

**ESTE DOCUMENTO CONTIENE FALLAS DE ORIGEN**

**DISEÑO DE SARTAS DE TRABAJO**

**Ing. Rafael Viñas Rodríguez.**

4.- DISEÑO DE SARTAS DE TRABAJO  
=====



CONTENIDO

|     |                                                    |    |
|-----|----------------------------------------------------|----|
| 1.  | INTRODUCCION                                       | 3  |
| 2.  | IDENTIFICACION                                     | 4  |
| 3.  | CLASIFICACION                                      | 7  |
| 4.  | ESFUERZOS A QUE SE SOMETEN LAS TUBERIAS DE TRABAJO | 20 |
| 5.  | PROCEDIMIENTO DE DISEÑO                            |    |
| 5.1 | METODO ANALISTICO                                  | 26 |
| 5.2 | METODO GRAFICO                                     | 35 |
| 5.3 | COSTOS                                             | 39 |
| 6.  | EJEMPLO ILUSTRATIVO                                | 43 |
| 7.  | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES                     | 49 |
| 8.  | BIBLIOGRAFICA                                      | 51 |

## 1. INTRODUCCION

Es importante disponer de una sarta de tubería la cual permita efectuar las operaciones en forma segura y eficiente. Debe ser optimizada desde el punto de vista económico y las tuberías que se seleccionaron serán - dentro de lo posible, las que más favorezcan la hidráulica del sistema de circulación para llevar a cabo los trabajos que las intervenciones - de los pozos requieran. La tubería es el medio con el cual se introducen o extraen de los pozos las diferentes herramientas con las que se - lleva a efecto el programa operativo para realizar el programa que una terminación o reparación requieran.

Dada la importancia que la sarta de operación tiene en nuestras actividades se elaboró el presente método para seleccionar en forma adecuada la tubería que conforme una sarta de operación.

## II. IDENTIFICACION

La forma recomendada por el API para identificar el peso y el grado de una tubería de trabajo es la marca que se graba en la ranura del piñón, el código correspondiente a cada uno de ellos es estampado mediante un golpe, cuyas dimensiones y forma se pueden apreciar en la Fig. 1-Bis. En las Tablas 1 y 2 se dan los códigos de pesos y grados. Cuando el piñón no tiene ninguna marca es indicativo que se trata de una tubería estandar en peso y grado. Cuando la ranura se localiza en el centro de la sección de la llave como se ve en la Fig. 1-Bis, entonces la tubería será de grado estandar y alto peso; si la ranura se localiza en la base y además tiene una acanaladura en la parte central de la sección de llave será una tubería de peso estandar y alta resistencia, esto puede observarse en la Fig. 2; finalmente, si el piñón tiene la acanaladura en la base y la ranura en el centro, se tratará de una tubería de alto peso y alta resistencia como puede verse en la Fig. 3.

TABLA 1  
CODIGO DE GRADOS

| GRADOS ESTANDAR |         | GRADOS DE ALTO ESFUERZO |         |
|-----------------|---------|-------------------------|---------|
| GRADO           | SIMBOLO | GRADO                   | SIMBOLO |
| N-80            | N       | X-95                    | X       |
| E-75            | E       | G-105                   | G       |
| C-75            | C       | P-110                   | P       |
|                 |         | S-135                   | S       |
|                 |         | V-150                   | V       |

