL PROGRAMA DE EXPLORACIONES Y ENSAYES PUEDE ALARGARSE DURANTE MESES E INCLUSO AÑOS DEPENDIENDO DE LA MAGNITUD Y FINALIDAD DE LOS TRABAJOS, POR EJEMPLO EN EL CASO DE MINERIA ESTOS PROGRAMAS TIENEN FRECUENTEMENTE LA DURACION DE VARIOS MESES, PERO DURANTE CADA AÑO Y ES COMUN QUE AUN DURANTE LA EXPLOTACION DE LAS MINAS SE CONTINUE EXPLORANDO LOS MANTOS PARA DEFINIR EL TIPO DE PROCEDIMIENTOS A SEGUIR O ADECUAR LOS USADOS.

## 2.5 COSTO ESTIMADO.

DENTRO DEL MERCADO DE INGENIERIA EN MEXICO, ES COMUN TENER COMO UNIDAD LA HORA HOMBRE, DEPENDIENDO DEL TIPO DE TRABAJOS (ESTRUCTURAS, HIDRAULICA, -- ETC.) VARIARA EL COSTO DE ESTA HORA-HOMBRE; EN GENERAL, LA DETERMINACION DE LA HORA-HOMBRE ES COMO A CONTINUACION SE INDICA :

PARA LA EJECUCION DE UN PROYECTO SE TIENE QUE ADJUDICAR UN CIERTO PERSONAL PARA TRABAJAR DIRECTAMENTE EN EL, PODEMOS DECIR QUE EL PERSONAL NECESARIO ES EL SIGUIENTE :

- GERENTE DE PROYECTO.
- INGENIERO RESIDENTE.
- OPERADOR DE EQUIPO DE PERFORACION.
- OPERADOR DE LABORATORIO.
- DIBUJANTE.
- CHOFER.
- CALCULISTA.
- MECANOGRafa.

A ESTE PERSONAL SE LE ASIGNA UN SUELDO INTEGRADO- ES DECIR SE DETERMINA LO QUE A LA EMPRESA LE CUESTA POR UNIDAD DE TIEMPO CADA UNA DE LAS PERSONAS- QUE INTERVIENEN DIRECTAMENTE EN EL PROYECTO. POR OTRO LADO SE ESTIMA EL NUMERO DE HORAS QUE CADA UNO LE DEDICARA AL PROYECTO; MULTIPLICANDOLAS POR SU COSTO UNITARIO Y SUMANDOLO TODO TENDREMOS EL IMPORTE POR EL CONCEPTO DE PERSONAL. A LA SUMA ANTES CALCULADA SE LE ADICIONARA LOS CARGOS POR CONCEPTO DE EQUIPO, LOS CARGOS POR GASTOS INDIREC

TOS Y LA UTILIDAD LLEGANDOSE A UN COSTO TOTAL DE LOS TRABAJOS. ESTE COSTO TOTAL DIVIDIDO ENTRE -- LAS HORAS-HOBRE TOTALES NOS DARA EL COSTO UNITA-- RIO POR HORA-HOMBRE.

ES IMPORTANTE TENER UNA ESTIMACION DE LAS HORAS-- HOMBRE, QUE SE REQUIERAN MENSUAL, O SEMANALMENTE-- ASI COMO UN DIAGRAMA DE FLUJO DE EFECTIVO YA QUE-- INTEGRANDO LOS TRES PROGRAMAS (PERFORACION, HORAS-- HOMBRE Y FLUJO DE EFECTIVO) SE TENDRA UNA HERRA-- MIENTA MUY UTIL PARA EL CONTROL Y BUEN DESENVOLVI-- MIENTO DE LOS TRABAJOS.

### 3. RESISTENCIA.

EN TERMINOS GENERALES SE PUEDE DECIR QUE RESISTENCIA ES LA CAPACIDAD QUE TIENE UN SISTEMA PARA SOPORTAR LA ACCION DE AGENTES EXTERNOS, ÉSTA DEFINICION ES VALIDA Y APLICABLE A CUALQUIER SISTEMA; AHORA BIEN, CONCRETANDONOS UNICAMENTE A LO QUE CONCIERNE A LA INGENIERIA CIVIL, ES USUAL QUE LOS AGENTES EXTERNOS SEAN FUERZAS; ES DECIR, EN INGENIERIA SE DICE QUE LA RESISTENCIA DE UN SISTEMA ES LA CAPACIDAD QUE TIENE EL MISMO PARA SOPORTAR LA ACCION DE FUERZAS, ÉSTAS FUERZAS PUEDEN SER DE MUY DISTINTO ORIGEN Y ESTAR APLICADAS EN MUY DISTINTAS MANERAS, PERO CUALQUIERA QUE SEA SU ORIGEN Y FORMA DE APLICACION SOLO PODRA INDUCIR EFECTOS DE DOS TIPOS :

- NORMALES (TENSIONES O COMPRESIONES).
- TANGENCIALES (CORTANTE)

EN LA GENERALIDAD DE LOS CASOS LA RESISTENCIA A LOS EFECTOS MENCIONADOS ES DIFERENTE DEPENDIENDO, COMO VEREMOS MAS ADELANTE, DE MUCHOS FACTORES.

#### 3.1 PLANOS DE DEBILIDAD Y GRADO DE ALTERACION EN LA ROCA.

EN LAS ROCAS SE LE LLAMA RESISTENCIA A LA FUERZA QUE APLICADA A UNA PROBETA LE PROVOCA LA FALLA, ES DECIR LE PROVOCA TAL ESTADO DE AGRIETAMIENTO Y DEFORMACIONES QUE YA NO ES CAPAZ DE SOPORTAR INCREMENTOS DE CARGA. ENTRE OTROS FACTORES LA RESISTENCIA DE UNA ROCA DEPENDE EN GRAN MEDIDA DE SUS PLANOS DE DEBILIDAD, FORMA DE APLICAR LA CARGA Y GRADO DE ALTERACION. SIN EXCEPCION TODAS LAS ROCAS PRESENTAN DEFECTOS ESTRUCTURALES MUCHAS VECES A LA VISTA Y ALGUNAS VECES EN FORMA LATENTE,

ESOS DEFECTOS CONSISTEN EN FRACTURAS MAS O MENOS-  
ESPACIADAS QUE DEFINEN LO QUE SE CONOCE COMO PLA-  
NOS DE DEBILIDAD, ESTOS COMO YA SE DIJO PUEDEN --  
SER EXISTENTES O POTENCIALES.

LOS PLANOS DE DEBILIDAD PUEDEN SER PROVOCADOS POR  
SISTEMAS DE FRACTURAS MAS O MENOS ESPACIADOS EN -  
LA MASA DE LA ROCA TALES COMO :

- FRACTURAS, GRIETAS, GRIETAS CAPILARES Y FISURAS.
- JUNTAS.
- PLANOS DE ESTRATIFICACION.
- PLANOS DE FALLAS.
- PLEGAMIENTOS.
- CLIVAJE.
- CAVIDADES Y VACIOS.

LOS PRINCIPALES TIPOS DE FRACTURAS SON LAS FALLAS  
Y LAS JUNTAS, LAS FALLAS SON AQUELLAS FRACTURAS -  
QUE ACUSAN UN DESPLAZAMIENTO RELATIVO ENTRE LAS -  
CARAS; LAS JUNTAS SON FRACTURAS QUE NO PRESENTAN-  
DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS ENTRE SUS CARAS. CUAN-  
DO LAS PAREDES DE LA JUNTA SE SEPARAN ES USADO EN  
EL TERMINO FISURA, AMBAS, JUNTAS Y FALLAS SON RAZ-  
GOS ESTRUCTURALES QUE REVISTEN GRAN INTERES PRACTI-  
CO EN LA MECANICA DE ROCAS DEBIDO A LA INFLUEN-  
CIA TAN DETERMINANTE QUE EN UN MOMENTO PUEDEN TE-  
NER, POR EJEMPLO, EN LA CIMENTACION DE UNA PRESA.

LOS PLANOS DE ESTRATIFICACION SON SUPERFICIES MAS  
O MENOS DEFINIDAS QUE LIMITAN ENTRE SI LAS DIFE-  
RENTES CAPAS SUPERPUESTAS EN UNA ROCA SEDIMENTA-  
RIA, ESTAS SUPERFICIES PRESENTAN LA PECULIARIDAD-  
DE SER ZONAS DEBILES.

LOS PLEGAMIENTOS SON DEFORMACIONES QUE LA ROCA -  
SUFRE DEBIDO A LA ACCION DE FUERZAS QUE ACTUAN --  
TANGENCIALMENTE A LA SUPERFICIE DE LA TIERRA, CO-  
MO RESULTADO DEL TECTONISMO, LOS PLEGAMIENTOS PUE-  
DEN ADOPTAR UNA AMPLIA GAMA DE FORMAS, EL INTERES  
EN MECANICA DE ROCAS RADICA EN QUE AL PLEGARSE --  
LAS CAPAS DE ROCA APARECERAN ZONAS FISURADAS Y ZO-  
NAS COMPRIMIDAS QUE DEFINIRAN A SU VEZ ZONAS DE -  
DEBILIDAD Y ZONAS MUY COMPACTAS QUE POR OTRO LADO  
PUEDEN OCASIONAR PROBLEMAS DE PERMEABILIDAD O DE-  
ACUMULACION DE AGUA SEGUN SE TRATE DE UN SINCLI--  
NAL O UN ANTICLINAL.

EL CLIVAJE O MAS CONCRETAMENTE EL PLANO DE CLIVA-  
JE ES AQUEL POR EL QUE EN FORMA NATURAL AL APLI--  
CAR UNA FUERZA A LA ROCA ESTA SE FRACTURARA Y DE-  
PENDE PRINCIPALMENTE DE LA ORIENTACION DE LOS - -  
CRISTALES DE LA ROCA. A ESTA PROPIEDAD TAMBIEN -  
SE LE LLAMA CRUCERO.

LAS CAVIDADES Y VACIOS SON OQUEDADES QUE SE FOR--  
MAN EN LOS MACIZOS ROCOSOS POR MUY DIFERENTES CAU-  
SAS, POR EJEMPLO EN ROCAS IGNEAS SE PUEDEN DEBER-  
A BURBUJAS DE GAS ATRAPADAS EN LA LAVA AL SOLIDI-  
FICARSE, EN ROCAS METAMORFICAS SE PUEDE DEBER A -  
LA ACCION DE AGUA CON AGENTES AGRESIVOS (ACIDOS,-  
ETC.) Y EN LAS ROCAS SEDIMENTARIAS SE PUEDE DEBER  
A LA ACCION EROSIVA DEL AGUA O A LA DISOLUCION DE  
LOS COMPONENTES DE LA ROCA. ESTAS OQUEDADES SI -  
BIEN NO DEFINEN PLANOS DE DEBILIDAD SI PROVOCAN -  
ZONAS EN LAS QUE SE PUEDEN PRESENTAR EN FORMA SOR-  
PRESIVA FALLAS QUE EN UN MOMENTO DADO PUEDEN PO--  
NER EN PELIGRO LA ESTABILIDAD DE LA OBRA Y POR EN-  
DE LA SEGURIDAD DE LOS USUARIOS DE LA MISMA.

COMO VIMOS ANTERIORMENTE EN TERMINOS GENERALES --

LAS FISURAS DEFINEN EN GRAN MEDIDA LA RESISTENCIA DE UNA ROCA ESTO DEBIDO A LOS PLANOS DE DEBILIDAD QUE A ELLAS SE LES PUEDE ATRIBUIR. UNA FORMA DE MEDIR LA CANTIDAD DE POROS QUE TIENE UNA MUESTRA- (GRIETAS , FISURAS, ETC.) ES POR MEDIO DEL PARAMETRO QUE SE CONOCE COMO GRADO DE ALTERACION.

GRADO DE ALTERACION. LA SIGUIENTE EXPRESION NOS- DEFINE EN FORMA MATEMATICA LO QUE SE ENTIENDE CO- MO GRADO DE ALTERACION :

$$I = \frac{P_2 - P_1}{P_1} ; \text{ DONDE } P_2: \text{ PESO DE LA MUESTRA DE ROCA SUMERGIDA EN AGUA DURANTE UN TIEMPO "T".}$$

$P_1$ : PESO DE LA MUESTRA DE ROCA EN ESTADO SECO.

EN REALIDAD ESTE PARAMETRO MIDE LA CANTIDAD DE AGUA ABSORBIDA POR UNA MUESTRA DETERMINADA COMO -- PORCENTAJE DEL PESO SECO DE LA MUESTRA; OBVIAMENTE LA CANTIDAD DE AGUA QUE PUEDA ABSORBER UNA - - MUESTRA DEPENDERA DEL VOLUMEN DISPONIBLE EN LA ROCA PARA ALMACENAR DICHA AGUA POR LO TANTO EXISTE- UNA RELACION DIRECTA ENTRE POROSIDAD Y GRADO DE - ALTERACION YA QUE LA POROSIDAD ES LA RELACION EN- TRE EL VOLUMEN DE VACIOS Y EL VOLUMEN TOTAL DE LA MUESTRA. ES INDISCUTIBLE QUE EN EL VOLUMEN DE VA- CIOS CONTRIBUYEN ENORMEMENTE LAS FISURAS QUE EXIS- TEN EN LA MUESTRA Y POR LO MISMO EL GRADO DE ALTE- RACION INDIRECTAMENTE NOS DARA UN DATO DE QUE TAN FISURADA (ALTERADA) ESTA LA ROCA.

### 3.2 CRITERIOS DE FALLA.

EN INGENIERIA LA PALABRA FALLA ENCIERRA UNA SITUACION DE PERDIDA TOTAL DE LA CAPACIDAD DE DESARROLLAR LA FUNCION PARA LA CUAL UN SISTEMA FUE PROYECTADO. ESTA SITUACION PUEDE ALCANZARSE POR DIFERENTES CAMINOS, SE PUEDE CONSIDERAR QUE UN ELEMENTO HA FALLADO CUANDO SE HAYA DEFORMADO EXCESIVAMENTE, O CUANDO AUN SIN HABER COLAPSADO NO SEA CAPAZ DE ADMITIR NUEVOS INCREMENTOS DE CARGA. AHORA BIEN NO BASTA MARCAR LOS LIMITES QUE DEFINAN UNA SITUACION DE FALLA, ES IMPORTANTE TAMBIEN INVESTIGAR LOS MECANISMOS POR MEDIO DE LOS CUALES SE LLEGA A ELLA, YA QUE CON ESTO SE ESTA EN POSIBILIDADES DE ALCANZAR MAYORES MARGENES DE SEGURIDAD Y ECONOMIA. EN ESTAS CONDICIONES SE HAN DESARROLLADO VARIAS TEORIAS QUE TRATAN DE EXPLICAR EL MECANISMO DE LA FALLA DE UN ESPECIMEN SOMETIDO A UNA CARGA.

CABE MENCIONAR AQUI QUE LA RESPUESTA DE LA ROCA ES DIFERENTE SEGUN SEAN LAS CONDICIONES EN QUE ESTA SEA ENSAYADA, YA QUE EL MATERIAL EN ESTADO NATURAL SE ENCUENTRA CONFINADO EN FORMA MAS O MANOS REGULAR SE HAN TRATADO DE REPRODUCIR ESTAS CONDICIONES EN LABORATORIO ENCONTRANDOSE QUE LA PLASTICIDAD DEL MATERIAL AUMENTA EN RAZON DIRECTA AL AUMENTO DE LA PRESION CONFINANTE, EN ESTAS CONDICIONES SE DESTACAN TRES GRANDES TIPOS DE FALLA :

- FALLA FRAGIL.
- FALLA MOHR-COULOMB.
- FALLA PLASTICA.

LA FALLA FRAGIL OCURRIRA EN UN MATERIAL EN EL QUE LA PRESION CONFINANTE SEA PEQUEÑA, LA FALLA MOHR-COULOMB OCURRIRA SI LA PRESION CONFINANTE AUMENTA

Y SI ESTA ES MUY GRANDE ENTONCES OCURRIRA UNA FALLA PLASTICA, EN EL CASO DE LA FALLA FRAGIL APARECEN EN LA PROBETA GRIETAS VERTICALES Y SUBITAMENTE FALLA EL MATERIAL CON DEFORMACIONES MUY PEQUEÑAS EN EL OTRO EXTREMO LA FALLA PLASTICA SE ACOMPAÑA DE GRANDES DEFORMACIONES E INCLUSO ENDURECI-MIENTOS POR DEFORMACION.

SE HAN MENCIONADO TRES GRANDES GRUPOS EN LOS CUALES SE CLASIFICARIA CUALQUIER TIPO DE FALLA; PERO ESO NO BASTA YA QUE DECIR LA FALLA ES FRAGIL O -- PLASTICA SOLO ILUSTR A CUALITATIVAMENTE LO QUE OCURE EN EL INSTANTE EN QUE SE ALCANZA DICHA SITUACION Y NO ASI DEL MECANISMO PROPIAMENTE, PARA ESTO SE HAN DESARROLLADO DIFERENTES TEORIAS QUE SE CONOCEN COMO CRITERIOS DE FALLA, ES COMUN QUE LOS MISMOS NO SEAN ACEPTADOS EN FORMA UNIVERSAL.

CUANDO SE TRATA DE HACER UN ANALISIS EN EL QUE SE PRESUMA QUE LA FALLA ES DE TIPO FRAGIL, SE PUEDE HACER USO DE ALGUNO DE LOS SIGUIENTES CRITERIOS:

- CRITERIO DEL MAXIMO ESFUERZO DE TENSION.
- CRITERIO DE GRIFFITH.
- CRITERIO DE JOISEL.

SI EL ANALISIS PRESUPONE UN COMPORTAMIENTO ELASTICO CON PRESION CONFINANTE MODERADA, ENTONCES SERAN UTILES LOS CRITERIOS SIGUIENTES :

- CRITERIO DE MOHR.
- CRITERIO DE COULOMB.
- CRITERIO DE MOHR-COULOMB.

POR ULTIMO, SI ES FACTIBLE ESPERAR UN COMPORTAMIENTO PLASTICO SE TIENEN PARA ESTOS CASOS LOS --

CRITERIOS QUE PRESUPONEN ESTA PREMISA :

- CRITERIO DE TRESCA.
- CRITERIO DE VON MISES.
- CRITERIO DE VON MISES-MODIFICADO.

COMO SE VERA MAS ADELANTE ALGUNOS DE ELLOS SON CASOS PARTICULARES DEL CRITERIO DE COULOMB SIENDO ESTE EL CRITERIO MAS GENERAL QUE HASTA LA FECHA SE HAYA DESARROLLADO. A CONTINUACION DESCRIBIREMOS BREVEMENTE CADA UNO DE LOS CRITERIOS ENUNCIADOS.

CRITERIO DEL MAXIMO ESFUERZO DE TENSION. ESTE CRITERIO CONSIDERA QUE LA ROCA FALLA POR TENSION CUANDO ES APLICADO UN ESFUERZO  $\sigma_3 = \sigma_{TULT}$  EN EL CUAL  $\sigma_{TULT}$  MAXIMA RESISTENCIA A LA TENSION DE LA ROCA.

$$\therefore \sigma_3 = - \sigma_{TULT} \quad \dots (3.1)$$

CRITERIO DE GRIFFITH. LA ROCA ES EN GENERAL COMO YA SE DIJO UN MATERIAL QUE PRESENTA DISCONTINUIDADES. EL CRITERIO EN CUESTION PARTE DE ESTE SUPUESTO ES DECIR, CONSIDERA UNA MASA DE ROCA EN LA CUAL EXISTE UNA DISCONTINUIDAD Y A LA CUAL ESTAN APLICADOS LOS ESFUERZOS  $\sigma_1$  Y  $\sigma_3$  (FIG. 3.1)

PARA LA REALIZACION DEL ANALISIS SE CONSIDERA QUE LA FISURA ES ELIPTICA Y MUY ACHATADA (FIG. 3.2).

INTERESA CONOCER EL ESTADO DE ESFUERZOS EN EL PUNTO B.

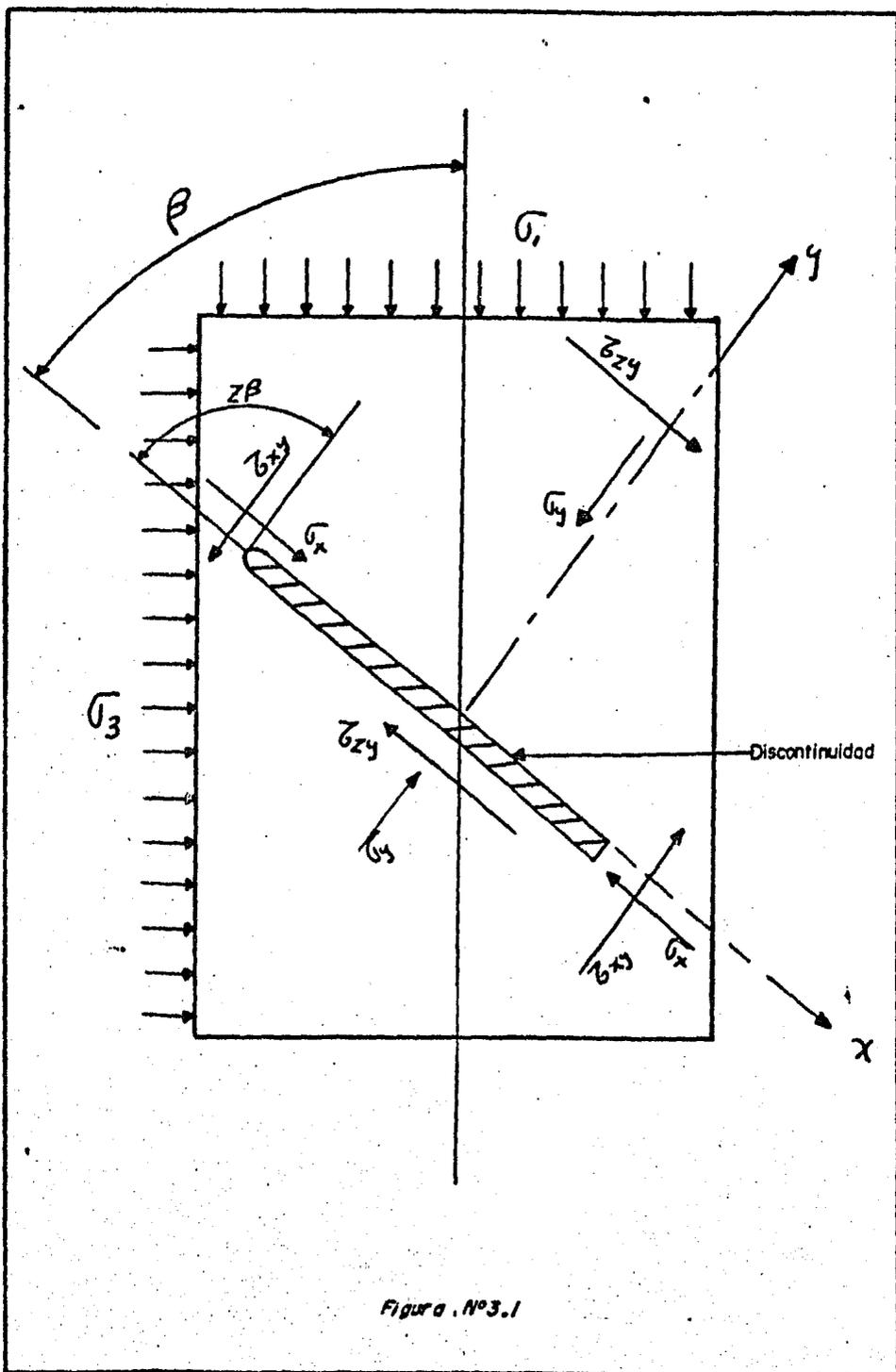


Figura .Nº3.1

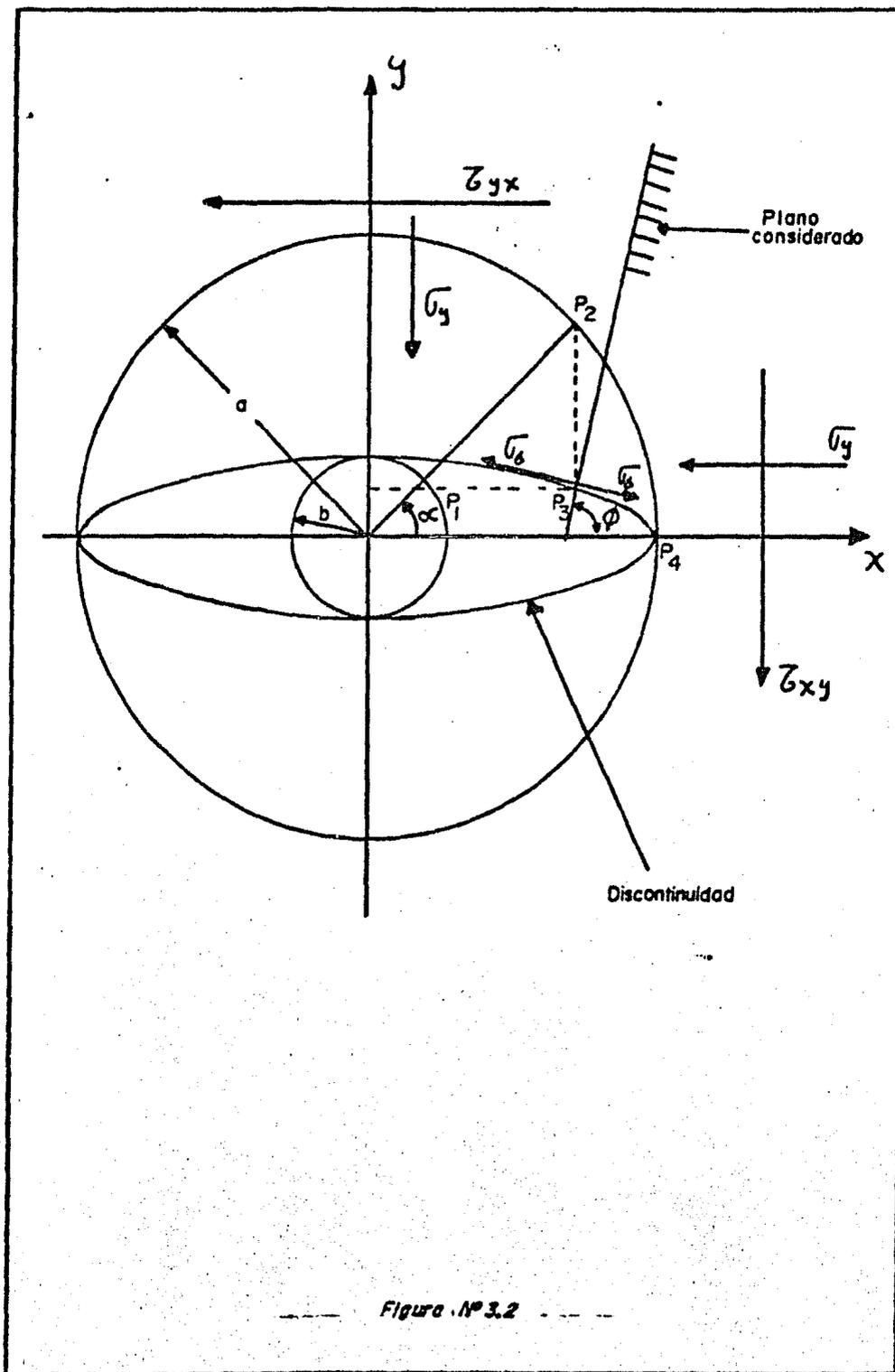


Figura .Nº 3.2

DE ACUERDO CON LA TEORIA DE LA ELASTICIDAD EL ESFUERZO EN EL PUNTO B ESTA DADO POR LA SIGUIENTE EXPRESION:

$$\sigma_B = \frac{(\sigma_Y (M(M+2) \cos^2 \alpha - \text{SEN}^2 \alpha) + \sigma_X (1+2M) \text{SEN}^2 \alpha - M^2 \cos^2 \alpha)}{M^2 \cos^2 \alpha + \text{SEN}^2 \alpha} - \frac{\tau_{XY} 2(1+M^2) \text{SEN} \alpha \cos \alpha}{M^2 \cos^2 \alpha + \text{SEN}^2 \alpha} \quad \dots \quad (3.2)$$

EN DONDE :

$$M = \frac{B}{A} \quad \text{SIENDO A : SEMIEJE MAYOR DE LA ELIPSE,}$$

$$B : \text{SEMIEJE MENOR DE LA ELIPSE,}$$

PARA EL CASO EN QUE  $\alpha = 0$  TENEMOS QUE :

$$\cos \alpha = 1$$

SEN  $\alpha = 0$ , ES DECIR CUANDO EL PUNTO SE ENCUENTRA EN EL EXTREMO DE LA ELIPSE (O EN SU VECINDAD (FIG. 3.2), SI ADEMAS LA DISCONTINUIDAD ES INFINITA Y EL ESPESOR PEQUEÑO :

$$\sigma_B = \left( \frac{\sigma_Y (M^2 + 2M - \alpha^2) + \sigma_X (1+2M) \alpha^2 - M^2}{M^2 + 2} \right) - \left( \frac{\tau_{XY} 2(1+M^2) \alpha}{M + \alpha^2} \right) \quad \dots \quad (3.3)$$

DESPRECIANDO LOS TERMINOS DE SEGUNDO GRADO EN EL NUM

MERADOR TENDREMOS :

$$\sigma_B = \frac{2 [\sigma_{YM} + \alpha \tau_{XY}]}{M^2 + \alpha^2} \dots (3.4)$$

DE AQUI PODEMOS DECIR :

SI  $\sigma_B < R_T \Rightarrow$  LA ROCA RESISTE

SI  $\sigma_B = R_T \Rightarrow$  LA ROCA ESTA EN EQUILIBRIO LIMITE.

SI  $\sigma_B > R_T \Rightarrow$  LA ROCA FALLA

EN ESTE CASO  $R_T$  : RESISTENCIA A LA TENSION DE LA ROCA.

DESDE EL PUNTO DE VISTA INGENIERIL, INTERESA SABER EN QUE PUNTO SE PRESENTARA EL ESFUERZO MAXIMO, PARA SABERLO DEBEMOS ENCONTRAR LA DERIVADA DE  $\sigma_B$  RESPECTO AL ANGULO  $\alpha$  E IGUALARLA A CERO, VEAMOS :

$$\frac{D \sigma_B}{D \alpha} = 0 \Rightarrow (\text{CONSIDERANDO } M = \text{CTE})$$

$$\frac{D}{D \alpha} \left[ 2 \left( \frac{M \sigma_Y + \alpha \tau_{XY}}{M^2 + \alpha^2} \right) \right] = \frac{-2 \tau_{XY} (M^2 + \alpha^2) - 4 \alpha (M \sigma_Y + \alpha \tau_{XY})}{(M^2 + \alpha^2)^2} \dots (3.5)$$

LO ANTERIOR IMPLICA QUE :

$$2\tau_{XY}(M^2 + \alpha^2) = -4\alpha(M\sigma_Y - \alpha\tau_{XY})$$

$$\therefore \tau_{XY} = \frac{-4\alpha(M\sigma_Y - \alpha\tau_{XY})}{2(M^2 + \alpha^2)}$$

$$\tau_{XY} = \frac{-2\alpha(M\sigma_Y - \alpha\tau_{XY})}{M^2 + \alpha^2} \quad \dots (3.6)$$

$$\text{PERO : } \frac{2(M\sigma_Y - \alpha\tau_{XY})}{M^2 + \alpha^2} = \sigma_B \Rightarrow \dots (3.4)$$

$$\tau_{XY} = -\alpha\sigma_B$$

$$\text{FINALMENTE ; } \alpha = \frac{-\tau_{XY}}{\sigma_B} \quad \dots (3.7)$$

SUSTITUYENDO ESTA EXPRESION EN  $\sigma_B$  TENEMOS :

$$\sigma_{BMAX} = \frac{2(M\sigma_Y + \frac{\tau_{XY}}{\sigma_B}\tau_{XY})}{M^2 + \frac{\tau_{XY}^2}{\sigma_B^2}}$$

$$\sigma_{BMAX} = \frac{2(M\sigma_Y + \frac{\tau_{XY}^2}{\sigma_B})}{M^2 + \frac{\tau_{XY}^2}{\sigma_B^2}}$$

MULTIPLICANDO NUMERADOR Y DENOMINADOR POR  $\sigma_B^2$

$$\sigma_{BMAX} = \frac{2\sigma_B^2(M\sigma_Y + \tau_{XY}^2/\sigma_B)}{M^2\sigma_B^2 + \tau_{XY}^2} \quad \dots 3.8$$

CRITERIO DE JOISEL. ESTE CRITERIO TAMBIEN CONSIDERA COMO EN EL CASO DE GRIFFITH, QUE LA ROCA TIENE DISCONTINUIDADES. PARA EL ESTUDIO SE SUPONE QUE LA DISCONTINUIDAD ES PERPENDICULAR AL ESFUERZO NORMAL  $\sigma_1$ . SI LA GRIETA ES MUY GRANDE, ESTA NO SE CERRARA ANTE EL ESFUERZO  $\sigma_1$  POR LO QUE SU TRANSMISION DEBERA HACERSE POR MEDIO DE UN ESFUERZO CORTANTE PARALELO AL ESFUERZO  $\sigma_1$  (FIG. 3.3).

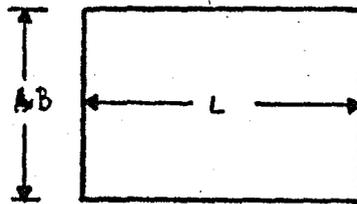
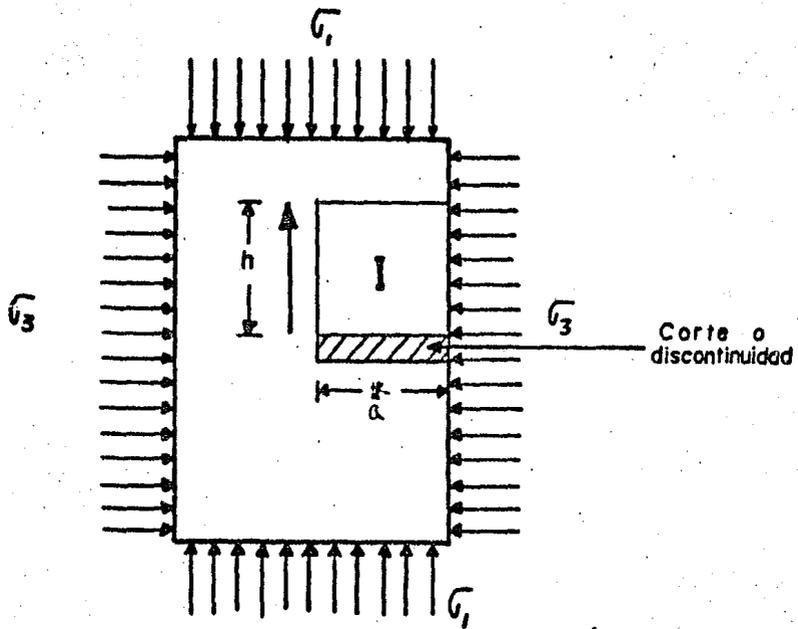
POR EQUILIBRIO EN LA ZONA ASHURADA TENEMOS :

$$\sigma_{AB} = \tau HB \quad (3.9)$$

$$\text{SI} \quad \frac{cH}{B} < R_c \quad (3.10)$$

DONDE :  
 C : COHESION DEL MATERIAL.  
 H : LONGITUD DONDE SE GENERA EL ESFUERZO CORTANTE.  
 $R_c$  : RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE DEL MATERIAL.

ENTONCES EL MATERIAL FALLARA POR ESFUERZO CORTANTE. SE HA ENCONTRADO QUE SEGUN PRUEBAS FOTOELASTICAS CON DIFERENTES RANURAS O DISCONTINUIDADES  $H \pm B$ , EN ESTAS CONDICIONES LA EXPRESION 3.10 QUEDARA COMO SIGUE  $c < R_c$  QUIERE DECIR ESTO QUE SI LA COHESION DE LA ROCA ES MENOR QUE SU RESISTENCIA A LA COMPRESION, EL MATERIAL FALLARA SEGUN PLANOS VERTICALES, TAL COMO SE MENCIONO AL



- $\sigma_1$  = esfuerzo normal
- $\sigma_3$  = esfuerzo de confinamiento
- $\tau$  = resistencia al esfuerzo cortante

Figura. Nº 3.3

PRINCIPIO DE ESTE CAPITULO CUANDO NOS REFERIMOS -  
A LAS FALLAS DE TIPO FRAGIL.

CRITERIO DE COULOMB. EMPIRICAMENTE, LA RESISTEN-  
CIA A CORTANTE  $S$  DE UN SUELO COHESIVO (ARCILLA O  
LIMO) O UNA ROCA VARIA EN FORMA PROPORCIONAL AL -  
ESFUERZO NORMAL  $\sigma_N$ , EL ESFUERZO DE RUPTURA DE A  
CUERDO A LA CLASICA LEY DE COULOMB SE PUEDE ESCRI-  
BIR COMO SIGUE :

$$S = \tau = \sigma_N \text{ TANG } \emptyset + C \quad (3.11)$$

DONDE :  $\tau$  : ESFUERZO CORTANTE  
 $\emptyset$  : ANGULO DE FRICCION INTERNA  
 $C$  : COHESION DEL MATERIAL

COMO  $\emptyset$  Y  $C$  SON CONSTANTES PARA UN MATERIAL DADO -  
ENTONCES LA EXPRESION 3.11 ES UNA RECTA CON ORDE-  
NADA AL ORIGEN  $C$  Y PENDIENTE IGUAL A  $\text{TANG } \emptyset$  A LA  
QUE SE LE CONOCE COMO LA LINEA DE RESISTENCIA A -  
CORTANTE DE COULOMB, FIGURA 3.4.

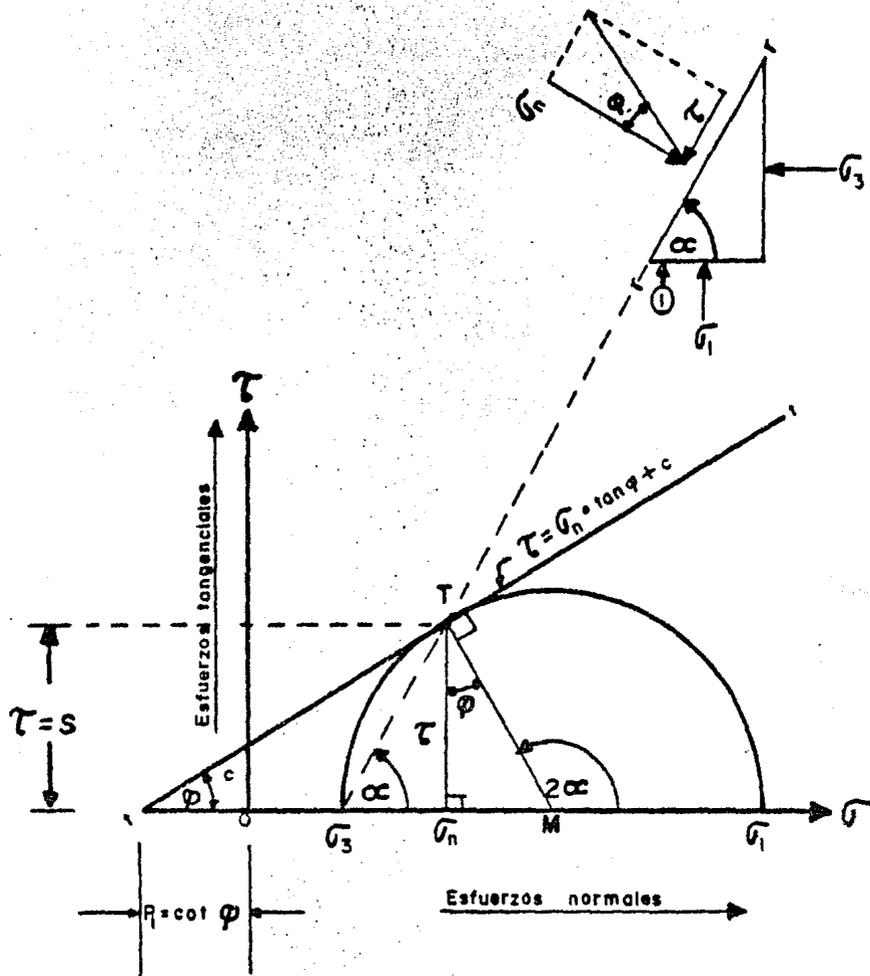
SI LA COHESION ES NULA ENTONCES LA LEY DE RESIS-  
TENCIA SERA SIMPLEMENTE,

$$\tau = \sigma_N \text{ TANG } \emptyset \quad (3.11')$$

Y LA RECTA DE RESISTENCIA PASARA POR EL ORIGEN --  
DEL SISTEMA DE COORDENADAS, FIGURA 3.5.

DE LA FIGURA (3.5) EL ESFUERZO NORMAL  $\sigma_N$  ASOCIA-  
DO AL PLANO DE RUPTURA SE PUEDE CALCULAR CON LA -  
SIGUIENTE EXPRESION :

$$\sigma_N = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \quad (3.12)$$



COULOMB— : Criterio de falla (caso general)

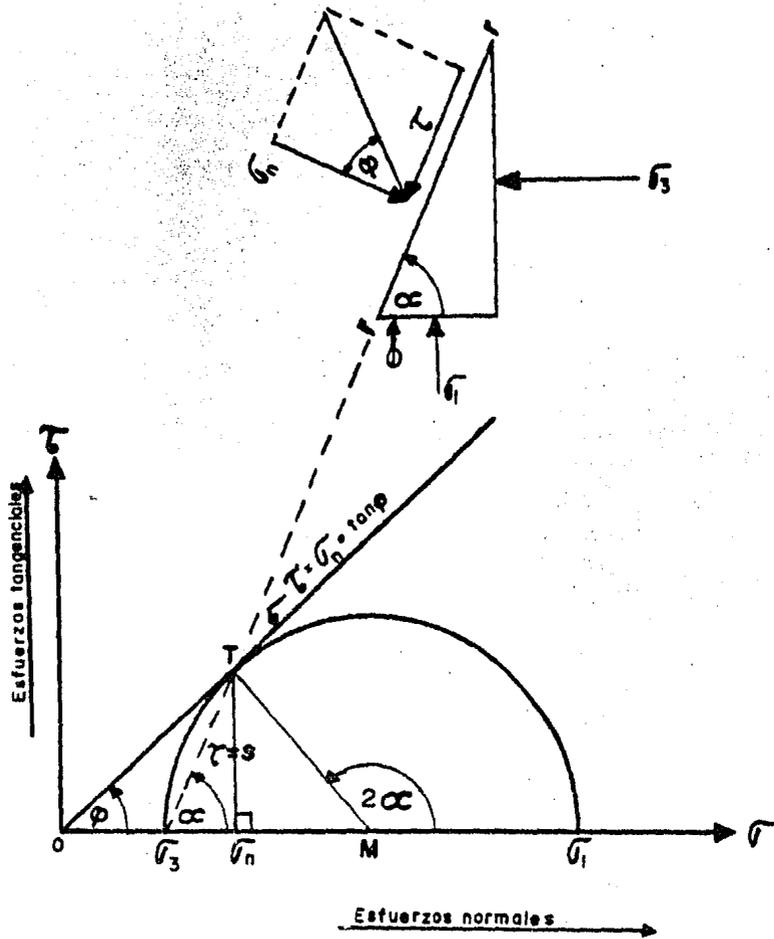
r-r: Falla plana hasta la rotura

t-t: Línea de esfuerzos tangenciales de COULOMB'S, tangente al círculo

r-r: Diámetro del círculo de esfuerzos de MOHR'S

T-S: Esfuerzos tangenciales

Figura N°3.4



COULOMB- : Criterio de falla cuando  $c=0$

Figura N° 3.5

$\sigma_1 > \sigma_3$  y  $\sigma_1, \sigma_3$  ESFUERZOS PRINCIPALES.

$\alpha$  ES EL ANGULO DEL PLANO DE RUPTURA RESPECTO AL PLANO DE ESFUERZOS PRINCIPALES,

EL ESFUERZO CORTANTE EN EL PLANO DE RUPTURA ES :

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \text{SEN } 2\alpha \quad (3.12)$$

CUANDO  $\theta = 0$  FIG. 3.6 LA ECUACION

$$\tau = \sigma_N \text{TANG } \theta + C, \text{ SE REDUCE A :}$$

$$\tau = C, \text{ POR OTRO LADO SI } \theta = 0 \Rightarrow \alpha = 45^\circ$$

$$\therefore \tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \text{SEN } 90^\circ \Rightarrow$$

FINALMENTE SI  $\theta = 0 =$

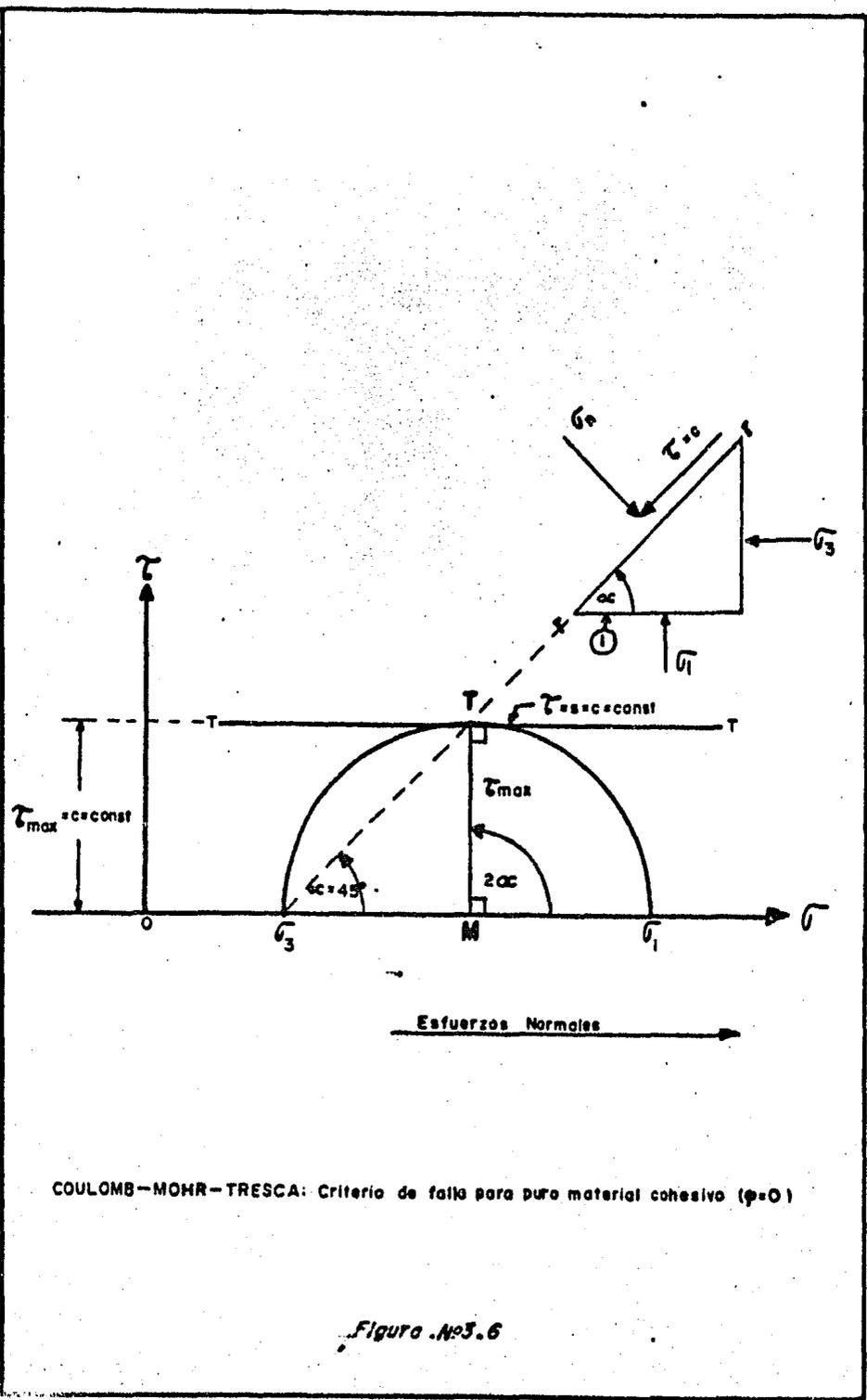
$$\tau = C = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \text{CTE} \quad (3.13)$$

COMO SE VERA MAS ADELANTE EL CRITERIO DE TRESCA - ES UN CASO ESPECIAL DEL CRITERIO DE COULOMB PARA  $\theta = 0$ .

ADEMAS CUANDO  $\sigma_3 = 0$  (EL MENOR ESFUERZO PRINCIPAL ES NULO) Y  $\theta = 0$  ENTONCES :

$$\tau = \tau = C = \frac{\sigma_1}{2} \quad (3.14)$$

ES DECIR, LA RESISTENCIA A CORTANTE DE UN MATE-



COULOMB-MOHR-TRESCA: Criterio de falla para puro material cohesivo ( $\phi=0$ )

Figura No3.6

RIAL PURAMENTE COHESIVO ES IGUAL A UN MEDIO DE SU RESISTENCIA A COMPRESION.

EL CRITERIO DE COULOMB PUEDE ESCRIBIRSE TAMBIEN - PARTIENDO DE LA FIGURA (3.4) Y EN TERMINOS DE LOS ESFUERZOS PRINCIPALES DE LA SIGUIENTE MANERA:

COMO  $\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$  ES LA ABCISA DEL CENTRO DEL CIRCULO Y  $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$  EL RADIO Y  $P_1$  LA ABCISA AL --

ORIGEN. PODEMOS ESCRIBIR

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

$$\text{SEN } \theta = \frac{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}}{P_1 + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}} =$$

$$\text{SEN } \theta = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2P_1 + \sigma_1 + \sigma_3} \quad (3.15)$$

DE LA MISMA FIGURA SE DESPRENDE QUE,

$$2 \alpha = 90^\circ + \theta =$$

$\alpha = 45^\circ + \theta/2$  LO QUE SIGNIFICA QUE TEORICAMENTE LA FALLA POR CORTANTE TOMA LUGAR EN PLANOS CON UN ANGULO  $\alpha = 45^\circ + \frac{\theta}{2}$  REFERIDO AL PLA-

NO DEL MAYOR ESFUERZO PRINCIPAL, EN EL CASO DE UN MATERIAL PURAMENTE COHESIVO EL PLANO DE RUPTURA -

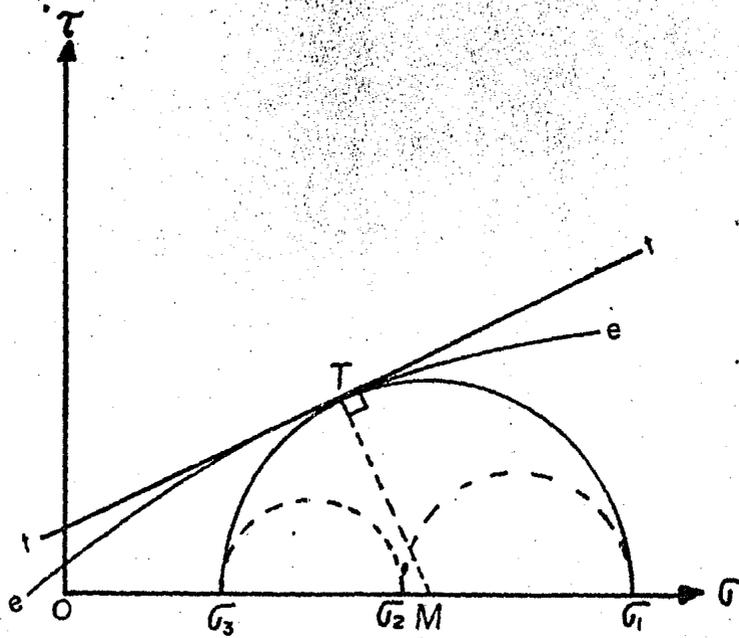
INTERSECTA A LA LINEA DE ACCION DE LA CARGA AXIAL A  $45^{\circ}$ ; EN REALIDAD, EL ANGULO  $\alpha$  VARIA DE UN TIPO A OTRO DE ROCA.

A PESAR DE QUE ESTE CRITERIO (EL DE LA LINEA DE FALLA ES COULOMB) ES MUY AMPLIAMENTE USADO PARA PREDECIR LA FALLA EN ROCAS, DEBE DECIRSE QUE NO REPRESENTA EXACTAMENTE LA ENVOLVENTE A LOS CIRCULOS DE MOHR DE MUCHAS ROCAS.

CRITERIO DE MOHR. ESTE CRITERIO CONSIDERA LA EXISTENCIA DE UNA ENVOLVENTE DE FALLA POR CORTANTE, LA CUAL PUEDE ESTAR REPRESENTADA POR UNA LINEA RECTA O MAS GENERALMENTE POR UNA CURVA. SI LA ENVOLVENTE DE FALLA ES UNA LINEA RECTA, ENTONCES EL CRITERIO DE MOHR ES IDENTICO AL CRITERIO DE COULOMB. SI LA ENVOLVENTE DE FALLA ES UNA CURVA, SIGNIFICARA QUE LA RESISTENCIA DEL MATERIAL VARIO AL VARIAR EL ESFUERZO  $\sigma_3$  (ESFUERZO DE COMPRESION), LO QUE OCASIONARA UNA NO LINEALIDAD EN LA ENVOLVENTE DE FALLA.

EL CRITERIO EN CUESTION DICE QUE UN MATERIAL SE FRACTURA CUANDO EL ESFUERZO CORTANTE EN EL PLANO DE RUPTURA SE INCREMENTA A UN VALOR EL CUAL DEPENDE DEL ESFUERZO NORMAL  $\sigma_N$  EN EL PLANO DE RUPTURA POR CORTANTE.

EN LA FIGURA (3.7) QUE REPRESENTA UN CIRCULO DE MOHR PARA ESFUERZOS, SE PUEDE VER QUE LA FALLA OCURRE CUANDO EL DIAMETRO ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) DE DICHO CIRCULO ES TAL QUE HACE TANGENTE A ESTE CON LA ENVOLVENTE DE FALLA E-E. TAMBIEN PODEMOS OBSERVAR QUE EL ESFUERZO  $\sigma_2$  NO TIENE INFLUENCIA EN LA FALLA, SOLO EL MAYOR Y EL MENOR DE LOS ESFUERZOS PRINCIPALES TIENEN UN PAPEL ACTIVO EN EL



Línea de resistencia (t-t) y envolvente curvilínea en el criterio de falla de MOHR

Figura N°3.7

MECANISMO DE FALLA. CABE HACER NOTAR QUE LA ENVOLVENTE DE FALLA EN ESTE CRITERIO NO ES UNA GRAFICA QUE PUEDA REPRESENTARSE POR UNA EXPRESION MATEMATICA, PERO SI PUEDE OBTENERSE EXPERIMENTALMENTE. ESTA ENVOLVENTE SE DIBUJA TANGENTE A VARIOS CIRCULOS DE UN GRUPO DE ENSAYES, COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA (3.8).

EL CRITERIO DE FALLA DE MOHR ESPECIFICA EN UNA ESCALA MACROSCOPICA NO SOLO EL ESTADO DE ESFUERZOS EN EL MOMENTO DE LA FALLA SINO TAMBIEN LA DIRECCION DEL PLANO EN QUE OCURRE. DE CUALQUIER MANERA MOHR Y COULOMB NO CONSIDERAN QUE LA CAUSA DE LA FALLA TENGA SUS BASES EN LAS PROPIEDADES MICROSCOPICAS O INTERNAS DEL MATERIAL.

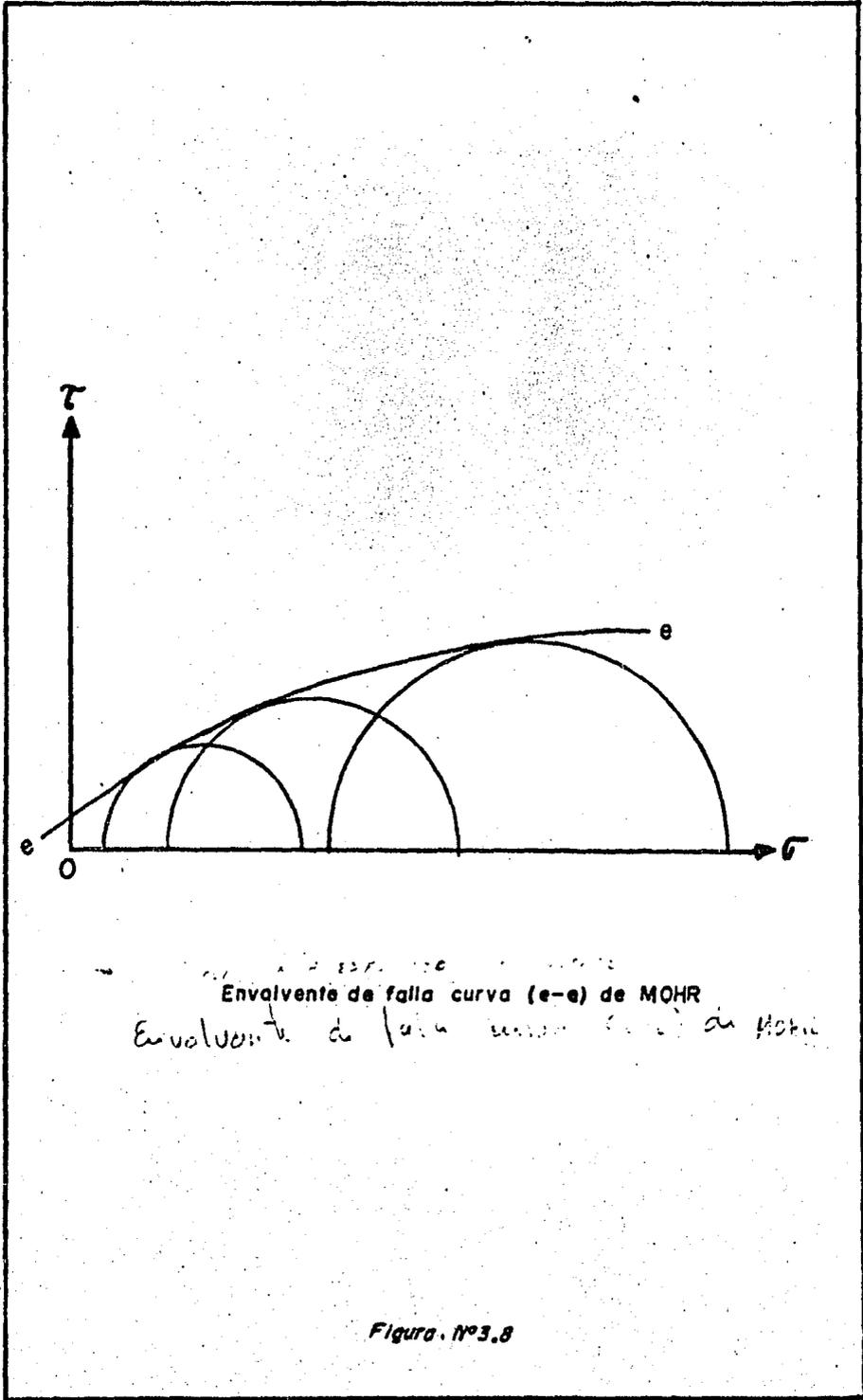
CRITERIO DE MOHR-COULOMB. COMO YA SE MENCIONO ESTE TIPO DE FALLA OCURRE CUANDO EXISTEN ESFUERZOS CONFINANTES ( $\sigma_3$ ) DE MAGNITUD CONSIDERABLE RESPECTO A LA COHESION (c) DEL MATERIAL. PARA EL ANALISIS DE ESTE MECANISMO DE FALLA SE CONSIDERA LA EXISTENCIA DE UNA DISCONTINUIDAD PERPENDICULAR AL ESFUERZO  $\sigma_1$ , COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA (3.3).

DE ACUERDO A LA ESTATICA PODEMOS ESCRIBIR LO SIGUIENTE :

$$\text{DE } \sum F_y = 0 \Rightarrow \sigma_1 AB = Z_H B \dots (3.9)$$

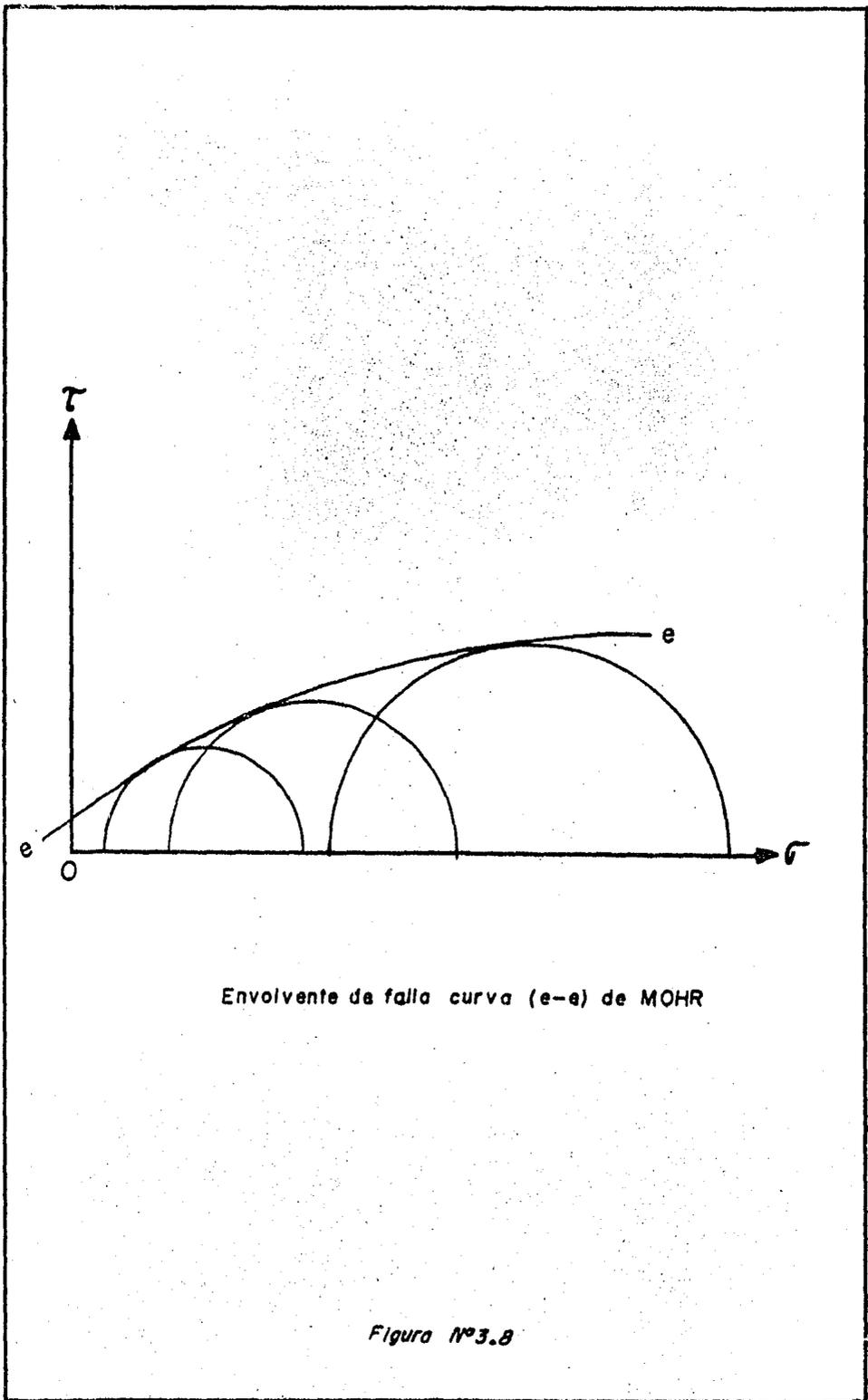
$$\text{POR LO TANTO } \sigma_1 = \frac{Z_H}{A} \dots (3.16)$$

EN ESTE CASO  $Z$  ES LA RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE DEL MATERIAL, QUE SE PUEDE CALCULAR DE LA SIGUIENTE MANERA :



Envolvente de falla curva (e-e) de MOHR  
Envolvente de falla curva (e-e) de Mohr

Figura. Nº3.8



Envolvente da falla curva (e-e) de MOHR

Figura Nº3.8

$$\tau = c + \sigma_3 \operatorname{tg} \theta_v \quad \dots \quad (3.11')$$

DONDE  $\theta_v =$  ANGULO DE FRICCIÓN INTERNA EN EL PLANO VERTICAL DE LA MUESTRA.

COMBINANDO LAS EXPRESIONES ANTES MENCIONADAS TENEMOS QUE :

$$\sigma_1 = (c + \sigma_3 \operatorname{tg} \theta_v) \frac{H}{A} \quad (3.17)$$

SI  $c + \sigma_3 \operatorname{tg} \theta_v < c + \sigma_3 \operatorname{tg} \theta$  EL MATERIAL FALLA EN EL PLANO VERTICAL CON UNA FALLA FRÁGIL

SI  $c + \sigma_3 \operatorname{tg} \theta_v = c - \sigma_3 \operatorname{tg} \theta$  EL MATERIAL FALLA SEGUN EL CRITERIO DE MORH-COULOMB.

SI  $c + \sigma_3 \operatorname{tg} \theta_v > c + \sigma_3 \operatorname{tg} \theta$  EL MATERIAL FALLA EN UN PLANO QUE NO ES EL AC, YA QUE ESTE NO SERA EL MAS DEBIL, SINO QUE HABRA OTROS PLANOS INCLINADOS DONDE OCURRIRA LA FALLA CON ANTERIORIDAD.

TODO ESTO PODEMOS REPRESENTARLO GRAFICAMENTE COMO SE VE EN LA FIGURA 3.9.

CRITERIO DE TRESCA. ORIGINALMENTE ESTE CRITERIO FUE ENUNCIADO PARA EL CASO DE MATERIALES DUCTILES E ISOTROPICOS, Y SE EXPRESA EN FUNCION DE LOS ESFUERZOS PRINCIPALES  $\sigma_1$  Y  $\sigma_3$ . DE ACUERDO CON ESTE CRITERIO SE CONSIDERA QUE EL MATERIAL

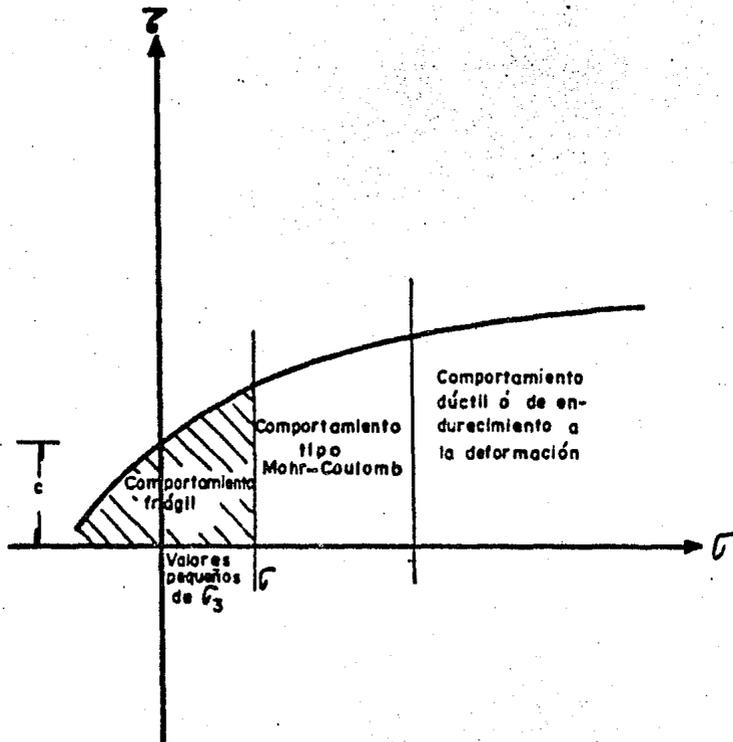


Figura N° 3.9

FALLA CUANDO EL MAXIMO ESFUERZO CORTANTE  $\tau_{\text{MAX}}$  - ES IGUAL A LA RESISTENCIA A CORTANTE DEL MATERIAL, ASI, PODEMOS EXPRESARLO DE LA SIGUIENTE MANERA :

$$S = \tau_{\text{MAX}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad \dots \quad (3.13)$$

SE OBSERVA QUE DE ACUERDO AL CRITERIO DE TRESCA - SE CAE EN EL CASO PARTICULAR DEL CRITERIO DE COULOMB PARA EL QUE  $\phi = 0$  POR LO TANTO PODEMOS DECIR QUE TRESCA CONSIDERA QUE :

$$S = \tau_{\text{MAX}} = C = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \text{CTE.} \quad \dots \quad (3.13)$$

VEASE LA FIGURA (3.6).

### 3.3 PRUEBAS DE RESISTENCIA "IN-SITU".

RESISTENCIA. YA SE HA DICHO QUE LA RESISTENCIA - DE UN MATERIAL, ES LA CAPACIDAD QUE TIENE PARA RESISTIR FUERZAS EXTERNAS. ES COMUN QUE PARA DETERMINAR ESTA RESISTENCIA SE EFECTUEN PRUEBAS SOBRE MUESTRAS DEL MATERIAL EN CUESTION, PARA ESTO SE APLICAN FUERZAS DE TAL MANERA QUE EL MATERIAL COLAPSE, COMO DICHAS FUERZAS SON APLICADAS SOBRE UNA AREA DETERMINADA SE TIENE FINALMENTE QUE LA RESISTENCIA SE EXPRESA EN FUERZA POR UNIDAD DE AREA. AHORA BIEN EL VALOR ASI DETERMINADO ES MUY RELATIVO YA QUE SON MUCHOS LOS FACTORES QUE INFLUYEN EL PROCESO; ALGUNOS DE ELLOS SON :

- TAMAÑO DE LA MUESTRA O PROBETA.
- TIPO DE ROCA.
- INTENSIDAD Y DURACION DE LA CARGA.

- PRESION DE CONFINAMIENTO.
- TEMPERATURA
- AGUA INTERSTICIAL Y PRESION DE PORO.
- OTROS.

AUNQUE COMO YA SE DIJO ES COMUN DETERMINAR LA RESISTENCIA A BASE DE PRUEBAS DE LABORATORIO, TAMBIEN ES POSIBLE DETERMINAR DICHO PARAMETRO CON PRUEBAS DE CAMPO. LAS PRUEBAS DE CAMPO SE EJECUTAN PORQUE UNA ROCA PUEDE CONTENER VARIOS TIPOS DE DEFECTOS Y PLANOS DE DEBILIDAD.

UN SOLIDO PERFECTAMENTE ELASTICO ES UN MATERIAL CIERTAMENTE IDEAL, AL CUAL RARA VEZ ES POSIBLE APROXIMARSE, LA ROCA NO ES LA EXCEPCION, POR LO TANTO, PARA PROPOSITOS DE DISEÑO EN ROCA, ES NECESARIO INCLUIR VALORES REPRESENTATIVOS DE LAS PROPIEDADES DE LA ROCA IN-SITU.

MIENTRAS QUE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO PROPORCIONAN LAS PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS DE LA ROCA INTACTA A PARTIR DE ESPECIMENES RELATIVAMENTE PEQUEÑOS, LOS CUALES OBVIAMENTE NO PRESENTAN LOS DEFECTOS ESTRUCTURALES DE LA MASA DE LA ROCA, Y OCASIONALMENTE DARAN UNA IDEA DEL COMPORTAMIENTO DE LA MISMA. LAS PRUEBAS DE ROCA IN-SITU APROPIADAS PARA EVALUAR EL CAMPO DE ESFUERZOS Y EL COMPORTAMIENTO MECANICO DE LA MASA DE ROCA BAJO EL EFECTO DE CARGAS.

LA RESISTENCIA DE LA ROCA IN-SITU DEPENDE COMO YA SE MENCIONO, DE VARIOS FACTORES, PRIMERAMENTE DE LA AMPLITUD DE AREA Y MAGNITUD DE LOS ESFUERZOS EXISTENTES EN ELLA APLICADOS, ASI LAS PROPIEDADES DE RESISTENCIA DE UNA ROCA COMO SE OBTIENEN EN LA

BORATORIO DIFIEREN DE LAS QUE SON EVALUADAS IN-SITU POR LO SIGUIENTE :

- 1.- IN-SITU, LA ROCA ES CONFINADA EN ALGO DE SU EXTENSION. ÉSTO SIGNIFICA QUE AL PRINCIPIO DE LOS TRABAJOS, LA CONDICION DE ESFUERZOS DIFIERE GRANDEMENTE DE LA QUE PREVALECE EN EL ESPECIMEN QUE SE ENSAYE EN EL LABORATORIO.
- 2.- IN-SITU, LA MASA DE ROCA CONTIENE VARIOS TIPOS DE DEFECTOS.
- 3.- IN-SITU, LA MASA DE ROCA ESTA EXPUESTA A VARIOS FACTORES AMBIENTALES (TEMPERATURA, AGUA, ETC.) QUE NO NECESARIAMENTE SE TOMAN EN CUENTA EN EL LABORATORIO DURANTE LA PRUEBA.

SE HA MENCIONADO A LA RESISTENCIA DE LA ROCA EN MUCHAS OCASIONES, HACE FALTA ASOCIAR A DICHA PALABRA (RESISTENCIA) OTRA QUE DEFINA A QUE TIPO DE ACCION CORRESPONDE DICHA RESISTENCIA. EN CAMPO ES COMUN MEDIR LA RESISTENCIA A LAS SIGUIENTES ACCIONES :

- COMPRESION.
- TENSION.
- CORTANTE.

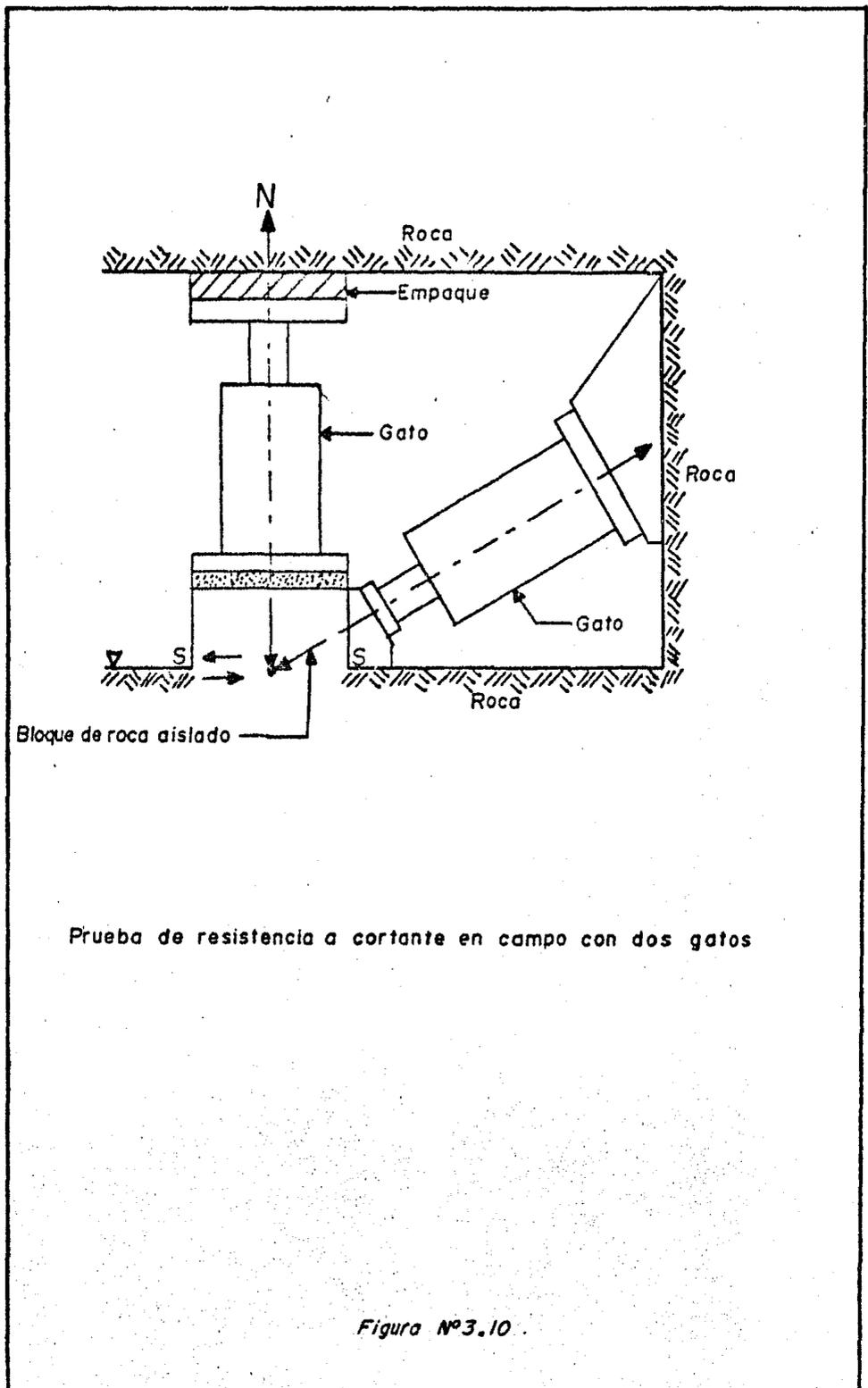
DE LAS PRUEBAS MENCIONADAS ES LA RESISTENCIA A CORTANTE LA QUE MAS FRECUENTEMENTE SE LLEVA A CABO, LAS PRUEBAS DE TENSION Y COMPRESION SON RARAMENTE EFECTUADAS. LA PRUEBA DE COMPRESION ES DIFICIL EFECTUARLA EN CAMPO DEBIDO AL TAMAÑO DE LOS EQUIPOS QUE SON NECESARIOS. LA PRUEBA DE TENSION NO SE REALIZA CON FRECUENCIA POR LO SIGUIENTE :

CUALQUIER ROCA EN SU ESTADO NATURAL PRESENTA FISURAS JUNTAS Y OTROS DEFECTOS ESTRUCTURALES, LOS QUE BAJO LA ACCION DE ESFUERZOS DE COMPRESION TIENEN GENERALMENTE UN COMPORTAMIENTO ACEPTABLE, NO ASI CUANDO LOS ESFUERZOS SON DE TENSION. POR LO TANTO, DESDE ESTE PUNTO DE VISTA LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA TENSION IN-SITU NO ES DE GRAN IMPORTANCIA, EXCEPTO EN TECHOS DE TUNELES, EN MATERIALES ESTRATIFICADOS O EN TALUDES EN LOS QUE EXISTEN DISCONTINUIDADES Y EN LOS QUE LA INCLINACION PUEDA PROVOCAR TENSIONES Y ASI HACER FALLAR EL TALUD.

PRUEBAS DE RESISTENCIA A CORTANTE IN-SITU. BASICAMENTE EXISTEN DOS MODALIDADES PARA LA REALIZACION DE LA PRUEBA :

- CON GATOS HIDRAULICOS.
- CON TORCOMETRO.
- CON GATOS HIDRAULICOS. PARA ESTE TIPO DE ENSAYE ES NECESARIO LABRAR UNA PROBETA EN LA ROCA DENTRO DE UN SOCAVON. LA PRUEBA SE PUEDE REALIZAR CON UNO O CON DOS GATOS. CUANDO SE REALIZA CON DOS GATOS, CON UNO SE APLICA UNA CARGA NORMAL Y CON EL OTRO UNA CARGA OBLICUA. LA CARGA NORMAL SE MANTIENE CONSTANTE DURANTE LA PRUEBA; LA CARGA OBLICUA SE VA INCREMENTANDO HASTA QUE SE LLEGA A LA FALLA DE LA PROBETA VER FIGURA (3.10). DURANTE LA PRUEBA SE VAN REGISTRANDO LAS DEFORMACIONES QUE EXPERIMENTA LA PROBETA LO CUAL ES MUY UTIL PARA ESTUDIOS DE DEFORMABILIDAD, COMO SE VERA MAS ADELANTE.

ESTE TIPO DE PRUEBA DA UNA IDEA DE LA MAGNITUD DEL ANGULO  $\theta$  DE LA RESISTENCIA A CORTANTE DE LA



Prueba de resistencia a cortante en campo con dos gatos

Figura Nº3.10 .

ROCA; POR OTRO LADO, SE CONSIDERA QUE LA ROCA ES GOBERNADA POR EL CRITERIO DE COULOMB, ASI:

$$S = \sigma_N \cdot \text{TANG } \theta + C \quad . . . \quad (3.11)$$

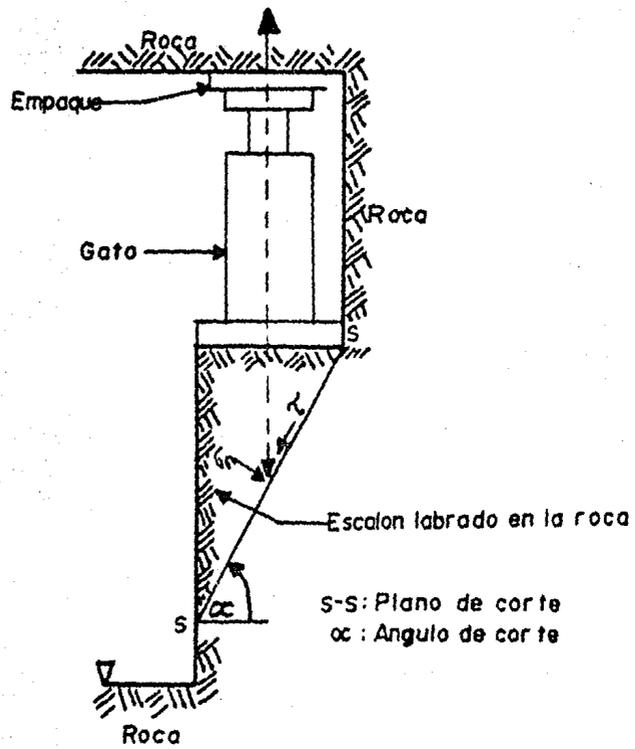
LOS TERMINOS FUERON DEFINIDOS EN LA PARTE CORRESPONDIENTE A CRITERIOS DE FALLA. COMO LA RESISTENCIA  $S$  DEPENDE DE DOS PARAMETROS  $\theta$  Y  $C$ , SE HACE NECESARIO REALIZAR VARIAS PRUEBAS, LAS QUE GENERALMENTE SE REALIZAN SOBRE PROBETAS DE DISTINTOS TAMAÑOS.

ESTA PRUEBA DEPENDIENDO DE LAS NECESIDADES PROPIAS DEL PROYECTO, PUEDE SER REALIZADA EN PLANOS PREVIAMENTE SELECCIONADOS, TALES COMO ESTRATIFICACIONES, JUNTAS, FALLAS, ETC. EN ESOS PLANOS DE DEBILIDAD, LA MENOR RESISTENCIA DE UNA MASA DE ROCA PUEDE SER ASI DETERMINADA.

CUANDO LA PRUEBA SE REALIZA CON UN SOLO GATO EL ARREGLO ES COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA (3.11) - EN LA QUE COMO SE APRECIA CON UN SOLO GATO SE PUEDEN PROVOCAR LOS EFECTOS DE FUERZA NORMAL Y FUERZA CORTANTE.

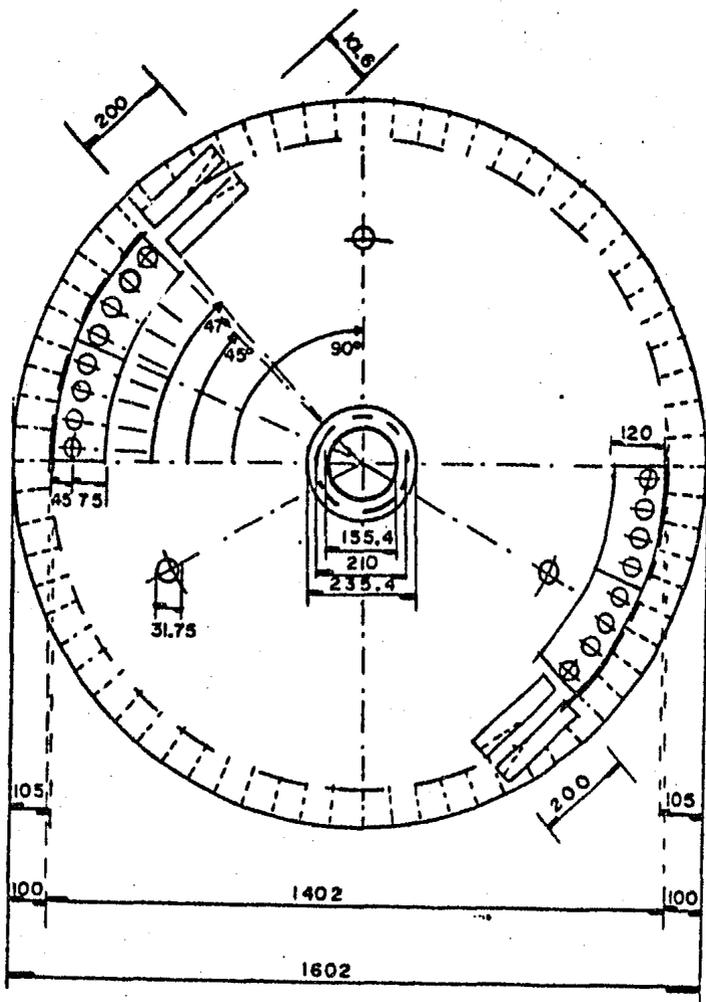
PRUEBA CON TORCOMETRO. EL TORCOMETRO, DESARROLLADO POR MARSAL, CONSISTE DE UN DISCO DE ACERO CON 72 CUCHILLAS DISPUESTAS RADIALMENTE LAS CUALES EN SU TOTALIDAD HACEN UN AREA DE  $0.5 \text{ m}^2$ .

LAS CUCHILLAS ANTES MENCIONADAS SON HINCADAS EN LA ROCA POR MEDIO DE UN GATO QUE SE APOYA CONTRA UNA SUPERFICIE LASTRADA, UNA VEZ HINCADAS LAS CUCHILLAS, SE APLICA UN PAR TORSIONANTE POR MEDIO DE OTROS DOS GATOS APOYADOS CONTRA UN MARCO DE ACERO COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA (3.12).



Prueba de resistencia a cortante en campo con un solo gato

Figura N° 3.11



Escala 1:125  
Anotaciones en mm.

Figura N° 3.12

- OTRO METODO, QUE ES REFERIDO POR (1) CONSISTE EN LABRAR UN CILINDRO DE ROCA, MANTENIENDOLO LIGADO A LA MASA EN SU BASE EL CILINDRO FIGURA -- 3.13 ASI LABRADO ES ASIDO POR EL DISPOSITIVO DE PRUEBA Y TORCIDO. EL ANGULO DE TORSION Y FALLA ES MEDIDO Y REGISTRADO.

LA PRUEBA, PROPORCIONA INFORMACION ACERCA DE -- LOS PARAMETROS C (COHESION),  $\phi$  ANGULO DE FRIC-- CION. ESTA PRUEBA ES LA UNICA QUE, PROVOCA COR-- TANTES EN UNA ROCA SIN LA PRESENCIA DE FUERZAS-- NORMALES.

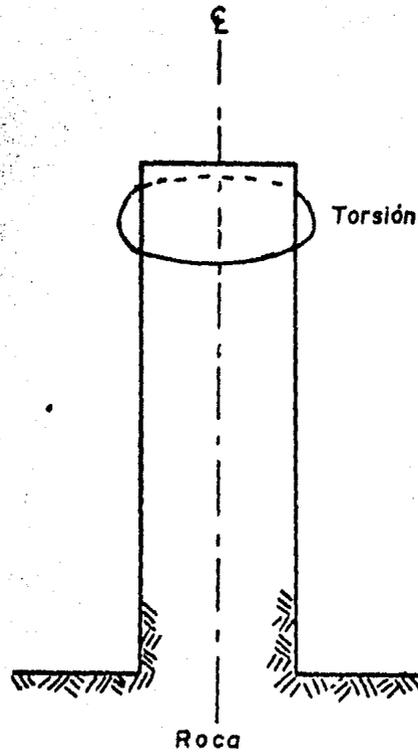
### 3.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS METODOS.

RESPECTO A LAS PRUEBAS DE COMPRESION PODEMOS DE-- CIR QUE LA MAYOR DESVENTAJA RADICA EN QUE AL HA-- CER UNA PROBETA EN CAMPO CUYAS DIMENSIONES SON -- DEL ORDEN DE 50 CM, POR LADO, SE REQUERIA UN EQUI-- PO MUY GRANDE PARA PODER PROPORCIONAR LA CARGA -- QUE HICIERA FALLAR AL ESPECIMEN.

LAS PRUEBAS DE TENSION, YA SE DIJO QUE RARA VEZ - TIENEN SIGNIFICADO EN INGENIERIA CIVIL, OCASIONAL-- MENTE, CUANDO EL TRABAJO ES EN TUNELES CONSTRUI-- DOS EN ROCAS SEDIMENTARIAS EN LOS CUALES PUEDE HA-- BER EFECTOS DE FLEXION EN EL TECHO PUEDE ENTONCES REVESTIR CIERTA IMPORTANCIA, POR ESTO POCO COMUN-- SU REALIZACION.

REFIRIENDONOS A LAS PRUEBAS DE CORTANTE PODEMOS - DECIR QUE LAS QUE SE EFECTUAN CON DOS Y CON UN GA-- TO ENCIERRAN LO SIGUIENTE, LA VENTAJA DE ESTE ME-- TODO RESPECTO AL ANTERIOR RADICA EN LA ECONOMIA - YA QUE EL EQUIPO Y LAS PREPARACIONES SE REDUCEN - CONSIDERABLEMENTE PUES SOLO SE USA UN GATO, COMO

(1) ALFRED JUMIKIS, "ROCK MECHANICS"  
1A. ED. 1979 TRANS TECH PUBLICATIONS.



Principio de la prueba de cortante por torsión en campo

Figura Nº 3.13

DESVENTAJA PODEMOS ANOTAR QUE AL SER UN SOLO ELEMENTO EL QUE PROPORCIONA LAS CARGAS NORMAL Y CORRIENTE ESTAS VARIAN EN FORMA PROPORCIONAL UNA DE LA OTRA ES DECIR, NO SE PUEDEN HACER INDEPENDIENTEMENTE COSA QUE EN EL OTRO METODO SI ES POSIBLE.

LA PRUEBA CON TORCOMETRO POR SU PARTE TIENE LA DESVENTAJA DE QUE SOLO ES POSIBLE ENSAYARLO EN ROCAS SUAVES TALES COMO LUTITAS PARA LAS QUE CONCRETAMENTE FUE DISEÑADO. FINALMENTE EL ULTIMO METODO TIENE LA DESVENTAJA DE QUE EL CILINDRO DEBE SER HECHO CON UNA BROCA DE DIAMANTE QUE DEBE SER LO BASTANTE GRANDE PARA QUE EL CILINDRO SE MANTENGA INTACTO Y NO SE ROMPA, ESTO SOLO ES POSIBLE CON EQUIPOS DE REGULAR TAMAÑO QUE HACE QUE SE ENCAJEN EL COSTO DE LOS TRABAJOS.

OBVIAMENTE EN TODOS LOS METODOS SE TIENE LA GRANDESVENTAJA DE QUE AL HACER UN SOCAVON DONDE REALIZAR LA PRUEBA SE LIBERAN ESFUERZOS QUE PUEDEN SER DETERMINANTES EN LA OBTENCION DE LOS RESULTADOS - YA QUE UNA VEZ QUE SE HA LABRADO LA PROBETA TAMBIEN SE HA ALTERADO EL ENTORNO DE ELLA.

#### 4. DEFORMABILIDAD.

##### 4.1 GENERALIDADES.

EN LA VIDA PRACTICA ES COMUN ENCONTRAR AL MOMENTO DE REALIZAR UN PROYECTO QUE EXISTEN CODIGOS, REGLAMENTOS, ESPECIFICACIONES Y BASES DE PROYECTO A LOS CUALES SE PLEGARA EL DESARROLLO DEL MISMO.

ESTOS REGLAMENTOS DAN POR EJEMPLO, LAS DIMENSIONES MINIMAS QUE UN CIERTO ELEMENTO DEBE TENER; TAMBIEN, PUEDEN LIMITAR A UN MINIMO DE CALIDAD DEL MATERIAL, O EL MINIMO DE ACERO DE REFUERZO QUE SE DEBE SUMINISTRAR, ETC. A PRIMERA VISTA PODRIA PARECER QUE LOS REGLAMENTOS SON DOCUMENTOS DE MINIMOS PERO NO ES ASI, UNA DE LAS COSAS QUE LOS REGLAMENTOS LIMITAN A UN MAXIMO SON LAS DEFORMACIONES, EN OCASIONES SE LIMITAN POR ESTETICA, TAL ES EL CASO DE LAS LOSAS Y TRABES, EN OTRAS OCASIONES LA LIMITACION OBEDECE A LA NECESIDAD DE GARANTIZAR LA ESTABILIDAD DE UNA ESTRUCTURA YA QUE POR EJEMPLO UNA DEFORMACION MUY GRANDE PUEDEN INDUCIRSE ESFUERZOS MUCHOS MAYORES A LOS PREVISTOS. EN OTRAS OCASIONES, LAS DEFORMACIONES SON LIMITADAS POR EFECTOS DE OPERACION, PUES EXISTEN EQUIPOS QUE AL EXPERIMENTAR DEFORMACIONES MUY GRANDES EN SUS APOYOS SE PUEDE ALTERAR GRANDEMENTE SU FUNCIONAMIENTO. ASI, PODEMOS SEGUIR DANDO EJEMPLOS EN LOS QUE LAS DEFORMACIONES FUERAN LIMITADAS A UN MAXIMO.

VOLVIENDO NUEVAMENTE A LOS REGLAMENTOS ES DIFICIL DAR LIMITACIONES PARA LAS DEFORMACIONES EN ROCAS, YA QUE AUN EN UN MISMO TIPO DE ROCA EL COMPORTAMIENTO DE ELLA EN DISTINTAS CONDICIONES, ES MUY VARIABLE, POR LO QUE NO ES POSIBLE ENMARCAR DEN--

TRO DE UN REGLAMENTO A LOS TRABAJOS EN ROCA EN LO REFERENTE A DEFORMACIONES.

LO ANTERIOR INDICA QUE LA EXPERIENCIA DEL PROYECTISTA Y LA CALIDAD DEL ESTUDIO DE MECANICA DE ROCAS SON FUNDAMENTALES EN EL DESARROLLO DE LOS PROYECTOS EN LOS QUE LA ROCA PARTICIPE DE MANERA SIGNIFICATIVA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCION Y/O COMO MATERIAL DE APOYO PARA ESTRUCTURAS.

DEFORMABILIDAD. SE ENTIENDE POR DEFORMABILIDAD - LA CAPACIDAD QUE UNA ROCA POSEE PARA DEFORMARSE - POR LA APLICACION DE CARGAS O DESCARGAS.

#### 4.2 FACTORES QUE AFECTAN LA DEFORMABILIDAD DE LA ROCA.

LA ROCA EN CUALQUIER CIRCUNSTANCIA PUEDE EXPERIMENTAR DEFORMACIONES, PUES LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN SU APARICION SON MUY VARIADOS Y SI EN UN MOMENTO NO EXISTEN ALGUNOS, SI PUEDEN ESTAR PRESENTES OTROS. LOS FACTORES SE MENCIONAN CLASIFICANDOSE EN DOS GRANDES GRUPOS A SABER :

- FACTORES INTERNOS.
- FACTORES EXTERNOS.

LOS FACTORES INTERNOS SON AQUELLOS INHERENTES A LA ROCA MISMA YQUE, DE UNA MANERA U OTRA INFLUYEN EN EL PROBLEMA; DE ESTOS FACTORES PODEMOS HACER LA SIGUIENTE LISTA :

- 1.- TIPO DE ROCA.
- 2.- TIPO DE MINERALES QUE LA CONSTITUYEN.
- 3.- GRADO DE ALTERACION.

#### 4.- CLIVAJE.

LOS FACTORES EXTERNOS SON EN NUMERO MUCHO MAYORES QUE LOS INTERNOS, LO QUE NOS LLEVA A HACER OTRA CLASIFICACION DE ESTOS; ASI, PODEMOS AGRUPARLOS DE LA SIGUIENTE MANERA :

- 1.- FACTORES GEOLOGICOS.
- 2.- FACTORES MECANICOS.
- 3.- FACTORES GEOMETRICOS.

LOS FACTORES GEOLOGICOS INCLUYEN COMO SU NOMBRE LO INDICA, TODOS AQUELLOS RAZGOS QUE GEOLOGICAMENTE PRESENTA UN MACIZO ROCOSO TALES COMO :

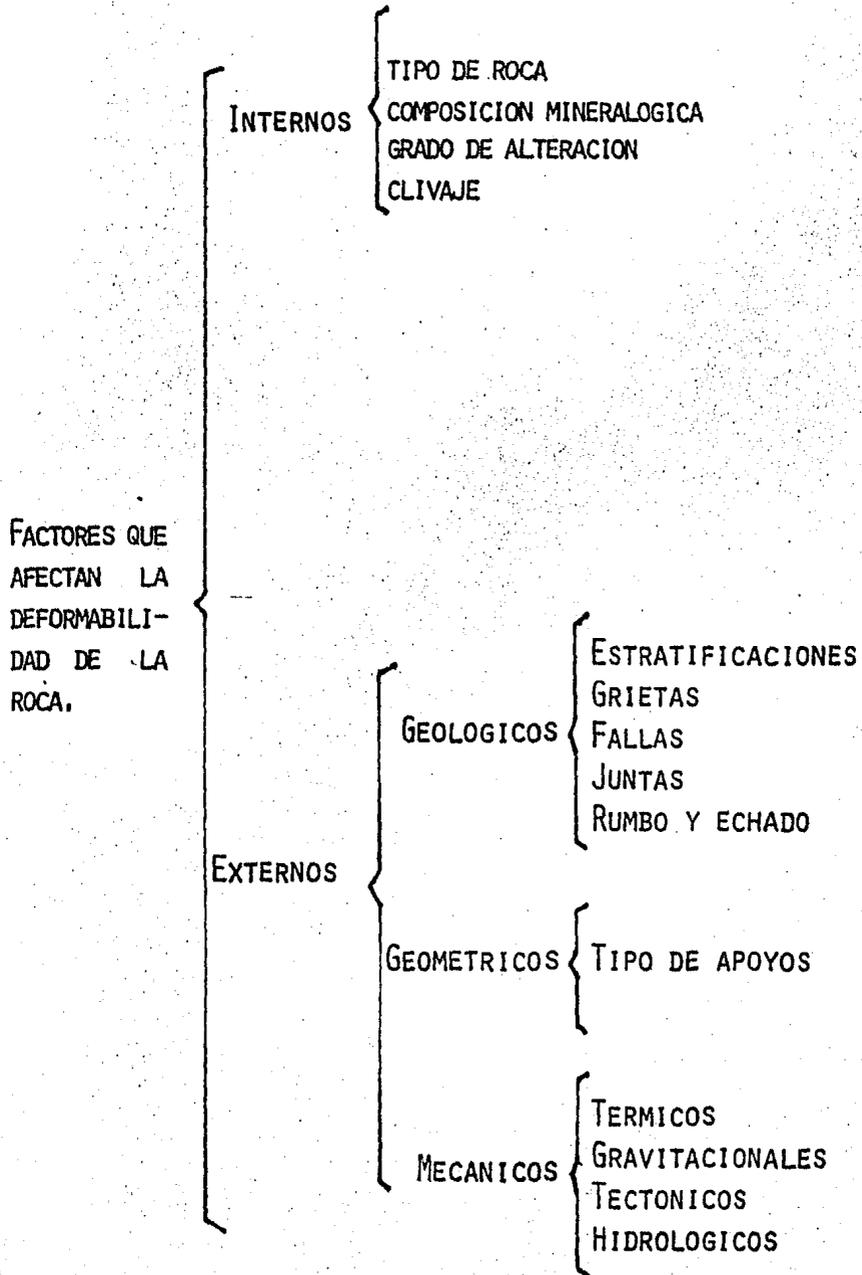
- ESTRATIFICACIONES.
- EDAD.
- GRIETAS.
- FALLAS.
- JUNTAS.
- RUMBO Y ECHADO.

DENTRO DE LOS FACTORES MECANICOS QUEDAN INCLUIDOS TODOS AQUELLOS QUE INDUCEN UN ESTADO DE ESFUERZOS EN LA ROCA, ESTO NOS LLEVA A HACER UNA ULTIMA CLASIFICACION COMO SIGUE :

- TERMICOS.
- GRAVITACIONALES.
- TECTONICOS.
- HIDROLOGICOS.

RESUMIENDO, LOS FACTORES QUE AFECTAN LA DEFORMABI

LIDAD DE LAS ROCAS, LOS PODEMOS REPRESENTAR EN EL SIGUIENTE CUADRO SINOPTICO :



SE HAN MENCIONADO UNA SERIE DE FACTORES QUE AFECTAN LA DEFORMABILIDAD DE LA ROCA, ES NECESARIO -- DISCUTIR LA FORMA EN QUE SE MANIFIESTA DICHAS AFFECTACIONES, VEAMOS.

TIPO DE ROCA. SALTA A LA VISTA QUE ENTRE UNA LUTITA Y UN BASALTO EXISTEN GRANDES DIFERENCIAS, -- MISMAS QUE SE PONEN DE MANIFIESTO AL ENSAYAR UNA PROBETA DE CADA UNO DE LOS MATERIALES, TAMBIEN ES FACIL SOSTENER QUE EL COMPORTAMIENTO (EN LO QUE - TOCA A DEFORMABILIDAD) ENTRE AMBOS MATERIALES ES EN OCASIONES DIAMETRALMENTE OPUESTO.

- COMPOSICION MINERALOGICA. ESTE FACTOR ES MUY - IMPORTANTE DEBIDO A QUE SEGUN SEAN LOS ELEMEN--TOS Y COMPUESTOS QUE INTEGRAN EL MATERIAL, ASI--SERA EL TIPO DE ENLACE QUIMICO ENTRE LAS MOLECU--LAS, Y HA SIDO DEMOSTRADO QUE DE DICHO ENLACE - DEPENDE EN GRAN MEDIDA LA DEFORMABILIDAD DE LA ROCA.
- CLIVAJE. AUNADO A LO ANTERIOR Y CON EL MISMO - ARGUMENTO SE PUEDE SOSTENER QUE EL CLIVAJE TAM--BIEN DETERMINA EN GRAN MEDIDA LA CAPACIDAD DE - UNA ROCA PARA DEFORMARSE.
- GRADO DE ALTERACION. ES SENCILLO COMPRENDER -- QUE UN MATERIAL SANO TENDRA UN COMPORTAMIENTO - MECANICO MEJOR, QUE EL QUE SE PUEDE ESPERAR DE--UN MATERIAL ALTERADO, ASI UNA ROCA CON GRAN CAN--TIDAD DE GRIETAS, SE DEFORMARA MAS QUE EN LA RO--CA SANA, YA QUE AL APLICARSELE CARGA, PRIMERO - SE PRESENTARAN LOS DESPLAZAMIENTOS NECESARIOS - PARA CERRAR DICHAS GRIETAS Y, POSTERIORMENTE SE DEFORMARA LA ROCA EN SI. ASI COMO SE HIZO UN -

BREVE DISCURSO DE LA FORMA EN QUE LOS DIFERENTES FACTORES INTERNOS AFECTAN LA DEFORMABILIDAD, SE HARA LO MISMO PARA LOS FACTORES EXTERNOS.

- LA ESTRATIFICACION AUNQUE ES UN FACTOR EXTERNO QUEDA INCLUIDO DENTRO DEL TIPO DE ROCA, YA QUE ESTE HECHO POR SI MISMO DEFINE UN GRAN GRUPO DE ROCAS (SEDIMENTARIAS).
- GRIETAS, FALLAS Y JUNTAS AFECTAN DE LA MISMA MANERA A LA DEFORMABILIDAD YA QUE ESTOS DEFECTOS ESTRUCTURALES TENDRAN, AL SER CARGADO UN MACIZO ROCOSO A CERRARSE Y A SUFRIR UN PROCESO DE REACOMODO EN LAS CARGAS IMPUESTAS, LO CUAL, EN UNA PRUEBA PUEDE REFLEJAR UNA DEFORMABILIDAD MUY GRANDE, BAJO EL EFECTO DE CARGAS BAJAS, Y UNA DISMINUCION DE LA MISMA A MEDIDA QUE LA CARGA AUMENTA O EL TIEMPO PASA.
- RUMBO Y ECHADO. ES OBVIO QUE ESTOS FACTORES ESTAN INTIMAMENTE LIGADOS A LA DEFORMABILIDAD YA QUE PUEDEN RESULTAR DEFINITIVA LA FORMA DE DEFORMARSE DE UNA ROCA, DEPENDIENDO DE LA FORMA DE APLICACION DE LAS CARGAS.

EN TERMINOS GENERALES, LA DEFORMABILIDAD DE LOS MATERIALES VARIA CON LA TEMPERATURA EN FORMA DIRECTAMENTE PROPORCIONAL, INCLUSO UN MATERIAL PUEDE EXPERIMENTAR DEFORMACIONES UNICAMENTE BAJO LOS EFECTOS DE SU PESO PROPIO Y DE UN CAMBIO SIGNIFICATIVO EN LA TEMPERATURA, POR LO QUE RESPECTA A LA ROCA ES DIFICIL QUE ESTA EXPERIMENTE A NIVEL DE LA CORTEZA TERRESTRE, CAMBIOS SIGNIFICATIVOS EN LA TEMPERATURA, YA QUE A ESTE NIVEL LA VARIA--

CIÓN MÁXIMA DE TEMPERATURA QUE SE PUEDE ESPERAR - EN LAS OBRAS DE INGENIERÍA CIVIL CON MUCHO, NO PASARÍAN DE LA VARIACIÓN QUE SI BIEN INDUCE OTROS - EFECTOS EN LA ROCA DIFÍCILMENTE AFECTARÍA SIGNIFICATIVAMENTE SU COMPORTAMIENTO EN MECÁNICO.

LOS FACTORES GRAVITACIONALES SE REFIEREN A LOS PESOS QUE SOBRE UNA CIERTA MASA DE ROCA GRAVITAN, - OBTIENIENDO LA MANERA EN QUE ESTOS PESOS ACTÚEN INFLUYENDO EN LA RESPUESTA DE DEFORMACIÓN EN LAS MASAS ROCOSAS, YA QUE NO ES LO MISMO APLICAR UN PESO DE 100 TON. EN UN ÁREA DE 100 M<sup>2</sup>, QUE APLICAR EL MISMO PESO EN UN ÁREA DE 10 M<sup>2</sup>, POR OTRO LADO ES TAMBIÉN DE INTERÉS REFERIR A QUE PROFUNDIDAD - SE ESTÁ ESTIMANDO UNA CIERTA DEFORMACIÓN YA QUE - EL PESO DE LA MASA ROCOSA QUE YACE POR ENCIMA INFLUYE EN LA FORMA DE RESPUESTA.

LOS EFECTOS TECTÓNICOS, BÁSICAMENTE ESTÁN RELACIONADOS CON LOS ESTADOS DE ESFUERZOS QUE EXISTEN EN LA MASA DE ROCA, YA QUE PUEDEN EXISTIR ZONAS (SINCLINALES POR EJEMPLO) EN LAS QUE LA DEFORMACIÓN PREVIA PUEDE HABER OCASIONADO UN ENDURECIMIENTO - POR DEFORMACIÓN, AUMENTANDO CON ELLO LA CAPACIDAD DE LA ROCA, AUNADO A ELLO EXISTIRÁN ENTONCES ZONAS EN LAS QUE MUY PROBABLEMENTE EXISTAN DEFECTOS ESTRUCTURALES, DE LOS QUE YA SE MENCIONÓ SU EFECTO.

ES DE GRAN IMPORTANCIA INVESTIGAR LA DEFORMABILIDAD DE UNA ROCA EN PRESENCIA Y EN AUSENCIA DE AGUA, YA QUE SI BIEN EXISTEN ROCAS A LAS QUE EL AGUA NO ALTERA SUS PROPIEDADES SI EXISTEN OTRAS A LAS QUE PUEDE MODIFICAR EN FORMA NOTABLE SU COMPORTAMIENTO, POR ESTA RAZÓN LOS FACTORES HIDROLÓGICOS DEBEN TOMARSE EN CUENTA, ESTIMANDO SU EFECTO Y HA-

CERLO PATENTE DENTRO DE LOS REPORTES DE ESTUDIO.

HASTA AQUI SE HAN MENCIONADO UNA SERIE DE FACTORES INTERNOS Y EXTERNOS QUE DE ALGUNA MANERA AFECTAN EL COMPORTAMIENTO (EN LO QUE SE REFIERE A DEFORMABILIDAD) DE UNA ROCA. SIN EMBARGO, SI NO ES IMPOSIBLE, SI ES MUY DIFICIL REALIZAR UN ESTUDIO DE DEFORMABILIDAD INCLUYENDOLOS TODOS UNO -- POR UNO. EN ESTE CASO LA MECANICA DE ROCAS HA -- RECURRIDO A LOS PRINCIPIOS DE LA TEORIA DE LA -- ELASTICIDAD, QUE, SI BIEN NO SON DEL TODO APLICABLES, LOS RESULTADOS QUE ARROJAN TIENEN UN GRAN SENTIDO PARA SU UTILIZACION PRACTICA, AUNQUE COMO YA SE DIJO NO SE PUEDAN SATISFACER PLENAMENTE LAS HIPOTESIS BASICAS DE DICHA TEORIA. PUES BIEN UNA VEZ QUE SE HA DECIDIDO HECHAR MANO DE LA TEORIA DE LA ELASTICIDAD PARA INVESTIGAR LAS PROPIEDADES DE DEFORMABILIDAD DE UNA MASA DE ROCA SE -- HACE NECESARIO DEFINIR LOS PARAMETROS QUE ESTA -- TEORIA CONJUGA PARA LA SOLUCION DEL PROBLEMA.

LOS FACTORES INTERNOS, QUE HEMOS MENCIONADO, AL HACER USO DE LA TEORIA DE LA ELASTICIDAD QUEDAN -- RESUMIDOS EN LOS SIGUIENTES PARAMETROS :

- E, MODULO DE ELASTICIDAD.
- R, RELACION DE POISSON.

EL MODULO DE ELASTICIDAD, E, ES EN SI LA RIGIDEZ -- A LA DEFORMACION LINEAL DE UN MATERIAL CUANDO ESTE SE SOMETE A CARGA AXIAL, ES DECIR, ES LA RELACION QUE EXISTE ENTRE LA CARGA APLICADA Y LA DEFORMACION EXPERIMENTADA. EN EL CASO DE MATERIALES ELASTICOS EN LOS QUE LA PROPORCIONALIDAD ES -- CONSTANTE, ESTE REPRESENTA LA TANGENTE DEL ANGULO -- DE LA GRAFICA QUE SE OBTIENE AL HACER EL ENSAYO --

DE UNA PROBETA. PARA EL CASO DE LA ROCA NO ES UN MATERIAL ELASTICO, SE HA HECHO NECESARIO DEFINIR- ADEMAS EL MODULO DE ELASTICIDAD, OTROS PARAMETROS QUE MAS ADELANTE MENCIONAREMOS.

LA RELACION DE POISSON,  $\nu$ , ES EL COCIENTE QUE RESULTA DE DIVIDIR LA DEFORMACION LONGITUDINAL, CON LA DEFORMACION TRANSVERSAL.

POR OTRO LADO LOS FACTORES EXTERNOS QUEDARAN DEFINIDOS POR EL ESFUERZO A QUE ESTA SOMETIDO EL MATERIAL, CON ESTO, AUNQUE ALGUNOS FACTORES MENCIONADOS NO ESTAN INCLUIDOS EXPRESAMENTE SI QUEDARA REPRESENTADO EL PRINCIPAL QUE ES LA CARGA QUE FINALMENTE ES LA CAUSA MAS COMUN DE LAS DEFORMACIONES.

DEBIDO A QUE LA ROCA NO ES ELASTICA (SITUACION -- POR DEMAS MANIFESTADA EN MULTIPLES OCASIONES) SE HA HECHO NECESARIO DEFINIR ALGUNOS OTROS PARAMETROS QUE AYUDEN A COMPRENDER EL COMPORTAMIENTO DE ESTE MATERIAL, ALGUNOS DE ELLOS SON LOS SIGUIENTES :

GRADO DE ELASTICIDAD 
$$e_{EL} = \frac{\epsilon_{EL}}{\epsilon_{TOTAL}}$$

GRADO DE PLASTICIDAD 
$$e_{PL} = \frac{\epsilon_{IR}}{\epsilon_{TOTAL}}$$

MODULO DE DEFORMACION 
$$E_C = \frac{\sigma}{\epsilon_{TOTAL}} = \frac{\sigma}{\epsilon_{IR} + \epsilon_{EL}}$$

MODULO TANGENTE A CARGA CERO 
$$E_t$$

## MODULO TANGENTE A UN PUNTO EN PARTICULAR $E_C$

LOS PARAMETROS MENCIONADOS, SON NECESARIOS PARA - ESTUDIAR LA DEFORMABILIDAD YA QUE SIN ELLOS SERIA IMPOSIBLE PREVER EL COMPORTAMIENTO DE LA ROCA. - AHORA BIEN EXISTEN PRUEBAS DE CAMPO QUE PERMITEN- - CONOCER ESTOS PARAMETROS PERO, PARA LA REALIZA- - CION DE OBRAS ES NECESARIO EL PREVIO CONOCIMIENTO DE ELLOS PARA SU EJECUCION.

### 4.3 PRUEBAS DE DEFORMABILIDAD "IN-SITU".

LOS METODOS QUE ACTUALMENTE SE DISPONEN PARA LA - INVESTIGACION DE LA DEFORMABILIDAD EN UNA ROCA PQ DEMOS DIVIDIRLOS EN DOS GRANDES GRUPOS :

- METODOS ESTATICOS.
- METODOS DINAMICOS.

DENTRO DE LOS METODOS ESTATICOS SE ENCUENTRAN LOS SIGUIENTES :

- 1.- PRUEBAS DE PLACA.
- 2.- GATOS.
- 3.- CAMARAS DE PRESION.
- 4.- PRUEBAS DE COMPRESION.
- 5.- PRUEBAS DE CORTANTE.
- 6.- PRUEBAS DE TORSION.
- 7.- FRACTURACION HIDRAULICA.
- 8.- OTROS.

- PRUEBA DE PLACA.

UNA DE LAS TECNICAS MAS USADAS PARA CONOCER LAS CARACTERISTICAS DE DEFORMABILIDAD (Y RESISTENCIA) DE UNA ROCA, ES LA LLAMADA PRUEBA DE PLACA, ESTA, CONSISTE BASICAMENTE EN APLICAR MEDIANTE ALGUN DISPOSITIVO UNA CARGA A UNA PLACA DE ACERO, QUE A SU VEZ SE APOYA DIRECTAMENTE SOBRE LA ROCA, LA QUE, COMO ES OBVIO SUFRIRA DEFORMACIONES DEBIDO A LA CARGA APLICADA. ESTAS DEFORMACIONES SE MIDEN Y CON BASE A ELLAS SE CALCULA EL MODULO DE ELASTICIDAD DE LA ROCA

EN LAS FIGURAS 4.1, 4.2, SE MUESTRAN ALGUNOS DE LOS ARREGLOS USADOS PARA LA REALIZACION DE ESTA PRUEBA. COMO SE PUEDE APRECIAR LA PRUEBA PUEDE REALIZARSE EN CUALQUIER DIRECCION LO CUAL HACEDEL METODO UNA HERRAMIENTA MUY USADA.

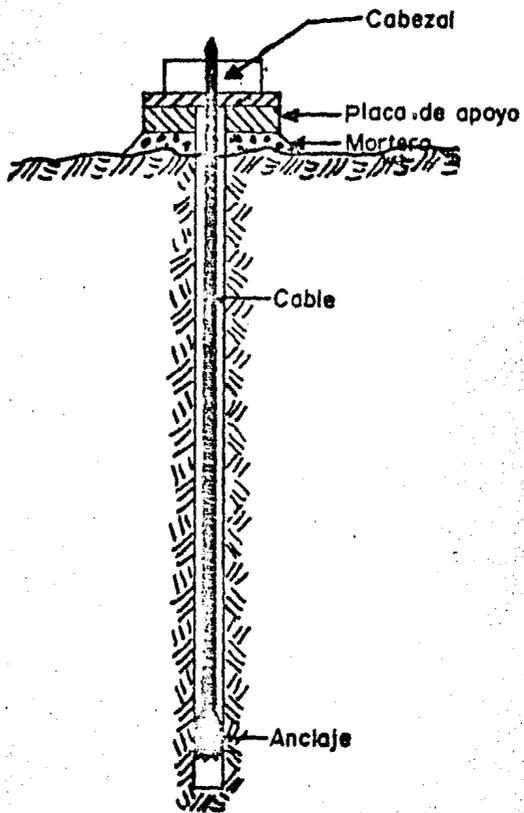
EXISTE UNA TEORIA QUE JUSTIFICA LA EXPRESION MATEMATICA QUE RELACIONA LOS PARAMETROS INVOLUCRADOS EN EL FENOMENO. ESTA ES, LA SOLUCION MODIFICADA DE BOUSSINESQ, PARA LA DISTRIBUCION DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN UN MEDIO ELASTICO Y SEMI-INFINITO SUJETO A UNA CARGA SUPERFICIAL. VEAMOS :

CONSIDERESE EL SISTEMA MOSTRADO EN LA FIGURA (4.3) EN ELLA SE MUESTRA LA APLICACION DE LA CARGA CONCENTRADA  $P$  QUE ACTUA EN FORMA VERTICAL. EN EL MISMO  $(x, y, z)$  SON LAS COORDENADAS DEL PUNTO EN QUE SE EVALUAN LOS ESFUERZOS, TENEMOS LOS SIGUIENTES PARAMETROS:

$R$  : ES EL VECTOR DE POSICION DEL PUNTO  $A'$

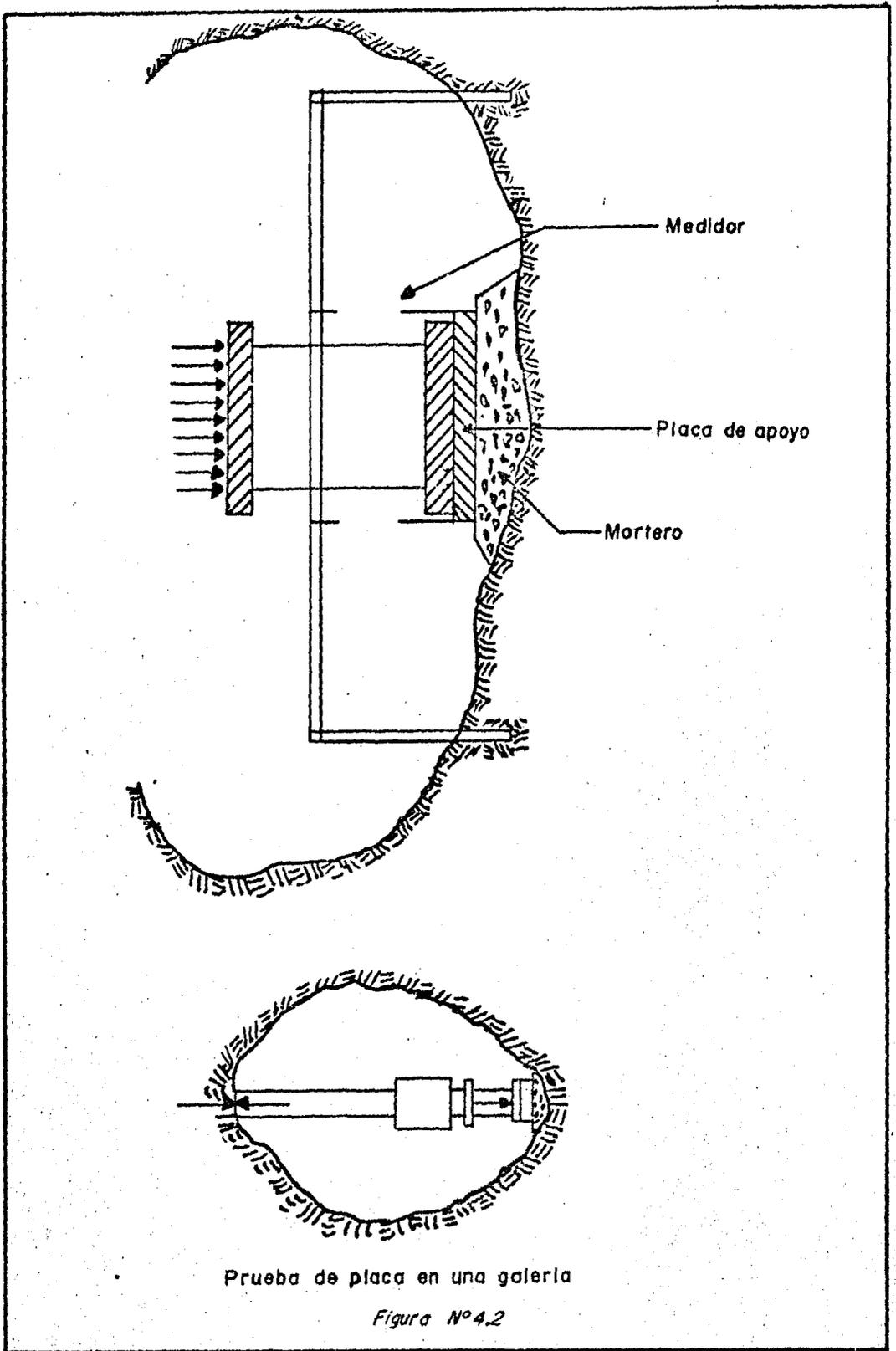
$R$  : ES EL VECTOR DE POSICION DEL PUNTO  $A$

$\psi$  : ES EL ANGULO QUE FORMA EL VECTOR  $R$  CON EL EJE  $Z$ .



Prueba de placa en la superficie

Figura Nº 4.1



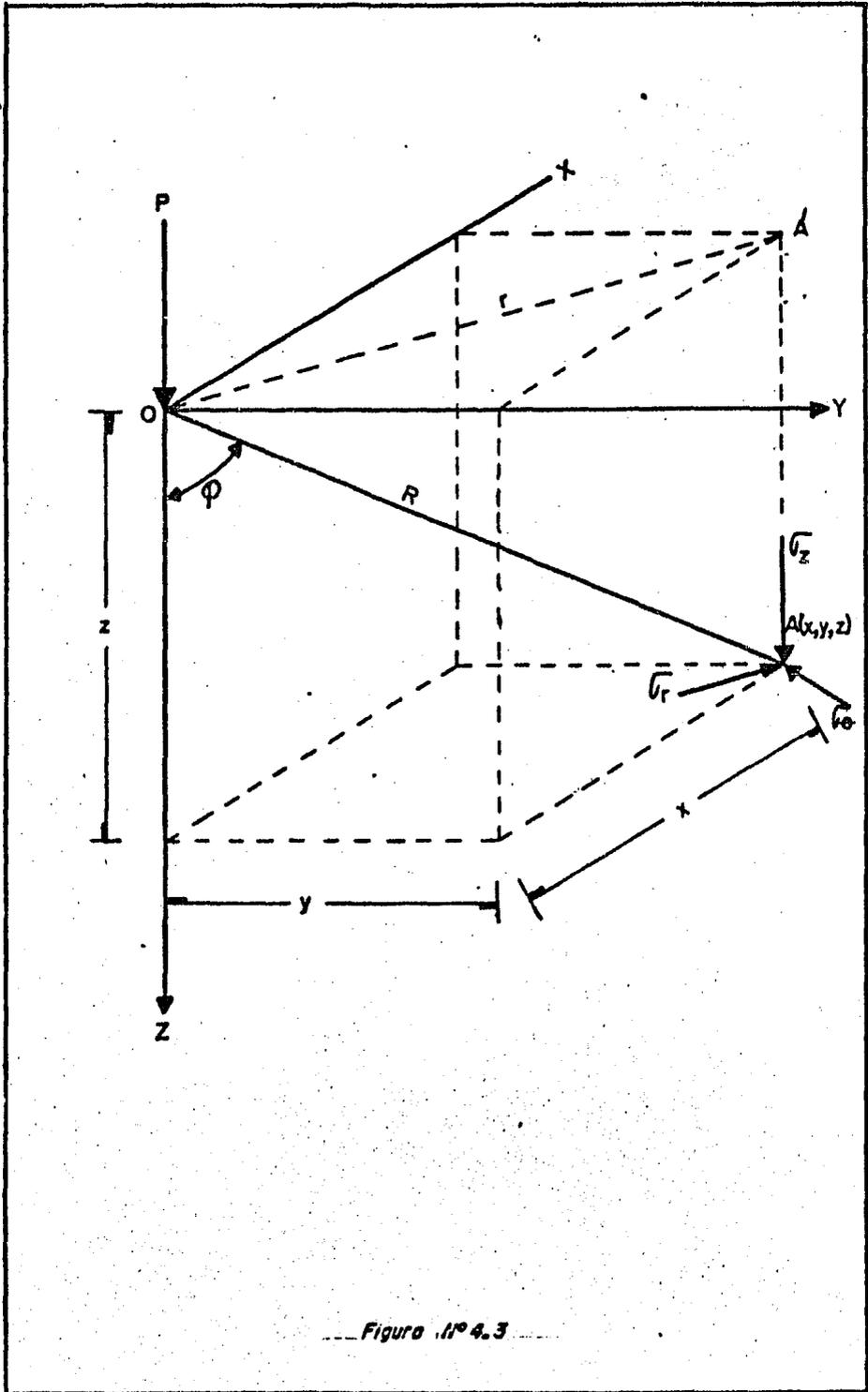


Figura nº 4.3

CON TODO ESTO SEGUN (2) LA SOLUCION DE BOUSSINESQ TOMA LA SIGUIENTE FORMA :

$$\sigma_z = \frac{3P \cos^5 \psi}{2 \pi z^2} \dots (4.1)$$

$$\sigma_r = \frac{P}{2 z^2} \left[ 3 \cos^3 \psi \operatorname{sen}^2 \psi - (1-2\mu) \frac{\cos^2 \psi}{1+\cos \psi} \right] \dots (4.2)$$

$$\sigma_\theta = -(1-2\mu) \frac{P}{2 \pi z^2} \left[ \cos^3 \psi - \frac{\cos^2 \psi}{1+\cos \psi} \right] \dots (4.3)$$

$$\tau_{rz} = \frac{3P \cos^4 \psi \operatorname{sen} \psi}{2 \pi z^2} \dots (4.4)$$

CON BASE EN LA FIGURA MENCIONADA PODEMOS TRANSFORMAR LA EX PRESION DE  $\sigma_z$  DE LA SIGUIENTE MANERA :

DE LA FIGURA 4.3

$$\cos \psi = \frac{z}{R} \dots$$

$$\cos^5 \psi = \frac{z^5}{R^5} ; \text{SUSTITUYENDO EN } \sigma_z :$$

$$\sigma_z = \frac{3P}{2 \pi} \frac{\frac{z^5}{R^5}}{z^2}$$

(2) TIMOSHENKO AND GOODIER (1951) "THEORIE OF ELASTICITY" SECOND EDITION P.P.

$$\therefore \sigma_z = \frac{3P}{2} \frac{z^3}{R^5} \quad \text{PERO } R = \sqrt{R^2 + z^2} \Rightarrow$$

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi} \frac{z^3}{\sqrt{(R^2 + z^2)^5}} \quad \dots \quad (4.5)$$

ANALOGAMENTE SE TRANSFORMA LAS DEMAS EXPRESIONES-  
QUEDANDO DE LA SIGUIENTE MANERA :

$$\sigma_R = \frac{P}{2\pi} (1-2\mu) \left[ \frac{1}{R^2} - \frac{z}{R^2} \frac{1}{(R^2+z^2)^{\frac{1}{2}}} \right] - 3 \frac{z^2}{R} \frac{1}{(R^2+z^2)^{\frac{5}{2}}} \dots (4.6)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P}{2\pi} (1-2\mu) \left\{ -\frac{1}{R^2} + \frac{z}{R^2} \frac{1}{(R^2+z^2)^{\frac{1}{2}}} + z \frac{3}{(R^2+z^2)^{\frac{3}{2}}} \right\} \dots (4.7)$$

$$\tau_{Rz} = -\frac{3P}{2\pi} \frac{Rz^2}{(R^2+z^2)^{\frac{5}{2}}} \dots (4.8)$$

AHORA BIEN, SI TOMAMOS UNA AREA ELEMENTAL (MN) PER-  
PENDICULAR AL EJE Z (COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA  
4.4, LA RELACION ENTRE LOS ESFUERZOS NORMAL Y COR-  
TANTE EN ESTE ELEMENTO DE LAS ECUACIONES DADAS ES:

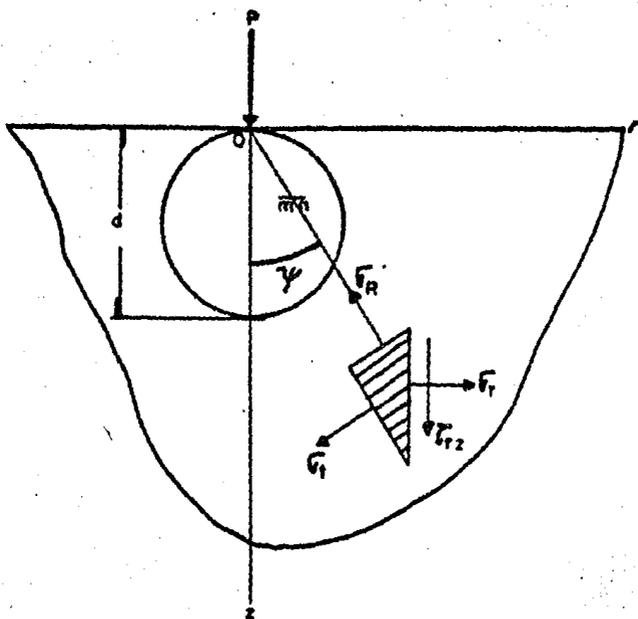


Figura .Nº 3.4.

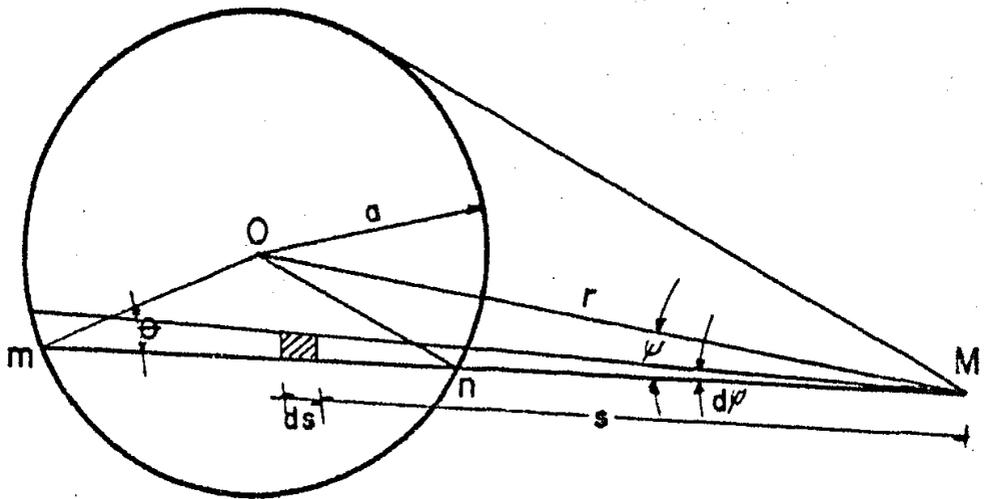


Figura N<sup>o</sup> 4.4'

$$\frac{\sigma_z}{z_{RZ}} = \frac{z}{R} \quad \dots \quad (4.9)$$

· ESTO IMPLICA QUE LA RESULTANTE DE LOS ESFUERZOS -  
 PASE POR EL ORIGEN, LA MAGNITUD DE ESTA RESULTANTE  
 ES :

$$S = \sqrt{\sigma_z^2 + z_{RZ}^2} = \frac{3P}{2\pi} \frac{z^2}{(R^2+z^2)^2} \quad \dots \quad (4.10)$$

PERO COMO YA HABIAMOS DICHO :

$$\frac{z^2}{R^2+z^2} = \cos^2 \psi \quad \text{ENTONCES :}$$

$$S = \frac{3P \cos^2 \psi}{2\pi (R^2+z^2)} \quad \dots \quad (4.11)$$

LO ANTERIOR IMPLICA QUE EL ESFUERZO ES INVERSAMEN-  
 TE PROPORCIONAL AL CUADRADO DE LA DISTANCIA DEL -  
 PUNTO DE APLICACION DE LA CARGA P. NUEVAMENTE RE-  
 FIRAMONOS A LA FIGURA (4.4), EN ELLA TAMBIEN SE -  
 PUEDE APRECIAR UNA SUPERFICIE ESFERICA DE DIAME--  
 TRO D Y TANGENTE AL PLANO  $z=0$  EN EL ORIGEN O, PA-  
 RA CADA PUNTO DE ESTA SUPERFICIE TENEMOS QUE :

$$R^2 + z^2 = D^2 \cos^2 \psi$$

SUSTITUYENDO EN LA RESULTANTE DE ESFUERZOS S TEN-

DREMOS :

$$S = \frac{3P}{2\pi D^2} \dots (4.12)$$

CONSIDEREMOS AHORA EL DESPLAZAMIENTO QUE LA CARGA P OCASIONA EN LA DIRECCION Z. SEGUN (2) ESTE DESPLAZAMIENTO ESTA DADO POR :

$$\frac{\partial W}{\partial Z} = E_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - (\sigma_r + \sigma_\theta)] \dots (4.13)$$

SUSTITUYENDO LOS VALORES DE LOS ESFUERZOS :

$$\frac{\partial W}{\partial Z} = E_z = \frac{1}{E} \left[ -\frac{3PZ^3}{2\pi (R^2+Z^2)} - \mu \frac{P}{2\pi} (1-2\mu) \left( \frac{1}{R^2} - \frac{Z}{R^2} (R^2+Z^2)^{-1/2} \right) \right. \\ \left. - 3R^2 Z (R^2-Z^2)^{-5/2} + \frac{P}{2\pi} (1-2\mu) \left( \frac{1}{R^2} + \frac{Z}{R^2} (R^2+Z^2)^{1/2} + Z (R^2+Z^2)^{3/2} \right) \right]$$

HACIENDO OPERACIONES Y REDUCIENDO TERMINOS SE LLEGA A :

$$\frac{\partial W}{\partial Z} = \frac{P}{2\pi E} \left\{ 3(1+\mu) R^2 Z (R^2+Z^2)^{-5/2} - [3-\mu(1-2\mu)] Z (R^2+Z^2)^{-3/2} \right\}$$

INTEGRANDO ESTA EXPRESION Y OMITIENDO LA CONSTANTE DE INTEGRACION :

$$W = \frac{P}{2\pi E} \left[ (1+\mu) Z^2 (R^2+Z^2)^{-3/2} + 2(1-\mu^2) (R^2+Z^2)^{-1/2} \right] \dots (4.14)$$

PARA LA FRONTERA, Z=0 IMPLICA QUE :

$$w_z = 0 = \frac{P (1 - \mu^2)}{\pi E R} \dots (4.15)$$

LA SOLUCION ANTES ENCONTRADA ES PARA UNA CARGA --  
 CONCENTRADA, SE PUEDE POR SUPERPOSICION, OBTENER-  
 LOS ESFUERZOS Y DESPLAZAMIENTOS QUE OCURREN DEBI-  
 DO A UNA CARGA DISTRIBUIDA. COMO EN EL CASO DE -  
 LA PRUEBA DE PLACA, LO QUE IMPORTA SON LAS DEFOR-  
 MACIONES, ENTONCES ENCONTRAREMOS LA EXPRESION PA-  
 RA ESTAS.

CONSIDEREMOS UNA CARGA UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDA-  
 SOBRE UN AREA CIRCULAR DE RADIO A DEBIDO A LO CUAL  
 EL PUNTO M SUFRE UNA DEFORMACION EN LA DIRECCION-  
 DE LA CARGA EN LA SUPERFICIE A UNA DISTANCIA R DEL  
 CENTRO DEL CIRCULO. TOMANDO UN PEQUEÑO ELEMENTO-  
 DEL AREA CARGADA COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA - -  
 (4.4') TENEMOS QUE LA CARGA SOBRE EL ELEMENTO M -  
 ES :

$q \, ds \, d\psi$  POR LO QUE LA DEFLEXION SERA :

$$\frac{(1 - \mu^2) q \, ds \, d\psi}{\pi E s} = \frac{(1 - \mu^2) q \, ds \, d\psi}{\pi E}$$

LA DEFLEXION DEBIDA A TODA EL AREA CARGADA SE OB-  
 TIENE POR DOBLE INTEGRACION Y SERA :

$$w = \frac{(1 - \mu^2) q}{\pi E} \iint d\psi \, ds \dots (4.16)$$

INTEGRANDO RESPECTO A S Y TOMANDO EN CUENTA LA --

LONGITUD DE LA CUERDA MN ES IGUAL A

$$2 \int \sqrt{A^2 + R^2 \text{SEN}^2 \psi} \quad \text{ENCONTRAMOS :}$$

$$W = \frac{4(1-\mu^2)Q}{\pi E} \int_0^{\psi} \sqrt{A^2 - R^2 \text{SEN}^2 \psi} \, d\psi$$

ESTA INTEGRAL SE SIMPLIFICA HACIENDO UN CAMBIO DE VARIABLE.

DE LA FIGURA TENEMOS QUE :

$$A \text{ SEN } \theta = R \text{ SEN } \psi$$

$$\text{ENTONCES} \quad d\psi = \frac{A \text{ COS } \theta \, d\theta}{R \text{ COS } \psi}$$

$$\therefore d\psi = \frac{A \text{ COS } \theta \, d\theta}{R \sqrt{1 - \left(\frac{A^2}{R^2}\right) \text{SEN}^2 \theta}}$$

SUSTITUYENDO EN W Y RECORDANDO QUE  $\theta$  VARIA DE 0 A  $\frac{\pi}{2}$

ENCONTRAMOS QUE :

$$W = \frac{4(1-\mu^2)Q}{\pi E} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{A^2 \text{COS}^2 \theta \, d\theta}{R \sqrt{1 - \left(\frac{A^2}{R^2}\right) \text{SEN}^2 \theta}} \quad \dots (4.17)$$

$$W = \frac{4(1-\mu^2)qR}{\pi E} \left[ \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \frac{A^2}{R^2} \text{SEN}^2 \theta} d\theta - \left(1 - \frac{A^2}{R^2}\right) \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - \frac{A^2}{R^2} \text{SEN}^2 \theta}} \right]$$

AHORA BIEN PARA ENCONTRAR LA DEFLEXION EN LA FRONTERA DEL AREA CARGADA HACEMOS  $R=A$ , ENTONCES QUEDA FINALMENTE QUE :

$$W_{R=A} = \frac{4(1-\mu^2)qA}{\pi E} \dots (4.18)$$

SI EL PUNTO EN CUESTION SE ENCUENTRA DENTRO DEL AREA CARGADA, ENTONCES LA DEFLEXION SERA :

$$W = \frac{(1-\mu^2)q}{\pi E} \iint DSD\psi \dots (4.16)$$

DE LA FIGURA, LA LONGITUD DE LA CUERDA MN ES  $2A \cos \theta$  Y VARIA DE 0 A  $\frac{\pi}{2}$  CON ESTO :

$$W = \frac{4(1-\mu^2)q}{\pi E} \int_0^{\pi} A \cos \theta d\psi$$

O, PUESTO QUE  $A \text{SEN} \theta = R \text{SEN} \psi$  TENEMOS

$$W = \frac{4(1-\mu^2)QA}{\pi E} \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \left(\frac{R^2}{A^2}\right) \text{SEN}^2 \psi} d\psi \dots (4.19)$$

ASI, LA DEFLEXION PUEDE SER CALCULADA FACILMENTE PARA CUALQUIER VALOR DE  $\frac{R}{A}$  USANDO LAS TABLAS PARA

INTEGRARLES ELIPTICAS. LA MAXIMA DEFLEXION OCURRE POR SUPUESTO EN EL CENTRO DEL AREA CARGADA. SUSTITUYENDO  $R=0$  Y REALIZANDO OPERACIONES, ENCONTRAMOS FINALMENTE :

$$W_{\text{MAX}} = \frac{2(1-\mu^2)QA}{E} \dots (4.20)$$

HACIENDO CALCULOS ANALOGOS PARA PRESIONES UNIFORMES SOBRE AREAS RECTANGULARES CON DIFERENTES RELACIONES DE LADOS SE LLEGA A LA SIGUIENTE EXPRESION:

$$W = \frac{M P(1-\mu^2)}{E \sqrt{A}} \dots (4.21)$$

EN DONDE M ES UN FACTOR QUE DEPENDE DE LA RELACION DE LADOS. EN LA TABLA 1 SE DAN VARIOS VALORES DE M.

		RELACION DE LADOS							
		CIRCULO	CUADRADO	1.5	2	3	5	10	100
M		0.96	0.95	0.94	0.92	0.88	0.82	0.71	0.37

TABLA 1

CON BASE A OTRAS PRUEBAS SE PUEDE ESTIMAR EL VALOR

DE  $\mu$  PARA FINALMENTE DETERMINAR EL VALOR DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD.

- PRUEBA DEL GATO PLANO.

ESTA PRUEBA TIENE UNA DOBLE APLICACION, YA QUE--ASI COMO ES POSIBLE LA INVESTIGACION DE LA DEFORMABILIDAD DE UNA ROCA, TAMBIEN PERMITE CONOCER EL ESTADO DE ESFUERZOS QUE EXISTE EN ELLA.

LOS GATOS PLANOS USADOS COMUNMENTE EN ESTA PRUEBA, TIENEN UN AREA DEL ORDEN DE LOS 600 CM<sup>2</sup>, LO CUAL PERMITE AFECTAR UN VOLUMEN DE ROCA CONSIDERABLE. ASIMISMO ESTOS DISPOSITIVOS SON CAPACES DE TRANSMITIR PRESIONES MAYORES A 100 KG/CM<sup>2</sup>.

EN LA FIGURA (4.5) SE PRESENTA EL ARREGLO COMUNMENTE USADO, TAMBIEN SE PRESENTAN LOS PARAMETROS QUE ESTAN INVOLUCRADOS.

LA PRUEBA SE REALIZA DE LA SIGUIENTE MANERA: DENTRO DE UNA GALERIA SE PULE UNA PORCION DE LA PARED, PERPENDICULARMENTE A ESTA SUPERFICIE SE EFECTUA UNA RANURA CON UN DISCO DE DIAMANTE, UNA VEZ QUE ESTA HECHA SE INTRODUCE EN ELLA UN GATO PLANO, EL CUAL ES EMPACADO CON UN MORTERO APROPIADO, AL MISMO TIEMPO SE MARCAN LOS PUNTOS A Y B, POSTERIORMENTE SE PROCEDE A APLICAR PRESION MEDIANTE EL GATO PLANO, ESTO OBVIAMENTE INDUCIRA DEFORMACIONES QUE HARAN QUE EL PUNTO A SE MUEVA AL PUNTO A', REGISTRANDOSE UN DESPLAZAMIENTO E IGUALMENTE SUCEDERA CON EL PUNTO B, QUE SI LA ROCA TIENE UN COMPORTAMIENTO MAS O MENOS ELASTICO TENDRA UN DESPLAZAMIENTO SIMILAR AL PUNTO A. CON LAS CONDICIONES DESCRITAS JAEGER Y COOKE (1976) ENCONTRARON LA RELACION QUE INVOLUCRA A LOS PARAMETROS MENCIO

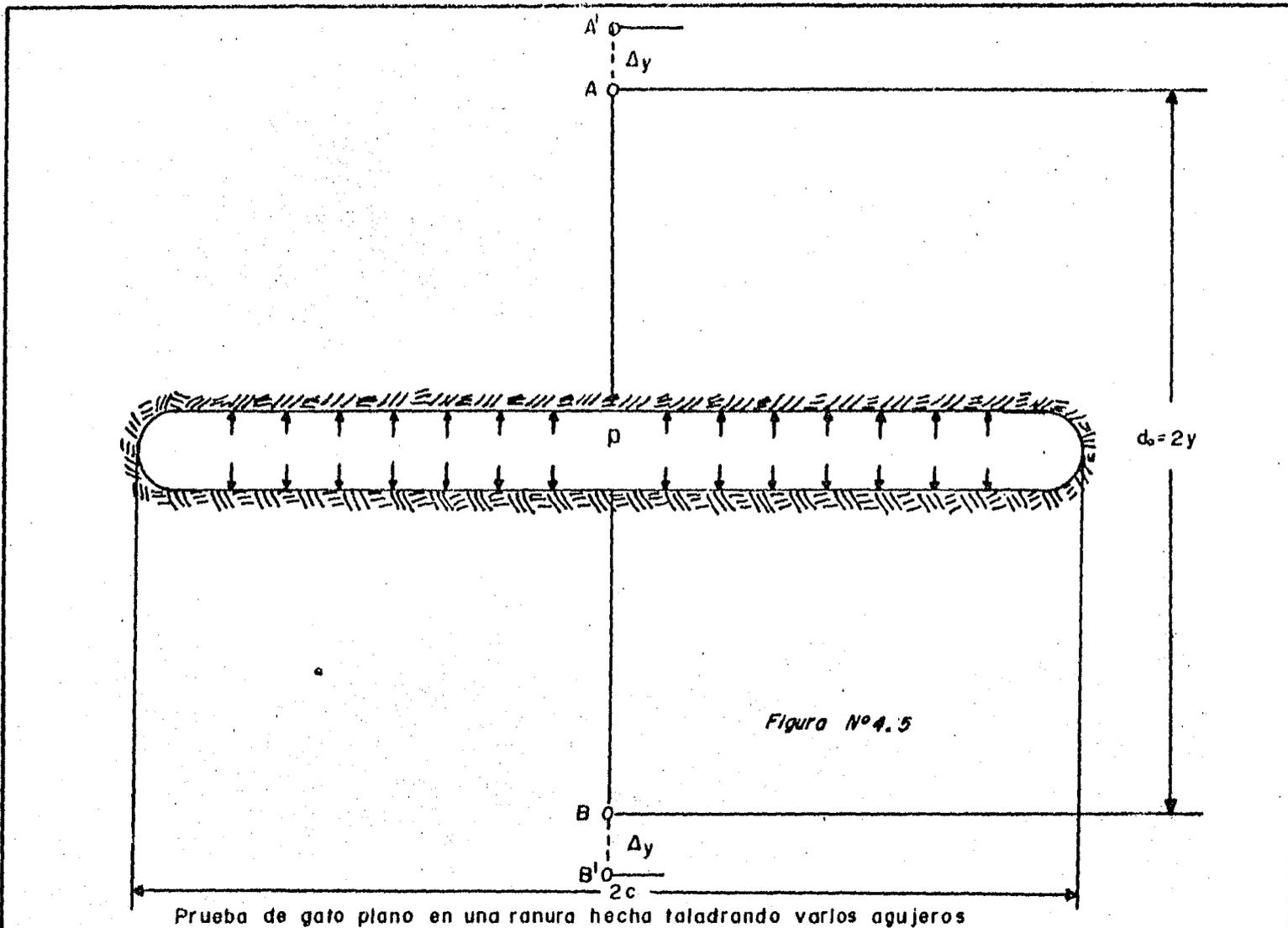


Figura N° 4.5

Prueba de gato plano en una ranura hecha taladrando varios agujeros

NADOS Y QUE PERMITE DETERMINAR EL MODULO DE ELASTICIDAD DE LA ROCA EN CUESTION, ESTA RELACION ES LA QUE A CONTINUACION SE DESCRIBE.

$$E = \frac{Pc}{\Delta y} \left[ (1 - \mu) \left( \sqrt{1 + \frac{y^2}{c^2}} - \frac{y}{c} \right) + \frac{(1 + \mu)}{\sqrt{1 + \frac{y^2}{c^2}}} \right] \dots (4.22)$$

EN DONDE LAS LITERALES TIENEN EL SIGNIFICADO QUE SE MUESTRA EN LA FIGURA 4.5.

- PRUEBA DE LA CAMARA DE PRESION.

ESTA PRUEBA TAMBIEN LLAMADA DEL TUNEL DE PRESION O DE LA GALERIA, CONSISTE BASICAMENTE DE LO SIGUIENTE : SE SELLA UNA PORCION DE UN TUNEL (SE RECOMIENDA QUE LA LONGITUD DEL TRAMO SEA CUANDO MENOS CINCO VECES EL DIAMETRO DEL MISMO) DESPUES DE HABERLA IMPERMEABILIZADO Y HABER COLOCADO INSTRUMENTOS QUE PERMITAN REGISTRAR LA HISTORIA DE LAS DEFORMACIONES DURANTE LA PRUEBA, ESTOS INSTRUMENTOS SON LOS LLAMADOS DEFORMIMETROS MISMOS QUE PUEDEN SER DE DIFERENTES TIPOS, AQUI CITAREMOS DOS DE ELLOS :

A) ELECTRICOS.

B) ELECTROACUSTICOS.

LOS ELECTRICOS SON EN ESENCIA CONDUCTORES QUE AL DEFORMARSE LONGITUDINALMENTE TAMBIEN, POR NATURALEZA SE DEFORMAN TRANSVERSALMENTE, ESTE HECHO OCASIONA QUE CAMBIEN SUS PROPIEDADES DE RESISTENCIA Y CONDUCTIVIDAD, SITUACIONES AMBAS --

QUE HAN SIDO CORRELACIONADAS LO QUE PERMITE, CO-  
NOCIENDO UNA DE ELLAS CONOCER CON EXACTITUD LA  
OTRA.

EL TIPO ELECTROACUSTICO CONSISTE DE UN ALAMBRE-  
CUYA FRECUENCIA NATURAL DE VIBRAR DEPENDE DE LA  
TENSION DE LA CUERDA, POR LO QUE OBTIENIENDO VA-  
RIARA CON LAS DEFORMACIONES QUE SE VAYAN PRESEN-  
TANDO DURANTE LA PRUEBA.

UNA VEZ QUE EL TUNEL HA SIDO PREPARADO SE PROCE-  
DE A PRESURIZARLO MEDIANTE LA INYECCION DE AGUA,  
CON LO QUE SE LOGRA QUE HAYA UNA PRESION UNIFORME  
Y RADIAL SOBRE LAS PAREDES DEL TUNEL YA QUE-  
ESTA DEBE SER SECCION CIRCULAR.

VEAMOS AHORA LA HERRAMIENTA MATEMATICA QUE NOS  
PERMITIRA RELACIONAR LOS DIVERSOS PARAMETROS --  
QUE INTERVIENEN.

EN LA FIGURA SE MUESTRA EL ARREGLO QUE GENERAL-  
MENTE SE ADOPTA, EN ELLA SE PUEDE APRECIAR LOS  
DEFORMIMETROS Y LA GEOMETRIA DEL TUNEL.

DE ACUERDO CON LA TEORIA DE LA ELASTICIDAD, EN  
UN ESTADO BIDIMENSIONAL DE ESFUERZOS SE TIENE -  
QUE LA DEFORMACION EN EL SENTIDO X SERA  $\frac{\sigma_x}{E}$  --

POR LA ACCION DIRECTA DEL ESFUERZO EN DICHA DI-  
RECCION PERO, AL MISMO TIEMPO SE INDUCIRA UNA -  
CONTRACCION LATERAL DEBIDA AL ESFUERZO Y EN LA-  
DIRECCION Y CUYO VALOR ESTA DADO POR  $-\frac{\mu \sigma_x}{E}$  -

POR LO QUE LA DEFORMACION RESULTANTE EN LA DI-  
RECCION X ESTARA DADA POR LA SUMA ALGEBRAICA DE  
AMBAS, ASI :

$$E_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\mu \sigma_y}{E} \quad . . . \quad 4.23$$

ANALOGAMENTE:

$$E_y = \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\mu \sigma_x}{E} \quad . . . \quad 4.23'$$

PARA EL CASO QUE NOS OCUPA  $\sigma_y = \sigma_x$  ENTONCES -  
HACIENDO  $y = P$

$$E_x = \frac{P}{E} - \frac{\mu P}{E} \quad . . . \quad 4.24$$

FACTORIZANDO

$$E_x = \frac{P}{E} (1 - \mu) \quad . . . \quad 4.25$$

ANALOGAMENTE

$$E_y = \frac{P}{E} (1 - \mu) \quad . . . \quad 4.25'$$

AHORA BIEN, SABEMOS QUE  $E_x = \frac{\Delta L_x}{L_x}$  Y  $E_y = \frac{\Delta L_y}{L_y}$

Y EN ESTE CASO  $L_x = L_y = D$

DONDE  $D$  ES EL DIAMETRO DEL TUNEL, POR LO QUE LAS-  
EXPRESIONES 4.25 Y 4.25' TOMAN LA SIGUIENTE FORMA:

$$E_x = \frac{\Delta L X}{L X} = \frac{\Delta D}{D} = \frac{P}{E} (1 - \mu) \quad \dots \quad 4.26$$

EN LA QUE FINALMENTE PODEMOS DESPEJAR EL MODULO -  
DE ELASTICIDAD QUEDANDO DE LA SIGUIENTE MANERA :

$$E = \frac{(1 - \mu) DP}{\Delta D} \quad \dots \quad 4.27$$

QUE ES LA EXPRESION GENERALMENTE PROPUESTA PARA -  
ESTE PROBLEMA.

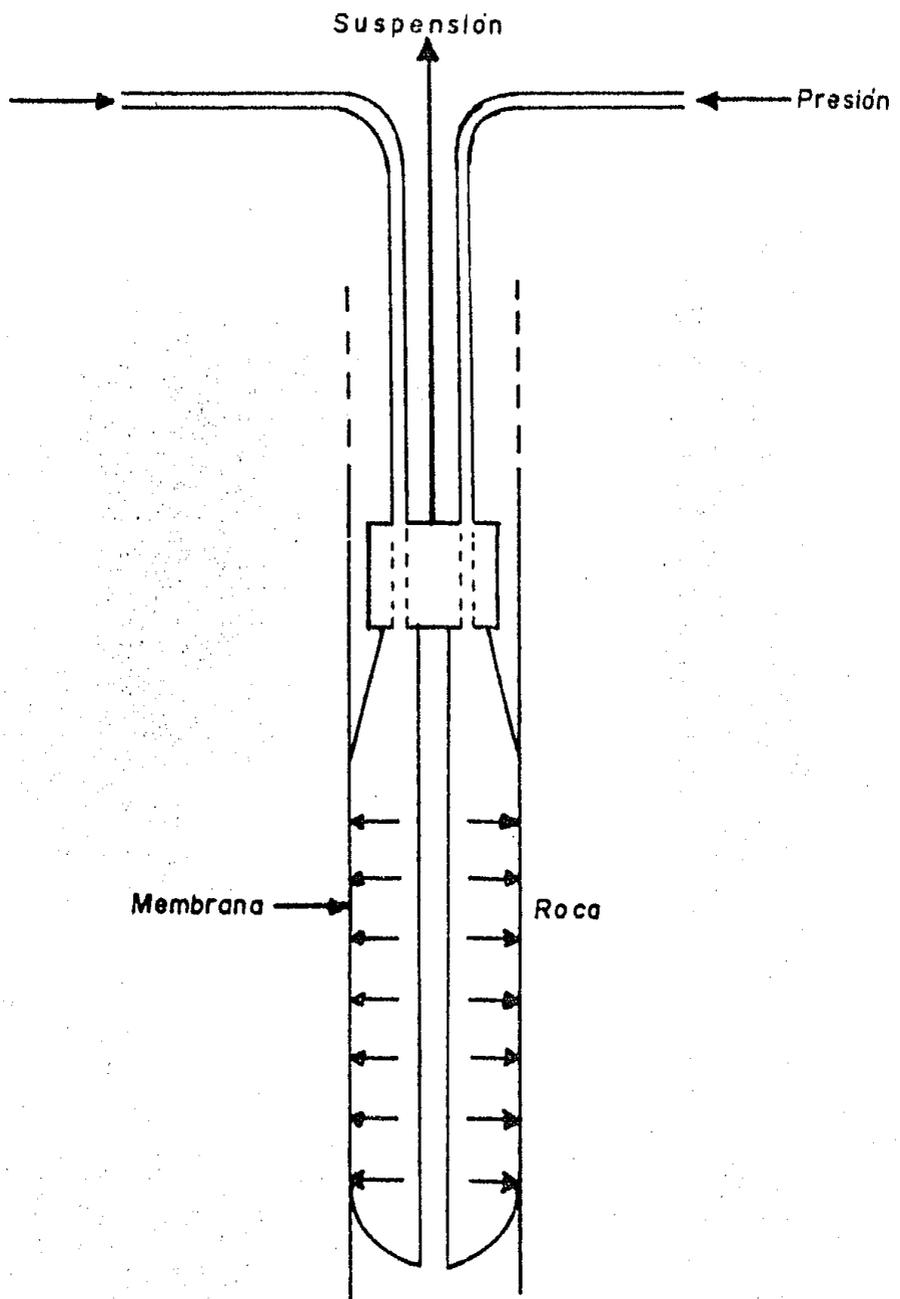
EN OCASIONES SE APLICA UN RECUBRIMIENTO DE CONCRE  
TO AL TUNEL, CON EL FIN DE GARANTIZAR EN MAYOR ME  
DIDA EL BUEN COMPORTAMIENTO DEL MISMO DURANTE LA  
PRUEBA EN TAL CASO SE PROPONE LA SIGUIENTE EXPRE-  
SION PARA CALCULAR EL MODULO DE ELASTICIDAD DE LA  
ROCA :

$$E = \frac{PD}{\Delta D} - \frac{2E}{D} E_c \quad \dots \quad 4.28$$

EN DONDE E ES EL ESPESOR DEL ANILLO,  $E_c$  EL MODULO  
DE DEFORMABILIDAD DEL CONCRETO Y LAS DEMAS LITERA  
LES YA HAN SIDO DEFINIDAS.

#### - PRUEBA DEL DILATOMETRO.

ES POSIBLE INVESTIGAR CON CIERTA EXACTITUD LOS  
PARAMETROS DE DEFORMABILIDAD DE LA ROCA POR ME-  
DIO DE LOS APARATOS LLAMADOS DILATOMETROS, QUE



Principio de funcionamiento del deformímetro

Figura Nº4.6

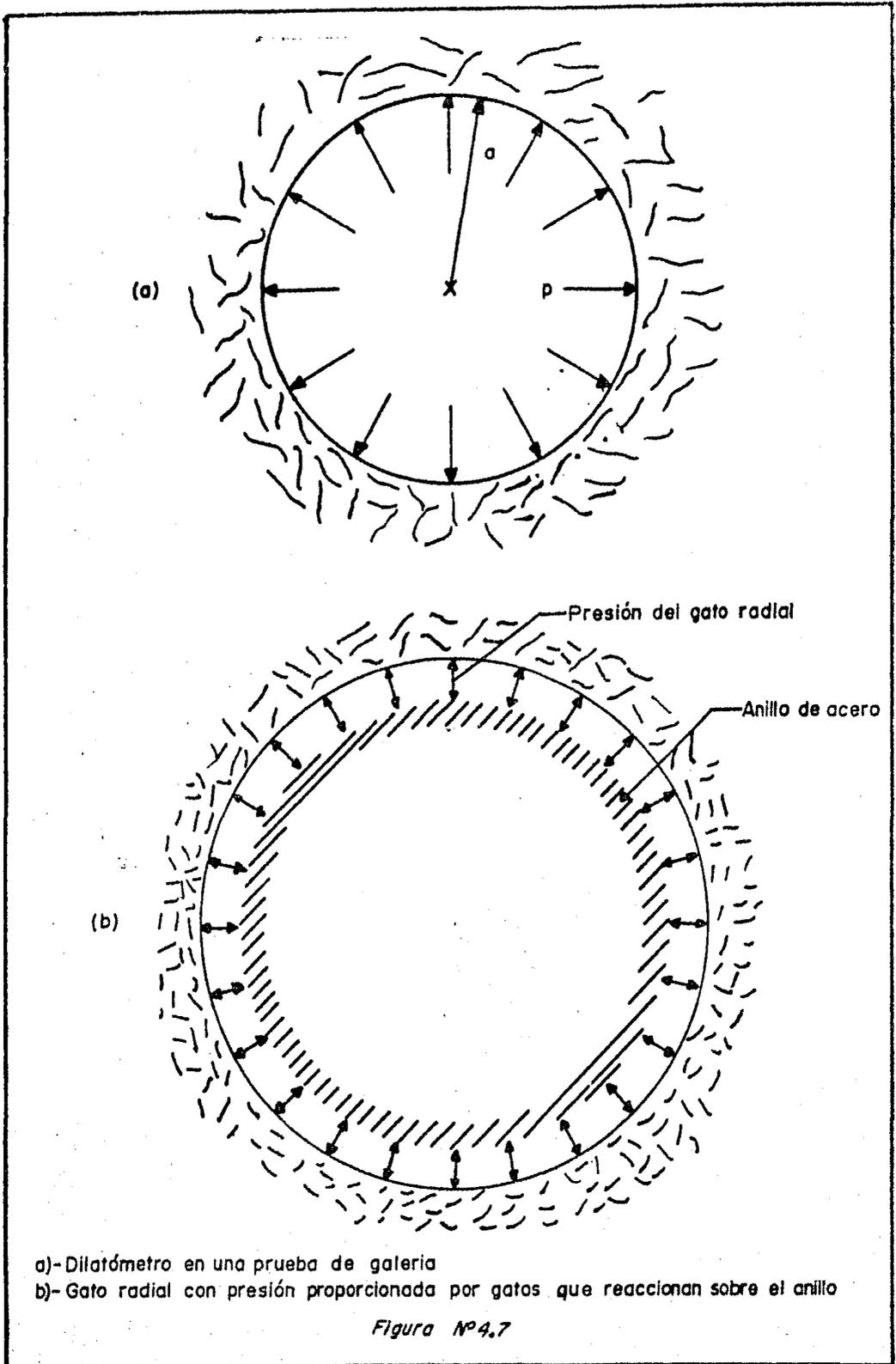
SON DISPOSITIVOS BASICAMENTE FORMADOS POR UNA -  
MEMBRANA DIVIDIDA EN DOS PARTES IGUALES.

ESTE DISPOSITIVO ES INSERTADO EN LA PERFORACION DE UN SONDEO PREVIO, VER FIGURA 4.6. HECHO ESTO SE LLENA LA MEMBRANA CON ACEITE Y SE LE APLICA PRESION, ESTA PRESION HACE QUE LA MEMBRANA SE APOYE SOBRE LA PARED DE LA ROCA COMUNICANDOLE A SU VEZ LA PRESION, OBVIAMENTE DICHA PRESION OCASIONA EN LA ROCA UNA DEFORMACION QUE ES REGISTRADA MEDIANTE UN TRANSDUCTOR MUY SENSIBLE. LA DEFORMACION ASI MEDIDA ES USADA CONJUNTAMENTE CON LA PRESION APLICADA, LAS CARACTERISTICAS GEOMETRICAS PARA CALCULAR EL MODULO DE ELASTICIDAD. LA EXPRESION GENERALMENTE PROPUESTA PARA ESTO ES LA MISMA QUE PARA LA PRUEBA DE LA GALERIA YA QUE EN SI ES LA MISMA SOLO CAMBIA LA ESCALA A QUE SE REALIZA.

#### - PRUEBA DEL GATO RADIAL.

DEBIDO A QUE EN LA MEDIDA QUE SEA AFECTADA LA MASA DE ROCA DURANTE UNA PRUEBA SERA TAMBIEN LA CONFIABILIDAD DE LA MISMA, SE HA DESARROLLADO UN APARATO QUE PRETENDE AFECTAR UNA GRAN PORCION DE ROCAS DURANTE LA APLICACION DE CARGAS RADIALES, VER FIGURA 4.7. LA PRUEBA EN SI ES SIMILAR A LA DE LA GALERIA SOLO QUE EN ESTE CASO EL PERIODO DE PREPARATIVOS ES MENOR, TODO EL EQUIPO ES RECUPERABLE Y EL FLUIDO PRESURIZADO NO ESTA EN CONTACTO CON LA ROCA DURANTE LA PRUEBA.

EL EQUIPO DEL GATO RADIAL CONSISTE DE UN CONJUN



a)-Dilatómetro en una prueba de galería

b)-Gato radial con presión proporcionada por gatos que reaccionan sobre el anillo

Figura Nº4.7

TO DE ANILLOS DE ACERO ESTRUCTURAL CON GATOS -- PLANOS SUJETOS EN EL PERIMETRO EXTERIOR DE ELLOS, QUE SE INSTALA EN UNA EXCAVACION CUIDADOSAMENTE HECHA DE 2-6 M DE DIAMETRO. DIECISEIS GATOS - PLANOS DE 2.4 M DE LARGO POR 0.406 M DE ANCHO - SON UNIDOS A LOS ANILLOS, OCHO ANILLOS DE ALUMI NIO SIRVEN PARA DISTRIBUIR LA CARGA A LOS ANI-- LLOS DE ACERO. CADA ANILLO SE COMPONE DE CUA-- TRO SEGMENTOS ATORNILLADOS ENTRE LOS ANILLOS Y LOS GATOS PLANOS SE CENTRAN DENTRO DE LA EXCAVA CION, SUSPENDIDOS MEDIANTE UNA ESTRUCTURA Y EL- ESPACIO QUE QUEDA ENTRE ESTOS Y LA ROCA ES LLE- NADO DE CONCRETO. POR ULTIMO SE PROCEDE A PRE- SURIZAR LOS GATOS, LLEVANDO AL MISMO TIEMPO UN REGISTRO DE LAS DEFORMACIONES PARA QUE CON E- - LLAS, COMO EN EL CASO DE LA CAMARA DE PRESION - SE CALCULE EL MODULO DE ELASTICIDAD.

#### 4.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS METODOS.

ES DIFICIL EVALUAR LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS QUE UN CIERTO METODO REVISTE YA QUE EN GENERAL HAY VA RIACIONES DE PUNTO A PUNTO PARA LA REALIZACION DE UNA PRUEBA, NO OBSTANTE ES LA PRUEBA DE PLACA LA- QUE MAYOR UTILIZACION REGISTRA. LA PRINCIPAL VEN- TAJA Y POR ENDE EL MOTIVO DE LA GRAN FRECUENCIA - CON QUE SE USA RADICA EN LA ECONOMIA YA QUE LA -- REALIZACION PUEDE HACERSE DE MUCHAS Y MUY DISTIN- TAS MANERAS, PERO EN CONTRAPOSICION TIENE LA DES- VENTAJA DE QUE EL VOLUMEN DE ROCA QUE SE PUEDE A- FECTAR ES MUY PEQUEÑO RESPECTO A LAS DIMENSIONES- QUE GENERALMENTE PRESENTA EL MACIZO ROCOSO.

HABLANDO DE LA PRUEBA DEL GATO PLANO PODEMOS APUN- TAR LA VENTAJA DE SU RAPIDEZ Y ECONOMIA (AUNQUE -

MENOR QUE LA DE LA PRUEBA DE PLACA) A LA QUE SE --  
UNE LA POSIBILIDAD DE DETERMINAR DURANTE LA MISMA  
PRUEBA DATOS QUE POSTERIORMENTE NOS LLEVEN A LA --  
DETERMINACION DEL ESTADO DE ESFUERZOS. ÉSTE PRO-  
CEDIMIENTO TAMBIEN ADOLECE DEL DEFECTO DE AFECTAR  
UNA PORCION REDUCIDA DE ROCA.

EN LO QUE RESPECTA A LA PRUEBA DE LA CAMARA DE --  
PRESION SE CUENTA CON LA GRAN VENTAJA DE QUE SE A  
FECTA UN GRAN VOLUMEN DE ROCA LO QUE HACE MAS CON-  
FIABLE LA PRUEBA, PERO PRESENTA EL INCONVENIENTE-  
DE QUE REQUIERE DE UN TIEMPO CONSIDERABLE LO QUE-  
LA LLEVA A SU VEZ A ELEVAR EL COSTO EN FORMA AGU-  
DA.

LA PRUEBA DEL DILATOMETRO POR SU PARTE ES EN SI --  
UNA PRUEBA DE CAMARA DE PRESION A DIMENSIONES MUY  
REDUCIDAS LO QUE NOS LLEVA A UN BAJO COSTO QUE SE  
AUNA A UN VOLUMEN DE ROCA AFECTADA MUY PEQUEÑO, --  
QUE COMO YA HEMOS VISTO REDUCE LA CONFIABILIDAD --  
DE LOS DATOS.

SI HABLAMOS DEL GATO RADIAL DEBEMOS MENCIONAR QUE  
ESTA PUREBA SE APROPIA DE LAS VENTAJAS DE LA CAMA  
RA DE PRESION PERO CON LA VENTAJA DE UNA REDUC- --  
CION MUY SIGNIFICATIVA EN LOS COSTOS, Y SI ESTO --  
NO FUERA SUFICIENTE TAMBIEN SE TIENE OTRA : TODG-  
EL EQUIPO ES RECUPERABLE Y SUSCEPTIBLE DE SER USA  
DO MUCHAS VECES.

EN SU CONJUNTO PODEMOS MENCIONAR LA VENTAJA DE --  
QUE DE ALGUNA MANERA UNA U OTRAS PERMITEN CONOCER  
LA DEFORMABILIDAD DE LA ROCA, PERO LO QUE TAMBIEN  
ES COMUN A TODOS ES QUE SEA CUAL SEA EL METODO --  
USADO, PARA SER USADO SE HACE NECESARIO ABRIR SO-  
COVANES, TUNELES O GALERIAS QUE ALTERAN EN GRAN --

MEDIDA LAS PROPIEDADES DEL MACIZO POR LO QUE ESTE HECHO DEBE SER TOMADO EN CONSIDERACION PARA CUALQUIER ESTIMACION.

RESPECTO A LOS METODOS GEOSISMICOS, ESTOS SON MUY UTILES Y PRESENTAN LA VENTAJA DE ALTERAR MUY POCO EL ESTADO NATURAL DE LA ROCA LO CUAL LOS HACE DESEABLES Y MUY USADOS, YA QUE A ESTO SE UNE LA CARACTERISTICA DE RAPIDEZ Y ECONOMIA.

## 5. ESFUERZOS NATURALES.

### 5.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL ESTADO DE ESFUERZO NATURAL. PARA COMENZAR ESTA PARTE DEFINIREMOS LO QUE DEBEMOS ENTENDER POR ESFUERZOS NATURALES.

POR ESFUERZOS NATURALES ENTENDEREMOS EL ESTADO DE ESFUERZOS QUE GUARDA UNA MASA DE ROCA HASTA EL MOMENTO EN QUE EMPIEZA LA EJECUCION DE LA OBRA. OBTENIENDO ESTE ESTADO SERA VARIABLE DE PUNTO A PUNTO DENTRO DE LA MASA ROCA.

PRINCIPALMENTE SON TRES LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN EL ESTADO DE ESFUERZOS DE UNA MASA DE ROCA.

EL PRIMERO DE ELLOS ES EL PESO PROPIO DE LA ROCA.

EN MECANICA DE SUELOS ES GENERALMENTE ACEPTADO, QUE EL ESFUERZO NORMAL SEA DEFINIDO POR UNA FUNCION LINEAL DEL PESO VOLUMETRICO DEL MATERIAL, EN EL CASO DE LA MECANICA DE ROCAS ESTO ES ACEPTADO TAMBIEN AUNQUE EN OCASIONES NO RESULTA CONGRUENTE CON LOS RESULTADOS QUE SE OBTIENEN EN CAMPO.

EN SEGUNDO LUGAR, TENEMOS LA ACCION DE LOS MOVIMIENTOS TECTONICOS. ESTOS PUEDEN EN OCASIONES CREAR ESTADOS DE ESFUERZOS EN LOS QUE EL ESFUERZO

$\sigma_3$  SEA MUCHO MAYOR QUE EL ESFUERZO VERTICAL AUN A PROFUNDIDADES MUY GRANDES. TAMBIEN EXISTE LA POSIBILIDAD DE QUE EL ESTADO ASI GENERADO SEA POTENCIALMENTE PELIGROSO YA QUE AL INICIAR UNA EXCAVACION PUEDE FACILITARSE LA LIBERACION DE ESTOS ESFUERZOS CON UN RIESGO MUY ALTO PARA EL PERSONAL QUE LABORE EN ELLAS.

EN TERCER LUGAR, PODEMOS CITAR LA HISTORIA GEOLOGICA DEL MACIZO. AQUI QUEDARIAN INCLUIDOS LOS ASPECTOS DE EROSION INTEMPERIZACION Y METAMORFISMO QUE PUEDEN CON EL TIEMPO IR MODIFICANDO EL ESTADO

DE LOS ESFUERZOS ORIGINAL. VEAMOS UN EJEMPLO, --  
IMAGINEMOS UNA ROCA INALTERADA  $\sigma_1 > \sigma_3$  PARA  
CUALQUIER PROFUNDIDAD, CON EL PASO DEL TIEMPO EL  
CAUCE DE UNA CORRIENTE EROSIONA ESTA ROCA, ENTON-  
CES EL ESTADO DE ESFUERZOS SE VA A MODIFICAR HAS-  
TA TOMAR UNA CONFIGURACION COMO LA QUE SE MUESTRA  
EN LA FIGURA (5.1).

LOS FACTORES ANTES MENCIONADOS SON LOS PRINCIPA--  
LES AUNQUE NO LOS UNICOS, A MANERA DE GENERALIZA-  
CION PODEMOS CITAR ENTRE OTROS A LA EXISTENCIA DE  
BOLSAS DE GAS, AGUA, PETROLEO, CAVERNAS, ETC.

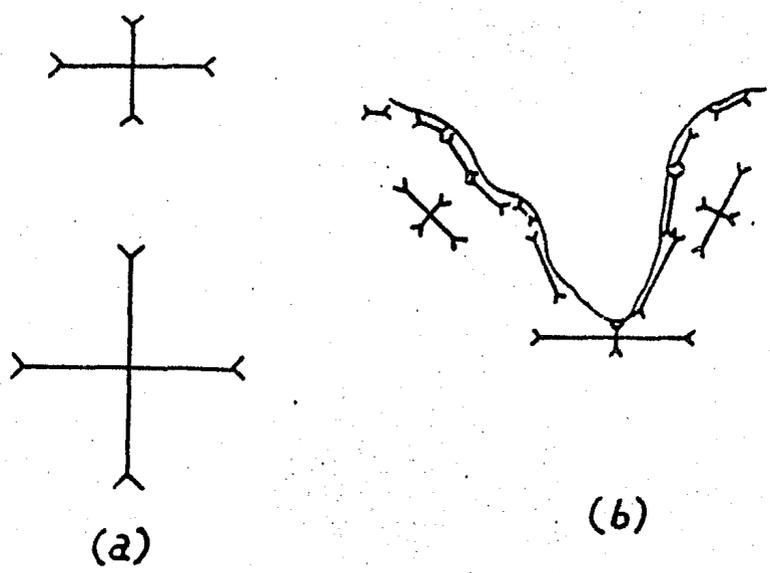
YA SABEMOS QUE SON TRES FACTORES LOS QUE INFLUYEN  
PRINCIPALMENTE EN EL ESTADO DE ESFUERZOS DE UNA -  
MASA DE ROCA. TAMBIEN SABEMOS QUE SU INFLUENCIA--  
ES VARIABLE Y QUE ADEMAS PUEDEN EXISTIR OTROS. EN  
ESTAS CONDICIONES ES IMPOSIBLE ESTIMAR EL ESTADO-  
DE ESFUERZOS DEL MACIZO SIN HACER PRUEBAS DE CAM-  
PO, COSA QUE EN MECANICA DE SUELOS SI ES POSIBLE.

## 5.2 ESFUERZOS VERTICALES Y ESFUERZOS HORIZONTALES.

NO OBSTANTE QUE SE HAN DADO ARGUMENTOS QUE INDI--  
CAN LA IMPOSIBILIDAD DE EVALUAR EL ESTADO DE ESFUER-  
ZOS EN UNA MASA DE ROCA, SIN HABER PREVIAMENTE HE-  
CHO PRUEBAS EN CAMPO SI EXISTEN PROCEDIMIENTOS --  
TEORICOS QUE PERMITEN ESTIMAR LOS ESFUERZOS VERTI-  
CALES Y HORIZONTALES A PARTIR DEL PESO VOLUMETRI-  
CO DE LA ROCA. VEAMOS.

EL ESFUERZO VERTICAL GENERALMENTE COMO YA SE DIJO  
ES CONSIDERADO COMO EL PESO DE LA ROCA QUE SE EN-  
CUENTRA ARRIBA DEL PUNTO EN CUESTION COMO PROME--  
DIO SE TIENEN 0.027 MPa/m O 1.2 ps1/f Y QUE VIE--  
NEN DADOS POR LA FUNCION :

MEMORIA DE LA COMISIÓN



La influencia de la topografía en los esfuerzos iniciales

Figura. Nº 5.1

$$\sigma_p = \gamma Z \dots 5.1$$

DONDE :

$\gamma$  = PESO VOLUMETRICO DEL MATERIAL.

Z = PROFUNDIDAD A LA QUE SE EVALUA EL ESFUERZO.

P = ESFUERZO VERTICAL A LA PROFUNDIDAD Z.

ESTA REGLA ESTA SOPORTADA POR NUMEROSAS MEDICIONES DE CAMPO Y ES UNA DE LAS MAS CONFIABLES, SIN EMBARGO PUEDE NO CUMPLIRSE DEBIDO A LOS EFECTOS DE LAS ESTRUCTURAS GEOLOGICAS DE LA ZONA. LA FIGURA (5,2) MUESTRA COMO LOS ESFUERZOS VERTICALES VARIAN A LO LARGO DE LOS PLANOS HORIZONTALES QUE CORTAN LA MASA DE ROCA AA' LOS ESFUERZOS VARIAN QUIZA 60% MAYORES QUE  $\gamma Z$  BAJO EL SINCLINAL A CERO JUSTO DEBAJO DEL ANTICLINAL PUES LA CAPA MAS RIGIDA SIRVE DE PROTECCION Y HACE EL EFECTO DE UN ARCO.

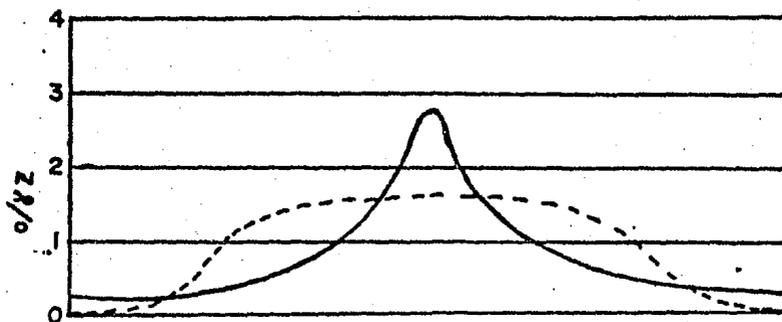
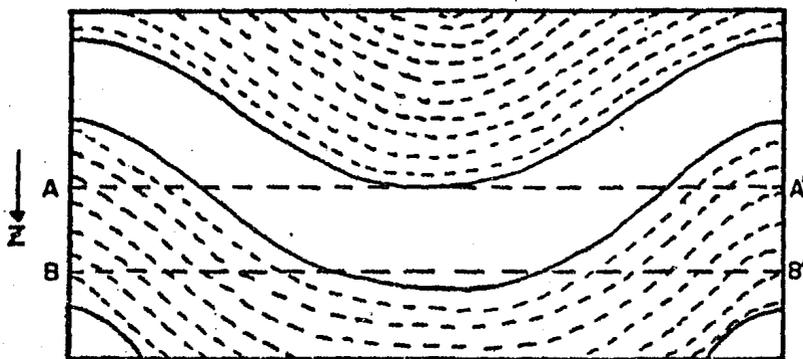
ESFUERZOS HORIZONTALES.

ES DE ACEPTACION GENERALIZADA DECIR QUE ENTRE EL ESFUERZO HORIZONTAL Y EL ESFUERZO VERTICAL SE TENGA UNA PROPORCIONALIDAD, MISMA QUE PODEMOS EXPRESAR DE LA SIGUIENTE MANERA :

$$K = \frac{\sigma_N}{\sigma_V} \quad \text{o} \quad \sigma_N = K \sigma_V \dots 5.2$$

DE LA TEORIA DE LA ELASTICIDAD TENEMOS QUE :

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_V} = \frac{\mu}{(1-\mu)} \dots 5.3$$



La influencia de los pliegues de las capas de roca heterogeneas sobre los esfuerzos verticales

Figura Nº 5.2

CONSIDEREMOS UN ELEMENTO DE ROCA UBICADO A LA PROFUNDIDAD  $Z_0$  CON UN VALOR DE  $K = K_0$ . AHORA, EFECTUEMOS UNA DESCARGA REMOVIENDO UNA CAPA DE MATERIAL DE ESPESOR  $AZ$ , COMO SE APRECIA EN LA FIGURA (5.3). DEBIDO A LA DESCARGA EL ESFUERZO HORIZONTAL SE REDUCIRA EN :

$$Z \cdot \frac{\mu}{1 - \mu}$$

ASIMISMO, DESPUES DE LA EROSION DE UN ESPESOR DE ROCA IGUAL A  $Z$ , LOS ESFUERZOS HORIZONTALES A LA PROFUNDIDAD  $Z = Z_0 - AZ$  SERAN IGUAL A :

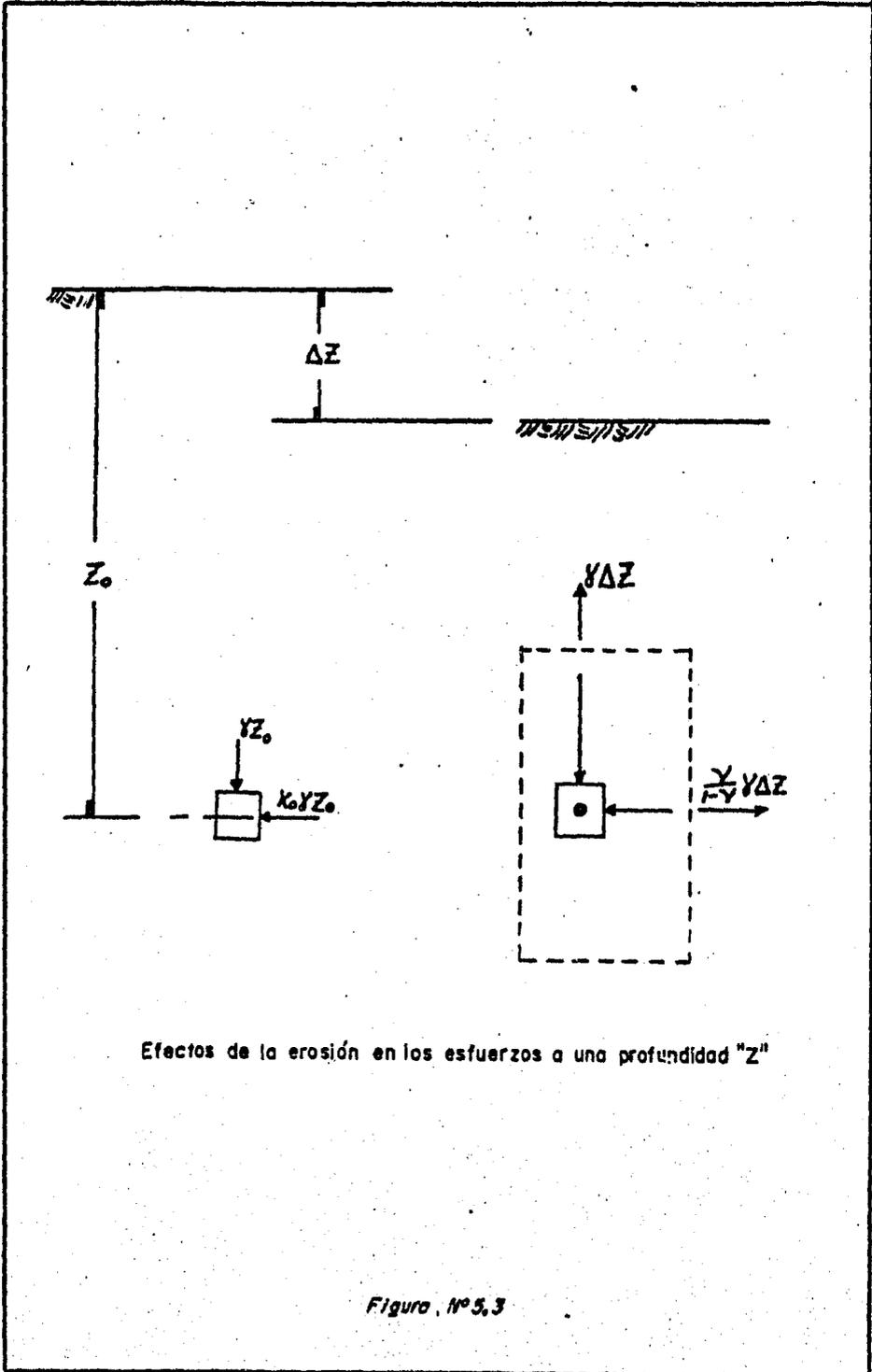
$$\sigma_H = K_0 \gamma Z_0 - \gamma Z \frac{\mu}{1 - \mu}$$

ENTONCES

$$K(Z) = K_0 + \left[ \left( K_0 - \frac{\mu}{1 - \mu} \Delta Z \right) \frac{1}{Z} \right] \dots \quad 5.4$$

COMO SE PUEDE APRECIAR LA EROSION Y EN GENERAL UNA DESCARGA PAULATINA DEL MATERIAL CONLLEVA UN AUMENTO EN  $K$  CON LO QUE EL ESFUERZO HORIZONTAL VENDRA A SER MAS GRANDE QUE EL VERTICAL A PROFUNDIDADES MENORES QUE EN CIERTO VALOR. MIENTRAS QUE EL ESFUERZO HORIZONTAL ESTA DADO POR  $\gamma Z$ , EL HORIZONTAL DEBE HALLARSE EN EL RANGO DE VALORES CUYOS EXTREMOS SON  $K_A \sigma_V$  Y  $K_P \sigma_V$

COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA (5.4)  $K_A$  CORRESPONDE



Efectos de la erosión en los esfuerzos a una profundidad "Z"

Figura, Nº 5.3

A LA CONDICION DE FALLA NORMAL FIGURA (5.4) EN LA CUAL LOS ESFUERZOS VERTICALES SON MAXIMOS Y ADEMÁS PRINCIPALES. CONSIDERANDO LA LEY DE COULOMB.

$$K_A = \text{CTN}^2 \left(45 + \frac{\emptyset}{2}\right) - \left[\frac{QU}{\gamma} \text{CTN}^2 \left(45 + \frac{\emptyset}{2}\right)\right] \frac{1}{Z} \dots 5.5$$

$K_P$ , CORRESPONDE A LA CONDICION DE FALLA INVERSA - EN LA CUAL EL ESFUERZO VERTICAL ES EL MENOR DE LOS PRINCIPALES Y LA FALLA OCURRE POR COMPRESION-HORIZONTAL FIGURA (5.4).

$$K_P = \text{TG}^2 \left(45 + \frac{\emptyset}{2}\right) + \frac{QU}{\gamma} \frac{1}{Z} \dots 5.6$$

VALORES DE ESOS ESFUERZOS HORIZONTALES SON TABULADOS EN LA TABLA (5.1) PARA UNA ROCA. SI NO EXISTE FALLA EL RANGO DE LOS POSIBLES VALORES DE  $K$  ES MUY AMPLIO, SIN EMBARGO CERCA DE UNA FALLA PREEXISTENTE, QU PUEDE CONSIDERARSE NULO Y EL INTERVALO DE  $K$  SE REDUCE CONSIDERABLEMENTE.

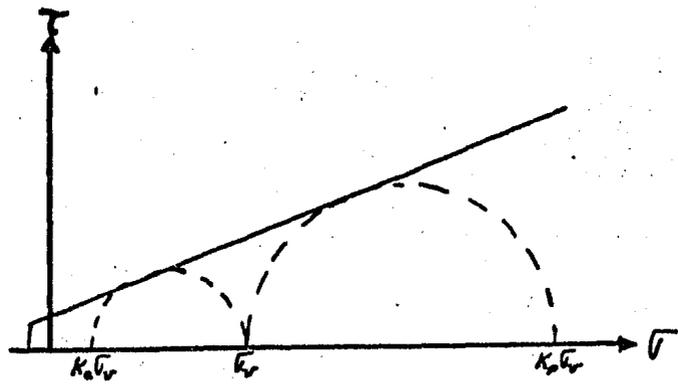
BROWN Y HOCK EXAMINARON UNOS VALORES DE ESFUERZOS MEDIDOS IN-SITU Y LLEGARA A UNA RELACION HIPERBOLICA PARA LOS LIMITES DE  $K(Z)$  QUE ES LA SIGUIENTE:

$$0.3 - \frac{100}{Z} < K < 0.5 \frac{1500}{Z} \dots 5.7$$

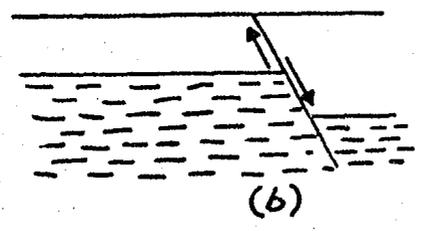
DONDE  $Z$  ES LA PROFUNDIDAD EN METROS,  $K$  ES LA RELACION ENTRE EL PROMEDIO DE LOS ESFUERZOS HORIZONTALES A LOS VERTICALES.

EN NINGUN CASO, LAS ECUACIONES PROPUESTAS PARA  $K(Z)$  Y LOS DATOS DE MEDICIONES SON CONSISTENTES.

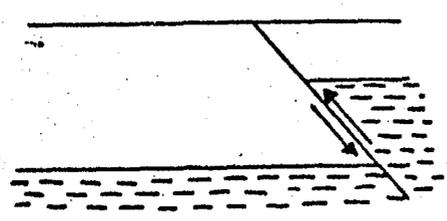
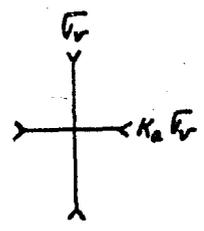
ASI SIN MEDICIONES UNO PUEDE ESTIMAR DENTRO DE --



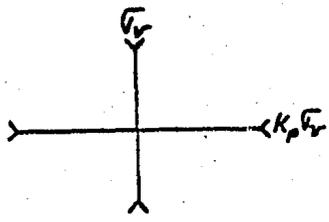
(a)



(b)



(c)



Esfuerzo normal inicial requerido para fallas inversas

Figura N°5.4

CIERTOS LIMITES, LA VARIACION DE LOS ESFUERZOS HO RIZONTALES CON LA PROFUNDIDAD. MIENTRAS QUE LA - MAGNITUD DE ELLOS SOLO PUEDE SER ESTIMADA APROXI- MADAMENTE.

### 5.3 METODOS PARA MEDIR ESFUERZOS NATURALES "IN-SITU".

SE HA DICHO QUE UNO DE LOS PRINCIPALES PROBLEMAS- DE LA INGENIERIA ES GARANTIZAR QUE LAS ESTRUCTU-- RAS QUEDEN DURANTE SU VIDA UTIL EN UN ESTADO DE - ESFUERZOS QUE NO SIGNIFIQUE LA IMPOSIBILIDAD DE -- CUMPLIR LA FUNCION PARA LA QUE FUERON CREADAS. -- LAS ROCAS SON MATERIALES EN LOS QUE NO ES FACIL - PREDECIR EL ESTADO EN QUE SE ENCUENTRAN RESPECTO- A ESFUERZOS EN UN DETERMINADO MOMENTO, SIN EMBAR- GO SU CONOCIMIENTO SE HACE NECESARIO, POR TAL MO- TIVO SE HAN DESARROLLADO METODOS QUE PERMITAN DIS- PONER DE INFORMACION AL RESPECTO.

SON EN GENERAL TRES LOS METODOS MAS USADOS, ESTOS, SON LOS SIGUIENTES :

- 1.- METODO DE RELAJACION DE ESFUERZOS.
- 2.- METODO DE FRACTURACION HIDRAULICA.
- 3.- METODO DE GATO PLANO.

#### METODO DE RELAJACION DE ESFUERZOS.

UNO DE LOS METODOS MAS CONFIABLES Y POR ENDE MAS- USADOS ES EL LLAMADO DE RELAJACION DE ESFUERZOS. - BASANDOSE EN LA MEDICION DE DEFORMACIONES Y CON A YUDA DE LA TEORIA DE LA ELASTICIDAD SE PUEDEN CO- NOCER EL ESTADO DE ESFUERZOS EN UN PUNTO DE UNA - MASA ROCOSA.

ECUACIONES PARA LA TRANSFORMACION DE LA DEFORMA--

CION PLANA.

CONSIDERACIONES.

- 1.- LAS DEFORMACIONES LINEALES  $E_x$  Y  $E_y$  CORRESPONDIENTES A LAS DIRECCIONES X Y Y RESPECTIVAMENTE SON POSITIVAS.
- 2.- LA DEFORMACION DEBIDA A CORTANTE SE CONSIDERA POSITIVA SI ALARGA UNA DIAGONAL QUE TENGA PENDIENTE POSITIVA EN EL PLANO X Y, VEASE FIGURA 5.5

AHORA CONSIDEREMOS QUE LAS DEFORMACIONES  $E_x$ ,  $E_y$ , -  
XY ASOCIADOS CON LOS EJES X Y Y, SON CONOCIDOS Y  
QUE SE REQUIERE CONOCER UNA DEFORMACION LINEAL A  
LO LARGO DEL NUEVO EJE  $X'$ .

EL NUEVO SISTEMA DE EJES  $x'$  Y  $y'$ , ESTA RELACIONADO  
CON EL XY COMO SE VE EN LA FIGURA (5.6) EN ES-  
TAS CONDICIONES SE PUEDE CONSIDERAR QUE EL SEGMENTO  
OA DE LONGITUD  $dx'$  ES UNA DIAGONAL DE UN ELE-  
MENTO RECTANGULAR DIFERENCIAL DE DIMENSIONES  $dx$ , -  
 $dy$  EN LAS COORDENADAS INICIALES.

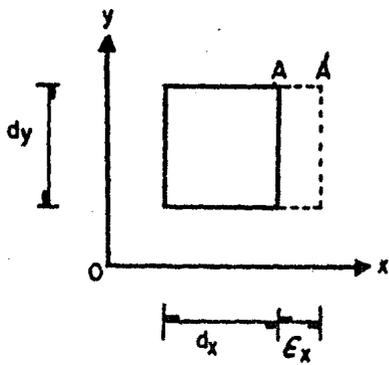
SUPONIENDO QUE EL PUNTO O ESTA FIJO EN EL ESPACIO,  
SE PUEDEN CALCULAR CON UNA BASE DIFERENTE EN LOS-  
DOS SISTEMAS COORDENADOS LOS DESPLAZAMIENTOS DEL  
PUNTO A CAUSADOS POR LAS DEFORMACIONES IMPUESTAS,  
ASI, TENEMOS LOS SIGUIENTES DESPLAZAMIENTOS.

a) EN X ES  $AA' = E_x dx$  . . . 5.8

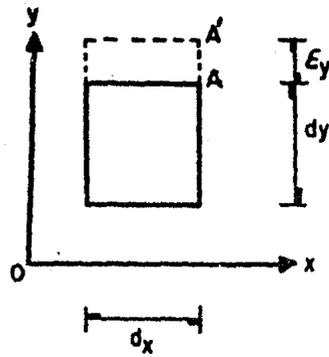
b) EN Y ES  $A'A'' = E_y dy$  . . . 5.9

c) CONSIDERANDO QUE POR CORTE SE PRODUCE UN DES-  
PLAZAMIENTO HORIZONTAL.

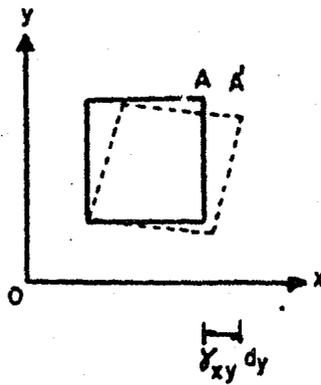
$$\therefore A''A''' = \gamma_{xy} dy \quad . . . \quad 5.10$$



a)-Deformación longitudinal en "x" ( $\epsilon_x$ )



b)-Deformación longitudinal en "y" ( $\epsilon_y$ )



c)-Deformación por cortante ( $\gamma_{xy}$ )

Figura . Nº5.5

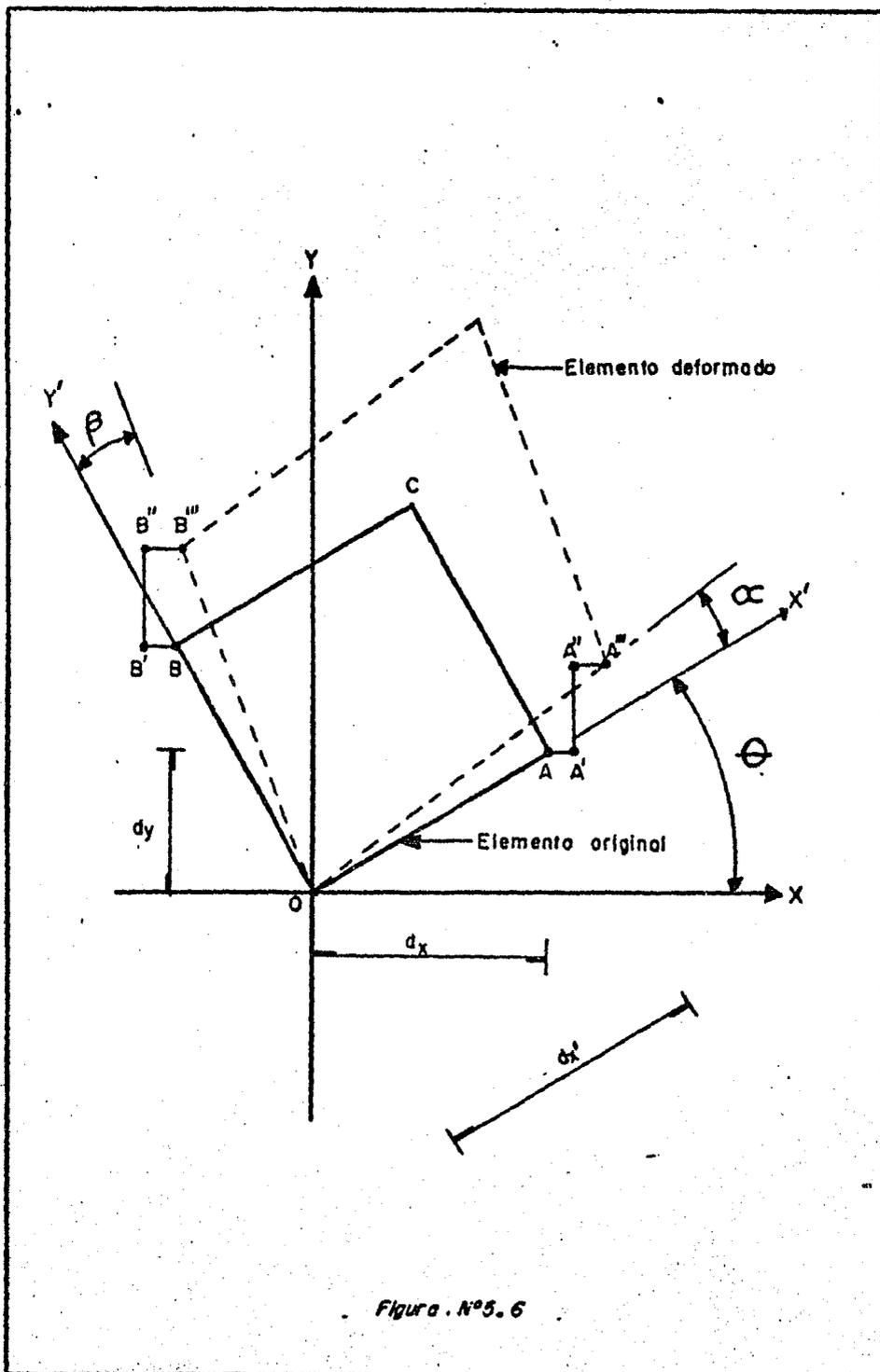


Figura. N°5.6

AL PROYECTAR EL DESPLAZAMIENTO SOBRE EL EJE  $X'$  - SE ENCONTRARA EL DESPLAZAMIENTO DEL PUNTO A A LO LARGO DE ESE EJE.

POR OTRO LADO SABEMOS QUE  $E_{X'} DX'$  EN EL SISTEMA COORDENADO  $X'Y'$  ES TAMBIEN EL ALARGAMIENTO - DE OA ENTONCES SE PUEDE ESTABLECER LA SIGUIENTE IGUALDAD.

$$E_{X'} DX' = AA' \cos \theta - A'A'' \sin \theta - A''A''' \cos \theta$$

$AA'$ ,  $A'A''$ ,  $A''A'''$  REPRESENTAN DESPLAZAMIENTOS - SABEMOS QUE E (DEFORMACION UNITARIA) ES

$$\frac{\text{DESPLAZAMIENTO}}{\text{LONGITUD}} \Rightarrow E = \frac{AA'}{DX} \Rightarrow$$

$$E_{DX} = AA'; \text{ ANALOGAMENTE LAS DEMAS.}$$

SUSTITUYENDO LAS EXPRESIONES APROPIADAS PARA LOS DESPLAZAMIENTOS TENEMOS :

$$E_{X'} DX' = E_X DX \cos \theta - E_Y DY \sin \theta - \gamma_{XY} DY \cos \theta \dots 5.11$$

DIVIDIENDO ENTRE  $DX'$

$$E_{X'} = \frac{E_X DX \cos \theta}{DX'} + \frac{E_Y DY \sin \theta}{DX'} + \frac{\gamma_{XY} DY \cos \theta}{DX'}$$

ADEMAS SABEMOS QUE

$$\frac{DX}{DX'} = \cos \theta$$

$$\frac{DY}{DX'} = \sin \theta \Rightarrow$$

$$Ex' = Ex \cos^2 \theta + Ey \sin^2 \theta + \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta \dots 5.12$$

ESTA ECUACION NOS DA LA DEFORMACION DE UN ELEMENTO EN UNA CIERTA DIRECCION RESPECTO A UN SISTEMA EN EL CUAL SE CONOCEN

$Ex$ ,  $Ey$  Y  $\gamma_{xy}$

LA ECUACION ENCONTRADA SOLO RESUELVE LA MITAD -- DEL PROBLEMA PUES A TODA DEFORMACION LONGITUDINAL ESTA ASOCIADA UNA DEFORMACION ANGULAR POR -- CORTANTE.

POR DEFINICION, LA DEFORMACION ANGULAR, ES EL -- CAMBIO EN EL ANGULO AOB, DE LA FIGURA 5.5, SE A -- PRECIA QUE DICHO CAMBIO ES  $\alpha + \beta$  Y OBIAMENTE ES MUY PEQUEÑO.

PARA DETERMINAR EL ANGULO  $\alpha$  PROYECTAREMOS SOBRE UNA NORMAL A OA LOS DESPLAZAMIENTOS LINEALES ADEMAS COMO EL ANGULO ES MUY PEQUEÑO ESTE ES -- APROXIMADAMENTE IGUAL A SU TANGENTE, ASI AL DIVIDIR LA SUMA DE LAS PROYECCIONES SOBRE LA NORMAL -- ENTRE LA LONGITUD ORIGINAL  $DX'$  OBTENDREMOS LA -- TANGENTE DE  $\alpha$ .

$$\therefore \alpha \approx \text{TG } \alpha = \frac{-AA' \text{ SEN } \theta + A'A'' \text{ COS } \theta - A''A''' \text{ SEN } \theta}{DX'} \dots 5.13$$

SUSTITUYENDO LOS DESPLAZAMIENTOS POR DEFORMACIONES TENEMOS :

$$\alpha \approx \text{TG } \alpha = \frac{-ExDX \text{ SEN } \theta}{DX'} + \frac{EyDY \text{ COS } \theta}{DX'} - \frac{\gamma_{xy}DY \text{ SEN } \theta}{DX'}$$

PERO

$$\frac{DX}{DX'} = \cos \theta \quad \frac{DY}{DY'} = \sin \theta$$

FINALMENTE

$$\alpha' = \text{TG } \alpha = -E_x \cos \theta \sin \theta + E_y \sin \theta \cos \theta - \gamma_{xy} \sin^2 \theta$$

$$\alpha' = \text{TG } \alpha = (E_y - E_x) (\cos \theta \sin \theta) - \gamma_{xy} \sin^2 \theta \dots 5.14$$

ANALOGAMENTE

$$\beta' = \text{TG } \beta = (E_y - E_x) \sin \theta \cos \theta + \gamma_{xy} \cos^2 \theta \dots 5.15$$

POR LO TANTO, YA QUE LA DEFORMACION ANGULAR POR CORTE -

$\delta$  X' Y' DE UN ANGULO COMPENDIDO ENTRE LOS EJES -

X' Y' ES  $\alpha + \beta$  , SE TIENE LO SIGUIENTE:

$$\gamma_{x'y'} = (E_y - E_x) \sin\theta \cos\theta - \gamma_{xy} \sin^2\theta + (E_y - E_x) \sin\theta \cos\theta + \gamma_{xy} \sin^2\theta$$

$$\gamma_{x'y'} = 2(E_y - E_x) \sin\theta \cos\theta + \gamma_{xy} \cos^2\theta - \gamma_{xy} \sin^2\theta$$

$$\gamma_{x'y'} = 2(E_y - E_x) \sin\theta \cos\theta + \gamma_{xy} (\cos^2\theta - \sin^2\theta)$$

γ POR ULTIMO

$$\gamma_{x'y'} = (E_y - E_x) \sin 2\theta + \gamma_{xy} \cos 2\theta \dots 5.16$$

REDUCIENDO TRIGONOMETRICAMENTE LA EXPRESION

$$E_{x'} = E_x \cos^2\theta + E_y \sin^2\theta + \gamma_{xy} \sin\theta \cos\theta$$

SE PUEDE ESCRIBIR DE LA SIGUIENTE MANERA :

$$E_{x'} = \frac{E_x + E_y}{2} + \frac{E_x - E_y}{2} \cos 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta \dots 5.17$$

CON LO QUE TENEMOS DOS EXPRESIONES QUE NOS DEFINIRAN EL ESTADO DE DEFORMACIONES EN UNA DIRECCION CUALQUIERA RESPECTO A UN EJE DADO CUANDO SE CONOCEN LAS DEFORMACIONES  $E_x$ ,  $E_y$  Y  $\gamma_{xy}$  EN ESE EJE.

A CONTINUACION DESCRIBIREMOS BREVEMENTE EL PROCESO.

EL METODO CONSISTE BASICAMENTE EN HACER UN ORIFICIO EN LA ROCA QUE PERMITA LA DEFORMACION DE LA MISMA EN TODAS DIRECCIONES OBTIENIENDO LAS DEFORMACIONES SERAN DISTINTAS EN DIRECCIONES DISTINTAS. EL PROCEDIMIENTO DE ENSAYE ES EL SIGUIENTE:

DENTRO DE UNA GALERIA SE PULE UNA SUPERFICIE DEJANDOLA PLANA, EN ELLA, SE MARCA UNA CIRCUNFERENCIA SOBRE LA CUAL SE COLOCAN SEIS PIJAS ESPACIADAS IGUALMENTE, A CONTINUACION, SE MIDEN LAS DISTANCIAS ENTRE PUNTOS DIAMETRALMENTE OPUESTOS, ESTA MEDICION DEBE HACERSE CON APARATOS EXTREMADAMENTE SENSIBLES Y CON SUMO CUIDADO YA QUE DE ELLO DEPENDE EN GRAN MEDIDA LA CONFIABILIDAD DE LA PRUEBA. POSTERIORMENTE SE PROCEDE A REALIZAR UNA RANURA ANULAR CONCENTRICA A LA CIRCUNFERENCIA MARCADA PERO CON UN RADIO MAYOR, CON ESTO SE HACE UN CILINDRO DONDE SE LIBERAN LOS ESFUERZOS ACTUANTES, DESPUES DE QUE HA PASADO UN CIERTO TIEMPO SE MIDEN LAS DEFORMACIONES QUE ENTRE LOS PUNTOS DIAMETRALMENTE OPUESTOS CON LO QUE SE TIENEN TRES DEFORMACIONES EN TRES DISTINTAS DIRECCIONES.

POR OTRO LADO, LA TEORIA DE LA ELASTICIDAD COMO HEMOS VISTO NOS PROPORCIONA DOS ECUACIONES PARA TRANSFORMACION DE DEFORMACIONES, UNA PARA DEFORMACIONES LONGITUDINALES Y OTRA PARA DEFORMACIONES ANGULARES, ESTAS ECUACIONES SE PUEDEN ESCRIBIR DE LA SIGUIENTE MANERA :

$$Ex' = \frac{Ex + Ey}{2} + \frac{Ex - Ey}{2} \cos 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta \quad \dots \quad 5.17$$

I

$$x'y' = (Ey - Ex) \sin 2\theta + \gamma_{xy} \cos 2\theta \quad \dots \quad 5.16$$

O BIEN,

$$Ex = Ex \cos^2 \theta + Ey \sin^2 \theta + \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad \dots \quad 5.17'$$

II

$$xy = (Ey - Ex) \sin 2\theta + \gamma_{xy} \cos 2\theta \quad \dots \quad 5.16'$$

SI TENEMOS UNA ROSETA DE DEFORMACIONES COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA (5.7).

UNA VEZ RELAJADOS LOS ESFUERZOS SE TIENE LO SIGUIENTE :

- A) EL PUNTO A SE DESPLAZA AL PUNTO A' EXPERIMENTANDO UNA DEFORMACION EA LINEAL.
- B) EL PUNTO B SE DESPLAZA AL PUNTO B' EXPERIMENTANDO UNA DEFORMACION LINEAL EB.
- C) EL PUNTO C SE DESPLAZA AL PUNTO C' EXPERIMENTANDO UNA DEFORMACION EC.

REFIRIENDONOS AL MISMO SISTEMA COORDENADO XY PODEMOS DECIR LO SIGUIENTE :

$$(1) E_A = E_X \cos^2(0^\circ) + E_Y \sin^2(0^\circ) + \gamma_{XY} \sin 0^\circ \cos 0^\circ \dots 5.18$$

$$(2) E_B = E_X \cos^2(60^\circ) + E_Y \sin^2(60^\circ) + \gamma_{XY} \sin 60^\circ \cos 60^\circ \dots 5.19$$

$$(3) E_C = E_X \cos^2(120^\circ) + E_Y \sin^2(120^\circ) + \gamma_{XY} \sin 120^\circ \cos 120^\circ \dots 5.20$$

DE (1) SE DESPRENDE QUE

$$E_A = E_X \dots 5.18$$

SUSTITUYENDO 5.18 EN 5.19 Y 5.20

$$E_B = E_A \cos^2(60^\circ) + E_Y \sin^2(60^\circ) + \gamma_{XY} \sin 60^\circ \cos 60^\circ$$

$$E_C = E_A \cos^2(120^\circ) + E_Y \sin^2(120^\circ) + \gamma_{XY} \sin 120^\circ \cos 120^\circ$$

HACIENDO OPERACIONES

$$E_B = E_A \frac{1}{4} + E_Y \frac{3}{4} + \gamma_{XY} \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{2}$$

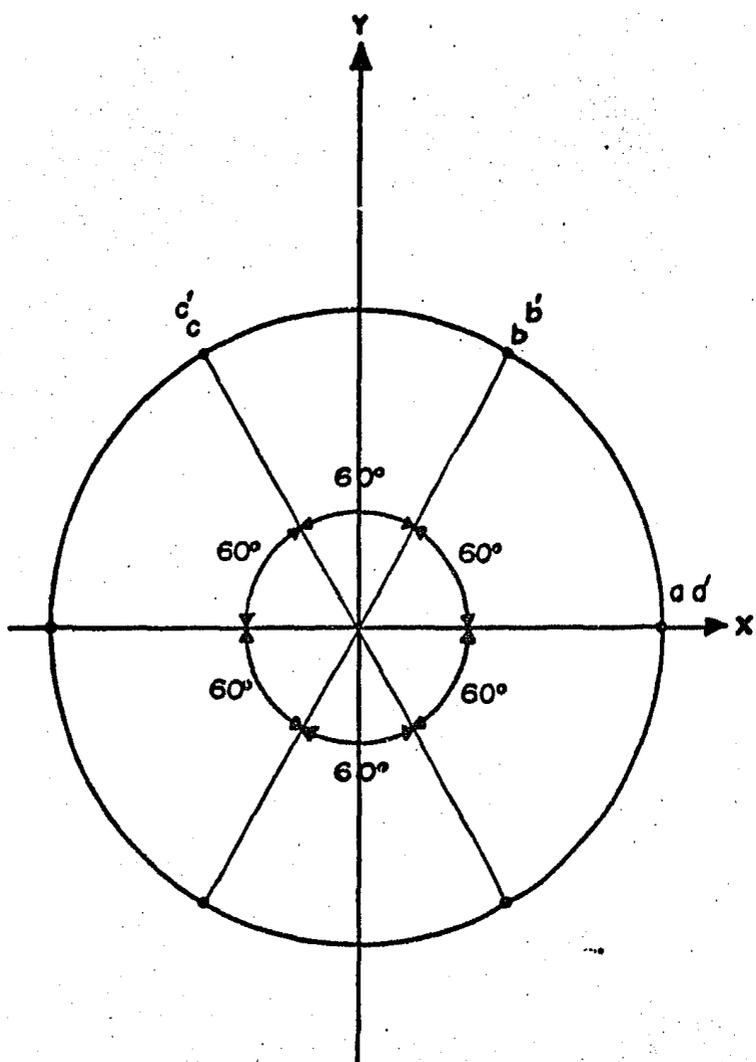


Figura N° 5.7

$$E_C = E_A \frac{1}{4} + E_Y \frac{3}{4} + \gamma_{XY} \frac{\sqrt{3}}{2} \left(-\frac{1}{2}\right)$$

$$E_B = \frac{E_A}{4} + \frac{3}{4} E_Y + \frac{\sqrt{3}}{4} \gamma_{XY}$$

$$E_C = \frac{E_A}{4} + \frac{3}{4} E_Y - \frac{\sqrt{3}}{4} \gamma_{XY}$$

$$\frac{3}{4} \gamma_{XY} = \frac{E_A}{4} + \frac{3}{4} E_Y - E_C \quad \dots \quad 5.21$$

SUSTITUYENDO EN 5.19

$$E_B = \frac{E_A}{4} + \frac{3}{4} E_Y + \left( \frac{E_A}{4} + \frac{3}{4} E_Y - E_C \right)$$

$$E_B = \frac{E_A}{4} + \frac{3}{4} E_Y + \frac{E_A}{4} + \frac{3}{4} E_Y - E_C$$

$$E_B = \frac{1}{2} E_A + \frac{3}{2} E_Y - E_C$$

$$\frac{3}{2} E_Y = E_B + E_C - \frac{1}{2} E_A$$

$$E_Y = \frac{2 (E_B + E_C - \frac{1}{2} E_A)}{3}$$

$$E_Y = \frac{2 E_B + 2 E_C - E_A}{3} \quad 5.22$$

SUSTITUYENDO 5.22 EN 5.21

$$\frac{\sqrt{3}}{4} \gamma_{XY} = \frac{E_A}{4} + \frac{3}{4} \left( \frac{2E_B + 2E_C - E_A}{3} \right) - E_C$$

REDUCIENDO

$$\frac{\sqrt{3}}{4} \gamma_{XY} = \frac{E_A}{4} + \frac{1}{2} E_B + \frac{1}{2} E_C - \frac{1}{4} E_A - E_C$$

$$\frac{\sqrt{3}}{4} \gamma_{XY} = \frac{1}{2} E_B - \frac{1}{2} E_C$$

$$\gamma_{XY} = \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{2} (E_B - E_C)$$

$$\gamma_{XY} = \frac{2}{\sqrt{3}} (E_B - E_C)$$

O BIEN

$$\frac{1}{2} \gamma_{XY} = \frac{1}{\sqrt{3}} (E_B - E_C) \quad 5.23$$

PODEMOS AHORA RESUMIR, QUE DADAS TRES DEFORMACIONES LINEALES EN DIRECCIONES EQUIANGULARES ( $60^\circ$ ) SE PUEDE DEFINIR EL ESTADO DE DEFORMACIONES CON LAS SIGUIENTES ECUACIONES:

$$E_X = E_A \quad 5.18$$

$$E_Y = \frac{2 E_B + 2 E_C - E_A}{3} \quad 5.22$$

$$\frac{1}{2} \gamma_{xy} = \frac{1}{\sqrt{3}} (E_B - E_C) \quad 5.23$$

DONDE  $E_A$ ,  $E_B$  Y  $E_C$  SON LAS DEFORMACIONES LONGITUDINALES --  
EQUIANGULARES DE  $60^\circ$  CADA UNA Y  $E_A$  EN DIRECCION X.

DADO QUE EN EL CIRCULO DE MOHR LOS ANGULOS SON DOBLES, ES  
DECIR SI UN PLANO REAL GIRA UN ANGULO  $\theta$  EN EL CIRCULO DE  
MOHR SE DEBERA GIRAR UN ANGULO  $2\theta$  PARA ENCONTRAR EL PUN-  
TO QUE DEFINA EL ESTADO DE DEFORMACIONES DEL PLANO EN --  
CUESTION POR LO TANTO, LOS PUNTOS  $(E_X, \frac{1}{2} \gamma_{xy})$  Y --

$(E_Y, -\frac{1}{2} \gamma_{xy})$  SON DIAMETRALMENTE OPUESTOS, ADEMAS EL CEN-

TRO DEL CIRCULO DEBE LOCALIZARSE SOBRE EL EJE E. FIGURA --  
5.8. DE LA MISMA FIGURA SE DESPRENDE QUE EL RADIO DEL --  
CIRCULO

$$R = \sqrt{E_A^2 + \left[ \frac{1}{\sqrt{3}} (E_B - E_C) \right]^2}$$

EL CENTRO SE LOCALIZA EN  $\frac{E_X + E_Y}{2}$

SUSTITUYENDO LOS VALORES DE  $E_X$  Y  $E_Y$  EN FUNCION DE LAS DE-  
FORMACIONES MEDIDAS.

$$E_X = E_A ; E_Y = \frac{2E_B + 2E_C - E_A}{3}$$

TENDREMOS :

$$\frac{E_X + E_Y}{2} = \frac{1}{2} \left( E_A + \frac{2E_B + 2E_C - E_A}{3} \right)$$

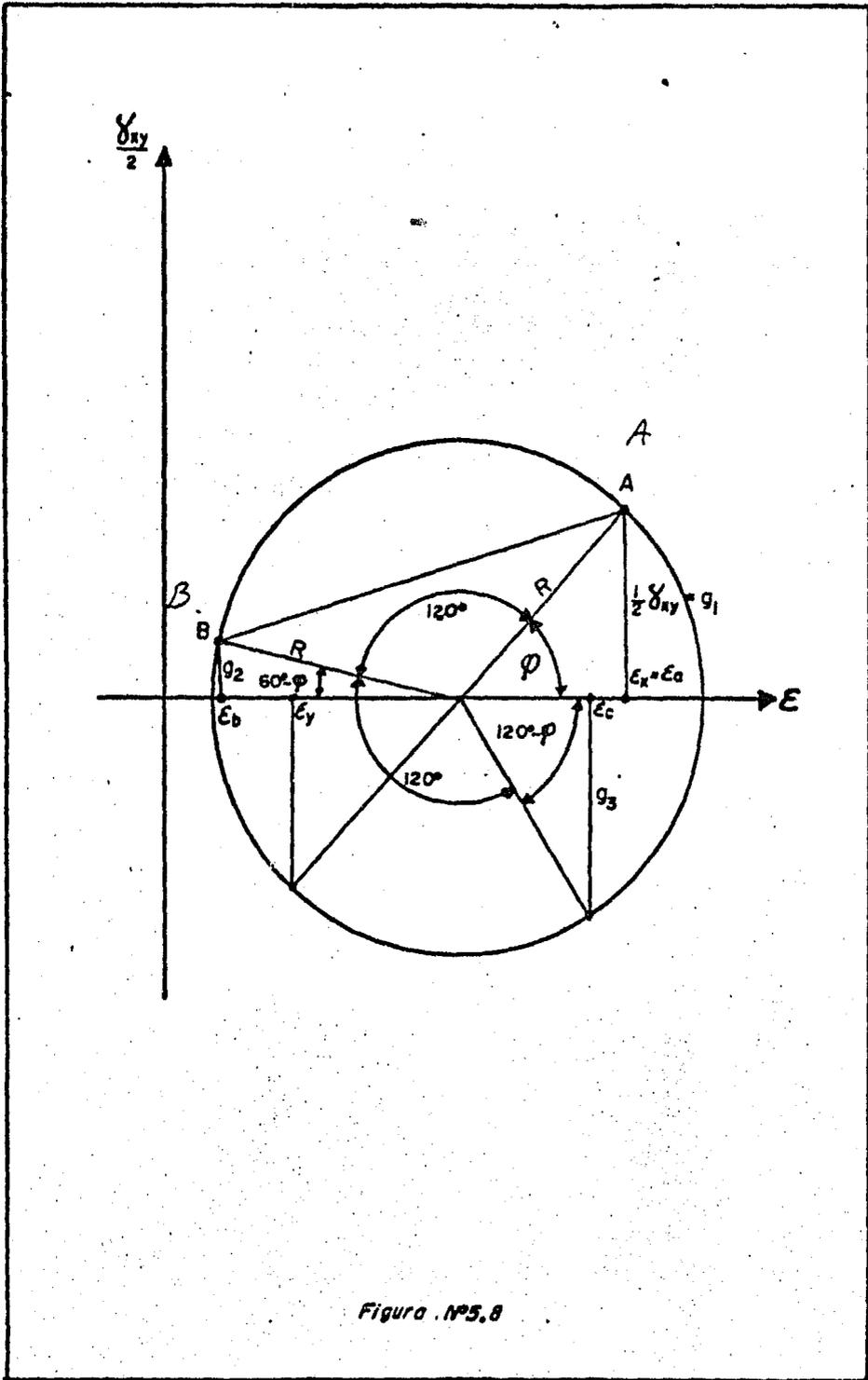


Figura №5,8

HACIENDO OPERACIONES Y REDUCIENDO TENEMOS :

$$\frac{E_x + E_y}{2} = \frac{1}{2} \left( \frac{2}{3} E_A + \frac{2}{3} E_B + \frac{2}{3} E_C - \frac{1}{3} E_A \right)$$

$$= \frac{1}{2} \left( \frac{2}{3} E_A + \frac{2}{3} E_B + \frac{2}{3} E_C \right)$$

$$= \frac{1}{3} (E_A + E_B + E_C)$$

POR LO QUE EL CENTRO DE LA CIRCUNFERENCIA SERA EL PUNTO -  
DE COORDENADAS:

$$\left( \frac{1}{3} (E_A + E_B + E_C), 0 \right)$$

Y EL RADIO COMO YA SE DIJO VALDRA :

$$R = \sqrt{\left( E_A - \frac{1}{3} (E_A + E_B + E_C) \right)^2 + \left( \frac{1}{3} E_B - E_C \right)^2}$$

DE ESTA MANERA UNA VEZ CONSTRUIDA LA CIRCUNFERENCIA SE --  
PUEDEN ENCONTRAR GRAFICAMENTE LAS DEFORMACIONES PRINCIPA-  
LES; ESTAS, NO OBSTANTE PUEDEN SER DETERMINADAS ANALITICA  
MENTE.

**DEFORMACIONES PRINCIPALES.**

SEGUN HEMOS VISTO LAS DEFORMACIONES LONGITUDINAL Y TRANS-  
VERSAL EN UN PLANO QUE GIRO UN ANGULO  $\theta$  RESPECTO A OTRO -  
PLANO EN EL CUAL SE CONOCEN EL ESTADO DE DEFORMACIONES, -  
SE PUEDEN OBTENER POR MEDIO DE LAS EXPRESIONES SIGUIENTES:

$$E_x^1 = E_x \cos^2 \theta + E_y \sin^2 \theta + \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad 5.17'$$

$$\gamma_{x'y'} = (E_y - E_x) \sin 2\theta + \gamma_{xy} \cos 2\theta \quad 5.16$$

INTERESA AHORA CONOCER CUANTO ES NECESARIO GIRAR PARA QUE ESTAS DEFORMACIONES SEAN MAXIMAS.

DERIVANDO LA ECUACION (5.17') RESPECTO A  $\theta$  E IGUALANDO A CERO SE LLEGA A LO SIGUIENTE :

$$E_{x'}^{\text{MAX}} = \frac{E_x + E_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{E_x - E_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad 5.24$$

$$E_{x'}^{\text{MIN}} = \frac{E_x + E_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{E_x - E_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2}$$

POR OTRO LADO LA DEFORMACION ANGULAR MAXIMA SERA DOS VECES EL RADIO DEL CIRCULO YA QUE ESTAS DEFORMACIONES SE GRAFICAN A LA MITAD.

AHORA BIEN, COMO YA SE VIO EN LA PRUEBA DE PLACA PODEMOS DECIR LO SIGUIENTE :

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \mu \frac{\sigma_2}{E} \quad \text{Y} \quad E_2 = \frac{\sigma_2}{E} - \mu \frac{\sigma_1}{E}$$

ADEMAS, SABEMOS QUE LAS DEFORMACIONES PRINCIPALES ESTAN ASOCIADAS A ESFUERZOS PRINCIPALES POR LO QUE RESOLVIENDO LAS ECUACIONES ANTERIORES PARA  $\sigma_1$  Y  $\sigma_2$  TENDREMOS LOS ESFUERZOS PRINCIPALES. AL EFECTUAR OPERACIONES LLEGAMOS A :

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \mu^2} (E_1 + \mu E_2) \quad \dots 5.25$$

Y

$$\sigma_2 = \frac{E}{1 - \mu^2} (E_2 + \mu E_1) \quad \dots \quad 5.26$$

EN DONDE  $E_1$ ,  $E_2$  SON LAS DEFORMACIONES PRINCIPALES MAXIMA-  
Y MINIMA RESPECTIVAMENTE Y  $\sigma_1$  Y  $\sigma_2$  SON LOS ES-  
FUERZOS PRINCIPALES MAXIMAS Y MINIMO RESPECTIVAMENTE.

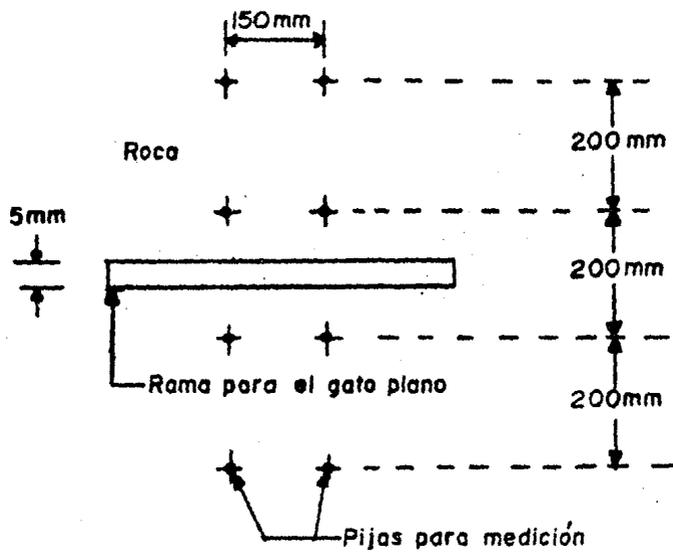
#### METODO DEL GATO PLANO.

COMO YA SE DIJO EN EL CAPITULO REFERENTE A DEFORMABILIDAD,  
EL GATO PLANO ES UN DISPOSITIVO QUE TIENE UNA DOBLE APLI-  
CACION EN LAS PRUEBAS DE CMAPO DE LA MECANICA DE ROCAS.

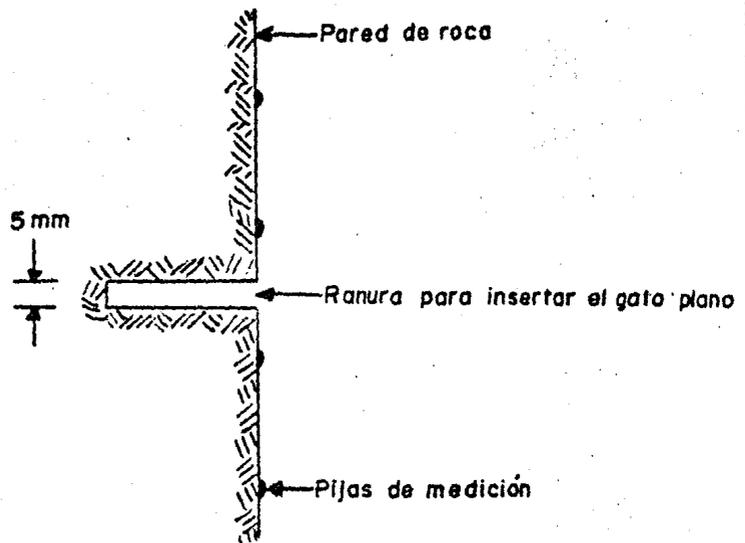
EN LO QUE CONCIERNE A LOS ESFUERZOS NATURALES EN LA MASA-  
DE ROCA EL GATO PLANO SE EMPLEA DE LA SIGUIENTE MANERA :

PRIMERAMENTE SE PULE UNA PARTE DE LA PARED DE LA ROCA CO-  
MO EN EL CASO DEL METODO DE RELAJACION DE ESFUERZOS, POS-  
TERIORMENTE SE MARCAN OCHO PUNTOS COMO SE MUESTRA EN LA -  
FIGURA (59), A CONTINUACION SE PROCEDE A HACER UNA RANURA  
DE LAS DIMENSIONES APROPIADAS PARA INTRODUCIR UN GATO PLA-  
NO EN LA PARED DE LA ROCA, SE PERMITE ENTONCES QUE SE LI-  
BEREN LOS ESFUERZOS LO CUAL SE MANIFIESTA CON UN DESPLAZA-  
MIENTO DE LOS PUNTOS ANTES MARCADOS, UNA VEZ QUE ESTO HA-  
SUCEDIDO SE PROCEDE A DARLE PRESION AL GATO PLANO BOMBEAN-  
DOLE ACEITE A SU INTERIOR, HASTA QUE LA LECTURA INICIAL -  
ENTRE LOS PUNTOS, MODIFICADA POR LA LIBERACION DE ESFUER-  
ZOS SE RECUPERE TOTALMENTE. CUANDO ESTO ULTIMO SE HA LO-  
GRADO SE TIENE ENTONCES UNA PRESION MANOMETRICA EN EL GA-  
TO PLANO, LA CUAL SE INTERPRETA COMO EL ESFUERZO EN LA RO-  
CA NORMAL AL PLANO DEL GATO.

SI BIEN ESTE METODO PERMITE CONOCER LOS ESFUERZOS SIN CO-  
NOCER LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL MATERIAL TIENE EL IN-  
CONVENIENTE DE SOLO PERMITIR CONOCER ESFUERZOS PERPENDICU



a)-Vista frontal de la ranura



b)- Corte transversal de la ranura

Ranura en la pared de roca para la realización de la prueba del gato plano

Figura N°5.9

LARES AL PLANO DEL GATO, ESTAS CONDICIONES HACEN NECESARIO EFECTUAR VARIAS PRUEBAS A FIN DE TENER ELEMENTOS SUFICIENTES PARA EVALUAR EL ESTADO DE ESFUERZOS. EN LA FIGURA 5.10 SE PRESENTAN DIFERENTES ARREGLOS QUE SE USAN CON EL FIN DE OBTENER LA INFORMACION NECESARIA PARA EVALUAR EL ESTADO DE ESFUERZOS.

POR OTRO LADO, DEBEMOS TOMAR EN CONSIDERACION EL HECHO DE QUE ESTA PRUEBA SE REALIZA DENTRO DE UNA GALERIA, SITUACION QUE POR SI MISMA HA PROVOCADO UN CAMBIO EN EL ESTADO DE ESFUERZOS.

CONSIDEREMOS UNA MASA DE ROCA COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA (5.11), EN ELLA EN EL PUNTO A TENDREMOS EL ESTADO DE ESFUERZOS SE MODIFICA Y DE ACUERDO A LA TEORIA DE LA ELASTICIDAD DICHO ESTADO SE TRANSFORMA EN EL MOSTRADO EN LA FIGURA ASI PODEMOS DECIR LO SIGUIENTE :

$$\sigma_1 \text{ MEDIDO} = \sigma_1 - 3\sigma_3 \quad \dots \quad 5.27$$

$$\sigma_3 \text{ MEDIDO} = \sigma_3 - 3\sigma_1 \quad \dots \quad 5.28$$

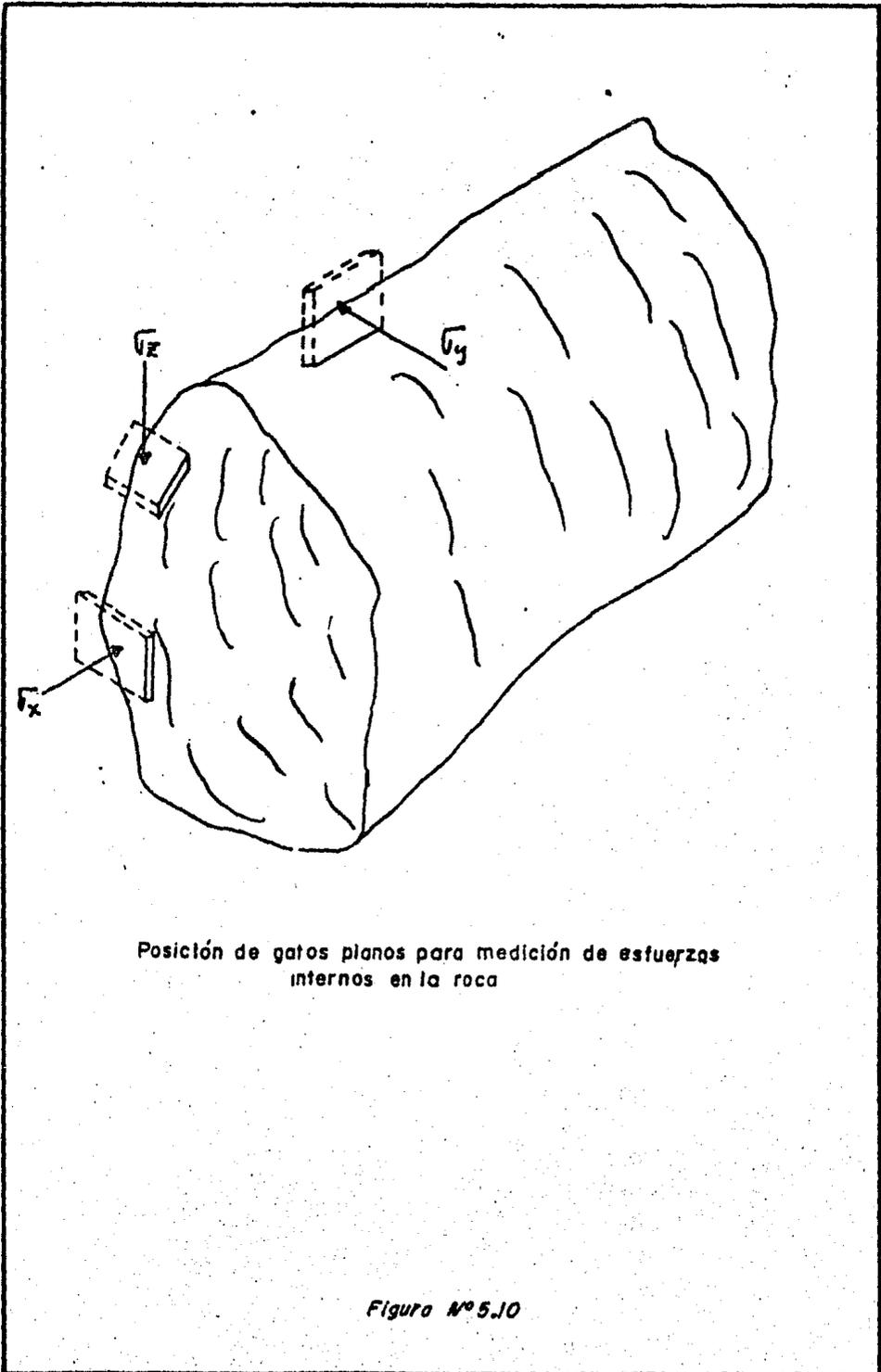
CON LO QUE TENEMOS DOS ECUACIONES CON DOS INCOGNITAS, LAS CUALES SON LOS ESFUERZOS PRINCIPALES.

POR OTRO LADO, SI DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS SE VERIFICA QUE :

$$\sigma_1 = \sigma_{\text{VERTICAL}} = \sigma_H \quad \text{Y} \quad \dots \quad 5.2$$

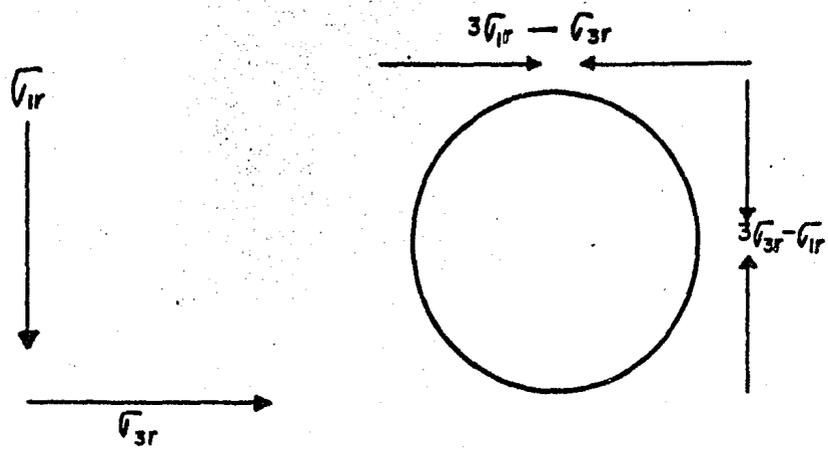
$$\sigma_3 = \sigma_{\text{HORIZONTAL}} = \sigma_H \frac{\mu}{1-\mu} \quad \dots \quad 5.3$$

QUIERE DECIR QUE NO EXISTE TECTONISMO LO CUAL ES MUY DIFÍCIL QUE OCURRA.



Posición de gatos planos para medición de esfuerzos internos en la roca

Figura N° 5.10



Original

Modificado

Estado de esfuerzos

Figura N°5.11

## METODO DE FRACTURAMIENTO HIDRAULICO.

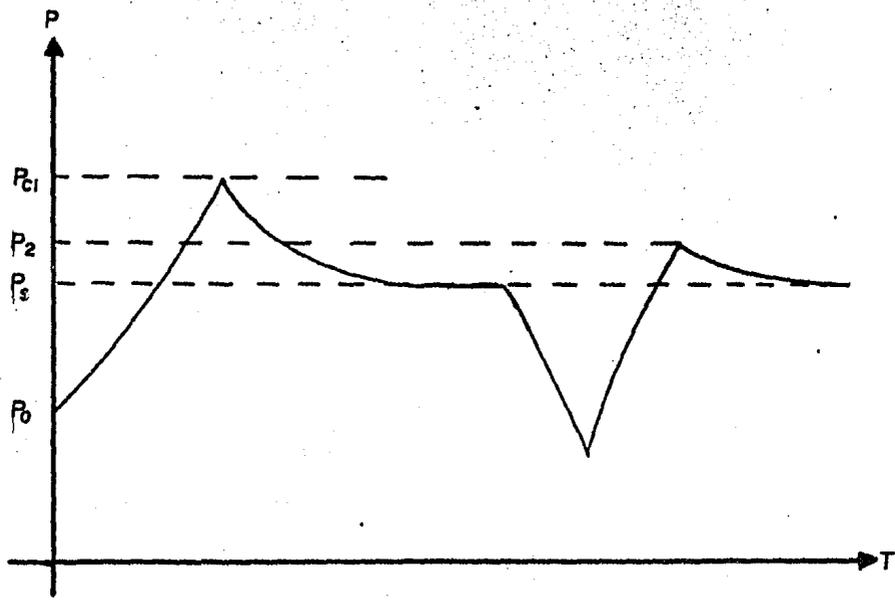
ESTE METODO PARTE COMO TODOS LOS DEMAS DE UNA CONDICION - DE ELASTICIDAD E ISOTROPIA PARA PODER DETERMINAR LOS ESFUERZOS EN LA MASA DE ROCA A PROFUNDIDADES CONSIDERABLES.

VEAMOS EN QUE CONSISTE EL METODO. EN UN BARRENO PREVIA-- MENTE PERFORADO SE AISLA UN TRAMO, A CONTINUACION SE BOMBEA AGUA INCREMENTANDO LA PRESION LO QUE OCASIONA QUE EL ESFUERZO DE COMPRESION EN LA PARED DEL BARRENO SE REDUZCA Y EN ALGUNOS PUNTOS SE LLEGUE INCLUSIVE A ALCANZAR LA TEN-- SION. CUANDO EL ESFUERZO ALCANZA UN CIERTO VALOR  $\sigma_0$ , SE FORMA UNA GRIETA, LA PRESION EN ESTE PUNTO ES  $P_{c1}$  (FIGURA 5.12). SI SE CONTINUA EL BOMBEO LA GRIETA SE EXTENDERA -- LO CUAL OCASIONARA UNA CAIDA DE PRESION HASTA EL VALOR  $P_s$ .

PARA INTERPRETAR LA INFORMACION OBTENIDA DE UNA PRUEBA DE FRACTURAMIENTO HIDRAULICO EN TERMINOS DE LOS ESFUERZOS -- INICIALES ES NECESARIO DETERMINAR LA ORIENTACION DE LA -- GRIETA HIDRAULICAMENTE INDUCIDA. LA MAYOR CANTIDAD DE DA-- TOS COINCIDA EN QUE ESTA ES VERTICAL, LA ORIENTACION PUE-- DE SER CONOCIDA POR MEDIO DE UN PAQUETE DE IMPRESION QUE CONSISTE BASICAMENTE DE UNA MEMBRANA DE HULE QUE SE ADHIE-- RE A LAS PAREDES DEL BARRENO LO CUAL OCASIONA QUE QUEDEN-- IMPRESAS EN EL LAS GRIETAS INDUCIDAS, TAMBIEN ES POSIBLE-- ESTO CON AYUDA DE FOTOGRAFIAS O CAMARAS DE TELEVISION PE-- RO NO ES MUY USUAL.

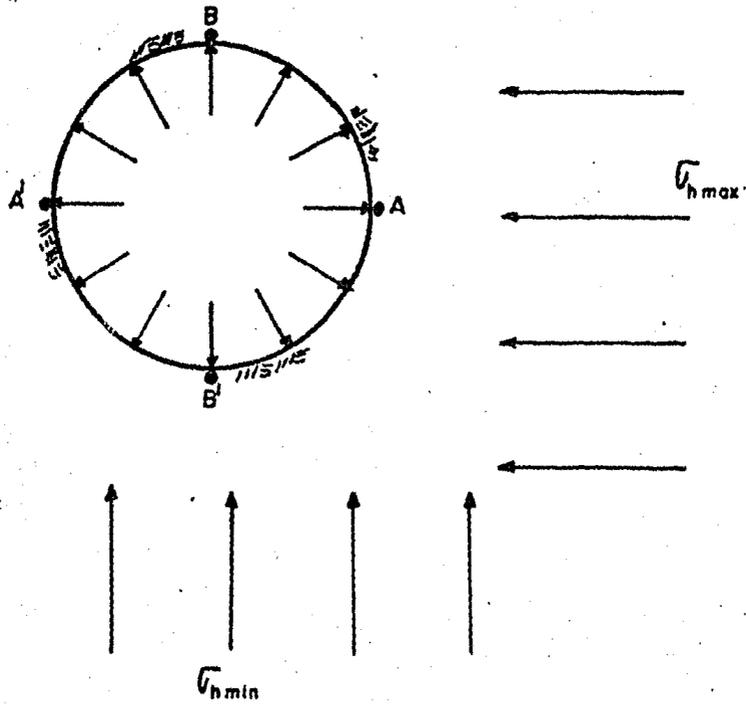
AHORA BIEN, RESPECTO AL ANALISIS, ESTE SE HACE MUY SENCIL-- LLO, SI SE CONSIDERA QUE EL AGUA DENTRO DE LOS POROS DE -- LA ROCA NO AFECTA. ASI PODEMOS DECIR QUE EL ESFUERZO TAN-- TANGENCIAL EN LA PARED DEL BARRENO ALCANZA EL MENOR VALOR EN LOS PUNTOS A Y A' (FIG. 5.13) Y CUYO VALOR ESTA DADO -- POR LA SIGUIENTE EXPRESION :

$$\sigma_{\theta} = 3\sigma_{HMIN} - \sigma_{HMAX} \quad . . . 5.29$$



Fractura hidráulica, datos de presión sacados contra el tiempo en la sección llena

Figura N°5.J2.



Localización de los puntos críticos alrededor de la perforación usada para la fractura hidráulica

Figura N°5.13

CUANDO LA APRESION DEL AGUA EN EL BARRENO ES P, UN ESFUERZO DE TENSION SE SUMA EN TODOS LOS PUNTOS DEL MISMO Y CUYO VALOR ES -P, (FIG. 5.13). LAS CONDICIONES PARA UNA NUEVA GRIETA VERTICAL ES QUE EL ESFUERZO DE TENSION EN EL PUNTO A ALCANCE EL VALOR DE LA RESISTENCIA A LA TENSION DE LA ROCA  $-T_0$  LO CUAL NOS LLEVA A LO SIGUIENTE :

$$3 \sigma_{HMIN} - \sigma_{HMAX} - Pc1 = -T_0 \quad \dots .5.30$$

ESTO INDICA QUE LA GRIETA ANTES FORMADA CONTINUARA PROPAGANDOSE MIENTRAS QUE LA PRESION SEA MAYOR QUE EL ESFUERZO NORMAL AL PLANO DE LA FRACTURA. EN LAS ROCAS SE HA VISTO QUE LAS GRIETAS SE PROPAGAN EN EL PLANO PERPENDICULAR A  $\sigma_3$  Y DE ACUERDO A LO QUE HEMOS DICHO SIGNIFICA QUE :

$$\sigma_{HMIN} = ps \quad \dots .5.31$$

LAS DOS ULTIMAS EXPRESIONES PERMITEN CONOCER LOS ESFUERZOS NORMALES MAYOR Y MENOR EN EL PLANO PERPENDICULAR AL BARRENO SI SE CONOCE LA RESISTENCIA A LA TENSION DE LA ROCA. SI LA EXPRESION EN EL BARRENO ES DISMINUIDA Y DE NUEVO AUMENTADA AL VALOR PS, LA FRACTURA HIDRAULICA SE CERRARA Y SE REABRIRA ALCANZANDOSE DE NUEVO UNA MAXIMA PRESION, MENOS QUE  $Pc_1$  LLAMADA  $Pc_2$  (FIG.5.12 ). SUSTITUYENDO  $T_0$  Y  $Pc_1$  DE LAS ULTIMAS ECUACIONES CON VALORES DE 0 Y  $Pc_2$  Y RESTANDO TENEMOS QUE :

$$T_0 = Pc_1 - Pc_2 \quad \dots .5.32$$

QUE ES LA EXPRESION QUE PERMITE CONOCER LA RESISTENCIA DE LA ROCA A LA TENSION.

POR ULTIMO CONSIDERANDO QUE EL ESFUERZO VERTICAL ES IGUAL A  $\sigma_v$  Y QUE ADEMAS ES PRINCIPAL, EL ESTADO DE ESFUERZOS ES ENTONCES TOTALMENTE CONOCIDO, PARA LOS VALORES DE DIRECCIONES DEL EXPERIMENTO EN EL PLANO PERPENDICULAR AL BARRENO.

EL METODO DE FRACTURAMIENTO HIDRAULICO NO LLEGA A LOS RESULTADOS ANTES MENCIONADOS SI LA FRACTURA ES HORIZONTAL, LAS CONDICIONES PARA LA PROPAGACION DE UNA FRACTURA HORIZONTAL SON CONOCIDAS SI LA PRESION INTERNA ALCANZA UN VALOR IGUAL AL ESFUERZO VERTICAL MAS LA RESISTENCIA A LA TENSION. CONSIDERANDO QUE LA RESISTENCIA A TENSION PARA PROPAGACION DE FRACTURAS HORIZONTALES Y VERTICALES SON LA MISMA, LA FRACTURA VERTICAL DEBERA FORMARSE SOLO A PROFUNDIDADES POR DEBAJO DE LAS CUALES SE CUMPLA QUE :

$$\sigma_v \geq (3N - 1) \sigma_{HMAX}$$

DONDE

$$N = \frac{\sigma_{HMIN}}{\sigma_{HMAX}}$$

PARA ESTIMAR LA MINIMA PROFUNDIDAD PARA USAR EL METODO SE USAN LAS EXPRESIONES ANTERIORES EN TERMINOS DE K, QUE ES LA RELACION DEL ESFUERZO HORIZONTAL PRINCIPAL Y EL ESFUERZO VERTICAL. EN ESAS CONDICIONES LA FRACTURA SE FORMARA A PROFUNDIDADES TALES QUE K SEA MENOR QUE :

$$\frac{1 + N}{6N - 2} \quad \text{Y} \quad N \geq \frac{1}{3}$$

LA MINIMA PROFUNDIDAD PARA UNA FRACTURA VERTICAL CORRES-

PONDIENTE A LOS LIMITES SUPERIOR E INFERIOR DE  $\bar{KZ}$  ESTA PRESENTADA PARA VARIOS VALORES DE N EN LA SIGUIENTE TABLA :

PROFUNDIDADES MINIMAS PARA FRACTURAMIENTO HIDRAULICO.

$\frac{\sigma_{HMIN}}{\sigma_{HMAX}}$ (N)	VALOR DE TRANSICION DE K	MINIMA PROFUNDIDAD EN M PARA CONSIDERAR FRACTURAMIENTO HIDRAULICO.	
		$Z = \frac{100}{K-0.3}$	$Z = \frac{1500}{K-0.5}$
$\leq 0.33$	$\infty$	0	0
0.40	3.5	31	500
0.50	1.5	83	1500
0.60	1.00	143	3000
0.667	0.833	188	4505
0.70	0.773	211	5495
0.80	0.643	292	10490
0.90	0.559	386	25424
1.00	0.500	500	$\infty$

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS METODOS.

LOS METODOS PRESENTADOS, EL METODO DEL GATO PLANO ES EL -- QUE SE PUEDE CONSIDERAR CON MAYORES VENTAJAS YA QUE SI BIEN SOLO PERMITE CONOCER ESFUERZOS EN EL PLANO QUE CONTIENE AL GATO, ESTE PUEDE SER ORIENTADO EN DIFERENTES DIRECCIONES - CON LO QUE SE PUEDE LLEGAR A UN CONOCIMIENTO MAS CONCISO - DEL ESTADO DE ESFUERZOS, COSA QUE NO SUCEDE CON LOS OTROS-METODOS, ADICIONALMENTE SE PUEDE DECIR QUE LA PRUEBA ES DE

RAPIDA REALIZACION, CON RECUPERACION DEL EQUIPO USADO Y -  
CON RESULTADOS DIRECTOS.

SI HABLAMOS DE DESVENTAJAS PODEMOS DECIR QUE EN FORMA GENE  
RAL LA PRINCIPAL DESVENTAJA RADICA EN QUE PARA LA REALIZA  
CION DE CUALQUIERA DE LAS PRUEBAS SE TIENE QUE HACER UNA -  
ALTERACION EN LA ROCA EN OCASIONES MUY SIGNIFICATIVA, DEL  
ESTADO DE ESFUERZOS QUE GUARDA UNA MASA DE ROCA, ESTA DES-  
VENTAJA ESTA PRESENTA EN TODAS LAS PRUEBAS DE CAMPO QUE HE  
MOS MENCIONADO, PERO NO OBSTANTE LOS RESULTADOS QUE SE OB-  
TIENEN ALCANZAN DE SIGNIFICACION PARA FINES PRACTICOS.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

A TRAVES DEL DESARROLLO DEL PRESENTE TRABAJO HEMOS -  
QUERIDO HACER UNA EXPOSICION BREVE Y CONCISA DE LOS -  
METODOS QUE ACTUALMENTE SON MAS USADOS DENTRO DE LA -  
PRACTICA DE LA MECANICA DE ROCAS, EN LO QUE RESPECTA -  
A LAS PRUEBAS DE CAMPO PARA ESTIMAR RESISTENCIA, DE--  
FORMABILIDAD Y ESTADO DE ESFUERZOS.

TAMBIEN SE HA TRATADO DE PRESENTAR EN FORMA CLARA Y -  
EXPLICITA, LA PARTE TEORICA QUE SOSTIENE LAS EXPRESIO -  
NES DE APLICACION PRACTICA PROPUESTAS. ES OBVIO QUE  
LOS METODOS QUE AQUI SE PRESENTAN NO SON LOS UNICOS, -  
COMO YA SE DIJO SON LOS MAS USADOS. TAMBIEN LA EXPO -  
SICION ENCIERRA LA FORMA GENERAL DE ELLOS EXISTIENDO -  
SIN EMBARGO UNA ILIMITADA GAMA DE VARIANTES EN CADA -  
UNO DE ELLOS.

NO OBSTANTE EL HECHO DE QUE LA MECANICA DE ROCAS ES -  
EN SI DE RECIENTE APARICION EN EL AMBITO DE LA INGE--  
NIERIA CIVIL ES SORPRENDENTE LA CANTIDAD DE PROBLEMAS  
A CUYA SOLUCION SE HA AVOCADO Y CUYOS RESULTADOS SON  
CADA DIA MAS USADOS.

LA GENERALIDAD DE LAS SOLUCIONES QUE SE PROPONEN SON -  
DERIVADAS A PARTIR DE LA TEORIA DE LA ELASTICIDAD, LO  
QUE ES EN SI UNA LIMITANTE, PERO COMO YA SE DIJO EN -  
LOS CAPITULOS ANTERIORES LOS RESULTADOS QUE SE OBTIE -  
NEN SON DE UN GRAN SIGNIFICADO PRACTICO.

DE ACUERDO CON TODO LO ANTERIOR PODEMOS DESPRENDER --  
LAS SIGUIENTES CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- 1.- LA MECANICA DE ROCAS ES UNA RAMA DE LA INGENIERIA  
CIVIL QUE DIA A DIA COBRA MAYOR IMPORTANCIA EN --  
NUESTRO MEDIO (DE LA MISMA MANERA QUE INTERNACIO -  
NALMENTE) LO CUAL CREA UNA DEMANDA QUE HAY QUE SA -  
TISFACER POR LO QUE ES RECOMENDABLE QUE SE MOTIVE

MAS A LOS ESTUDIANTES DE INGENIERIA CIVIL A FIN -  
DE QUE UN MAYOR PORCENTAJE SE INCLINE HACIA ESTA-  
DISCIPLINA.

- 2.- LA BIBLIOGRAFIA REFERENTE A LA MATERIA ESTA EN UN ALTO PORCENTAJE (MAS DEL 90%) ESCRITA EN IDIOMAS-EXTRANJEROS POR UNA PARTE, POR OTRA DEBIDO A LA -SITUACION ECONOMICA QUE VIVE EL PAIS LA ADQUI--SION DE DICHOS LIBROS RESULTA DEMASIADO CARA PARA ESTAR AL ALCANCE DE LA GENERALIDAD DE LOS ESTU- -DIANTES, AMEN DE QUE CONSEGUIR UNO DE ESTOS LI- -BROS PUEDE REQUERIR VARIOS MESES. DE AQUI LA RE-  
COMENDACION OBLIGADA A QUE SE TRATE DE ALGUNA MA-  
NERA DE HACER CUADERNOS CON NOTAS QUE SIRVAN DE A  
PUNTES A LOS ESTUDIANTES DE LOS SIGUIENTES CURSOS,  
CON LO CUAL SE LOGRAN DOS OBJETIVOS: PRIMERO SE  
PASARIA LA BARRERA DEL IDIOMA Y SEGUNDO SE PONDRIAN  
A UN COSTO ACCESIBLE PARA LA MAYORIA DE LOS ESTU-  
DIANTES.
- 3.- LOS METODOS ESTUDIADOS PRESENTAN AL IGUAL QUE LA  
BIBLIOGRAFIA LA PARTICULARIDAD DE QUE FUERON DESA-  
RROLLADOS EN OTROS PAISES, ESTO CON EXCEPCION DEL  
METODO DEL TORCOMETRO, NO OBSTANTE ELLO NO ES UN  
IMPEDIMENTO PARA SU APLICACION EN NUESTRO PAIS, -  
PERO SI DEBE CONSIDERARSE COMO UN MOTIVO PARA AVQ-  
CARSE A LA BUSQUEDA DE NUEVOS METODOS CON EL FIN-  
DE IR FORMANDO UNA BASE SOLIDA Y PROPIA PARA FUTU-  
RAS GENERACIONES.
- 4.- RESPECTO A LOS CURSOS, AL UNICO QUE PUEDO JUZGAS-  
ES EL QUE IMPARTE LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA  
UNAM. EL CUAL ES EL PRIMER INTENTO DE LLEVAR AL  
NIVEL LICENCIATURA ESTA MATERIA, LO CUAL ES UNA-  
MUESTRA MAS DE LA IMPORTANCIA DE LA MECANICA DE -  
ROCAS. EN ESTE PUNTO ME PERMITO HACER LAS SIGUIEN

TES RECOMENDACIONES :

- A) INCLUIR VISITAS A CAMPO EN DONDE SE PUEDA APRECIAR LA FORMA EN QUE SE DESARROLLAN LOS TRABAJOS A QUE SE HA HECHO MENCION.
- B) PREPARAR TRABAJOS AUDIOVISUALES QUE PERMITAN AL ESTUDIANTE UNA MAYOR COMPRESION DE LO QUE ES LA MECANICA DE ROCAS Y A LA VEZ LO MOTIVEN A SEGUIR SU ESTUDIO EN CURSOS SUPERIORES.
- C) INCLUIR VISITAS A LABORATORIOS DONDE SE EFECTUEN LAS PRUEBAS A LOS ESPECIMENES RECOLECTADOS EN CAMPO CON EL FIN DE ILUSTRAR EN FORMA OBJETIVA AL ALUMNO.

5.- LA INVESTIGACION EN NUESTRO PAIS ES BIEN SABIDO QUE NO SE ENCUENTRA EN EL NIVEL QUE LE CORRESPONDE ESTO TIENE COMO PRINCIPAL MOTIVO LA FALTA DE RECURSOS (ECONOMICOS, HUMANOS Y DE EQUIPO) NO OBSTANTE ESTO DE ALGUNA MANERA SI SE HACE INVESTIGACION AUNQUE SEA A UN NIVEL MUY LIMITADO, NO OBSTANTE ELLO ME PERMITO HACER DOS RECOMENDACIONES :

- 1. UNA O DOS VECES POR CURSO SE DICTARAN CONFERENCIAS POR PARTE DE INVESTIGADORES O PROFESORES RESPECTO A ALGUN TEMA A LAS CUALES ASISTIERAN ALUMNOS Y DE LAS QUE NO SE PRESENTARAN REPORTES ESCRITOS.
- 2. QUE UNA O DOS VECES POR SEMESTRE LOS ALUMNOS SE AVOCARAN A LOS CENTROS DE INVESTIGACION PARA ENTERARSE DE LAS RECIENTES INVESTIGACIONES, QUE SE ESTEN REALIZANDO EN LA MATERIA, EN LAS INSTITUCIONES NACIONALES.
- 3. POR ULTIMO LA CONCLUSION MAS IMPORTANTE ES QUE

SEA LA PARTE DE LA MECANICA DE ROCAS QUE SE --  
TRATE SIEMPRE SERA ABRIR LA PUERTA Y TRAS ELLA  
HABRA TODO UN MUNDO DE PROBLEMAS Y SOLUCIONES;  
DE RETOS Y VICTORIAS EN ESPERA DE QUE LOS INGE  
NIEROS CIVILES LLEGUEN A ELLOS.

## BIBLIOGRAFIA :

1. ALFRED JUMIKIS, 1979, "ROCK MECHANICS"  
1<sup>RST</sup> EDITION, IRANS TECH PUBLICATIONS.
2. TIMOSHENKO AND GOODIER, 1951, "THEORY OF ELASTICITY"  
2<sup>ND</sup> EDITION, MCGRAW HILL BOOK COMPANY, INC.
3. RICHARD E. GOODMAN, 1980, "INTRODUCTION TO ROCK MECHANICS"  
1<sup>RST</sup> EDITION, JOHN WILLEY AND SONS.
4. EGOR POPOU, 1976, "INTRODUCCION A LA MECANICA DE SOLIDOS"  
PRIMERA EDICION, EDITORIAL LIMUSA.
5. FRANCIS SEARS & MARK SEMANSKY, 1957, "FISICA GENERAL"  
CUARTA EDICION, EDITORIAL AGUILAR.
6. FERDINAND L. SINGER, 1971, "RESISTENCIA DE MATERIALES"  
SEGUNDA EDICION, EDITORIAL HARLA, S. A. DE C. V.
7. RAYMOND J. ROARK AND WARREN C. YOUNG, 1975, "FORMULAS  
FOR STRESS AND STRAIN" FIFTH EDITION.  
MCGRAW HILL KOGAKUSHA, LTD.