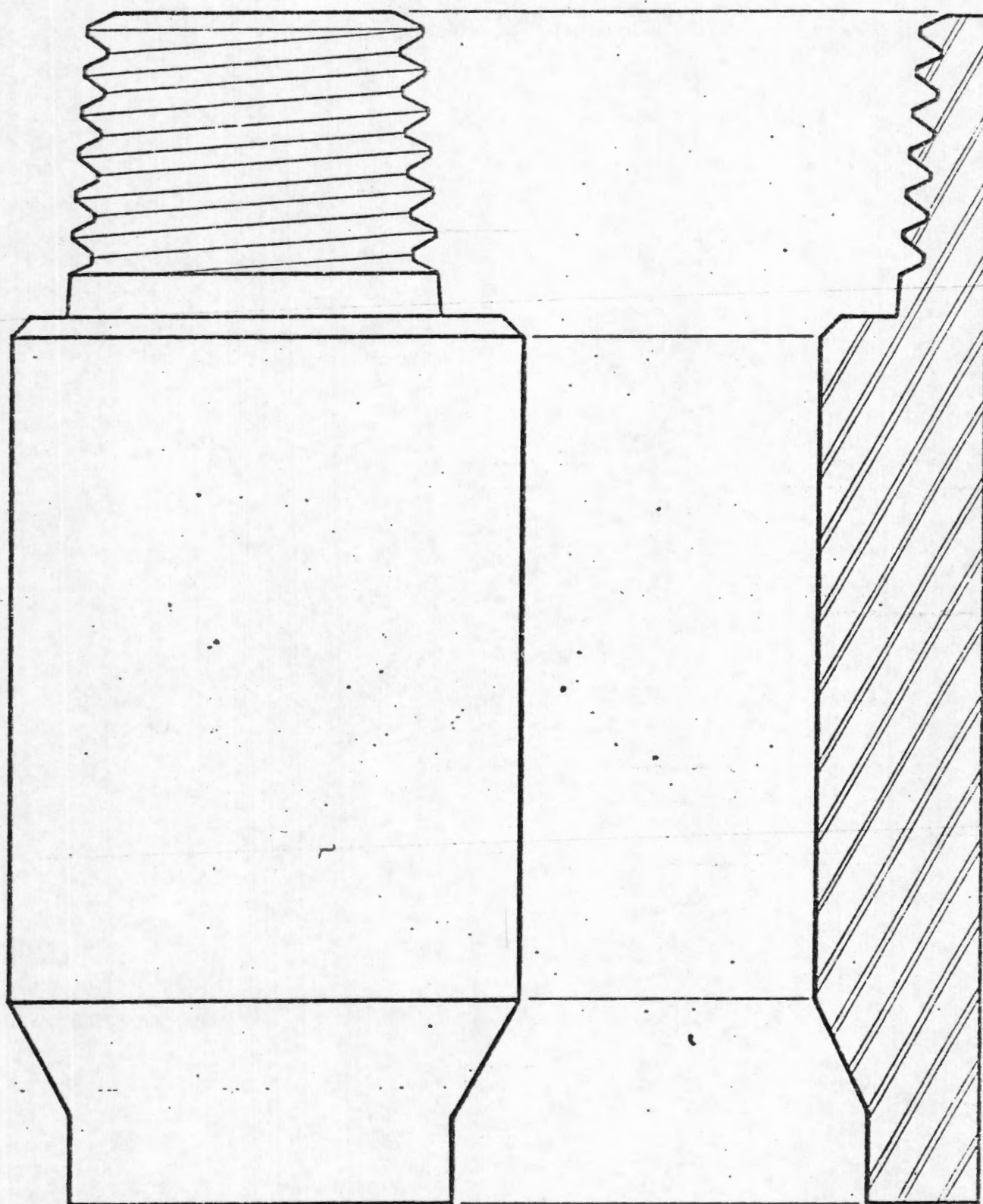
TABLA 2

## CODIGO DE PESOS DE TUBERIAS

| DIAMETRO<br>EXTERIOR<br>(pg) | PESO<br>NOMINAL<br>(lb/pie) | ESPESOR<br>DE PARED<br>(pg) | NUMERO<br>DE<br>CODIGO |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|
| 2 3/8                        | 4.85                        | .190                        | 1                      |
|                              | 6.65*                       | .280                        | 2                      |
| 2 7/8                        | 6.85                        | .217                        | 1                      |
|                              | 10.40*                      | .362                        | 2                      |
| 3 1/2                        | 9.50                        | .254                        | 1                      |
|                              | 13.30*                      | .368                        | 2                      |
|                              | 15.50                       | .449                        | 3                      |
| 4                            | 11.85                       | .262                        | 1                      |
|                              | 14.00*                      | .330                        | 2                      |
|                              | 15.70                       | .380                        | 3                      |
| 4 1/2                        | 13.75                       | .271                        | 1                      |
|                              | 16.60*                      | .337                        | 2                      |
|                              | 20.00                       | .430                        | 3                      |
|                              | 22.82                       | .500                        | 4                      |
|                              | 24.66                       | .550                        | 5                      |
|                              | 25.50                       | .575                        | 6                      |
|                              | 16.25                       | .296                        | 1                      |
| 5                            | 19.50*                      | .362                        | 2                      |
|                              | 25.60                       | .500                        | 3                      |
|                              | 19.20                       | .304                        | 1                      |
| 5 1/2                        | 21.90*                      | .361                        | 2                      |
|                              | 24.70                       | .415                        | 3                      |
|                              | 25.20*                      | .330                        | 2                      |

\* INDICA PESO ESTANDAR





Fíg. 1.- TUBERIA ESTANDAR EN PESO Y GRADO.

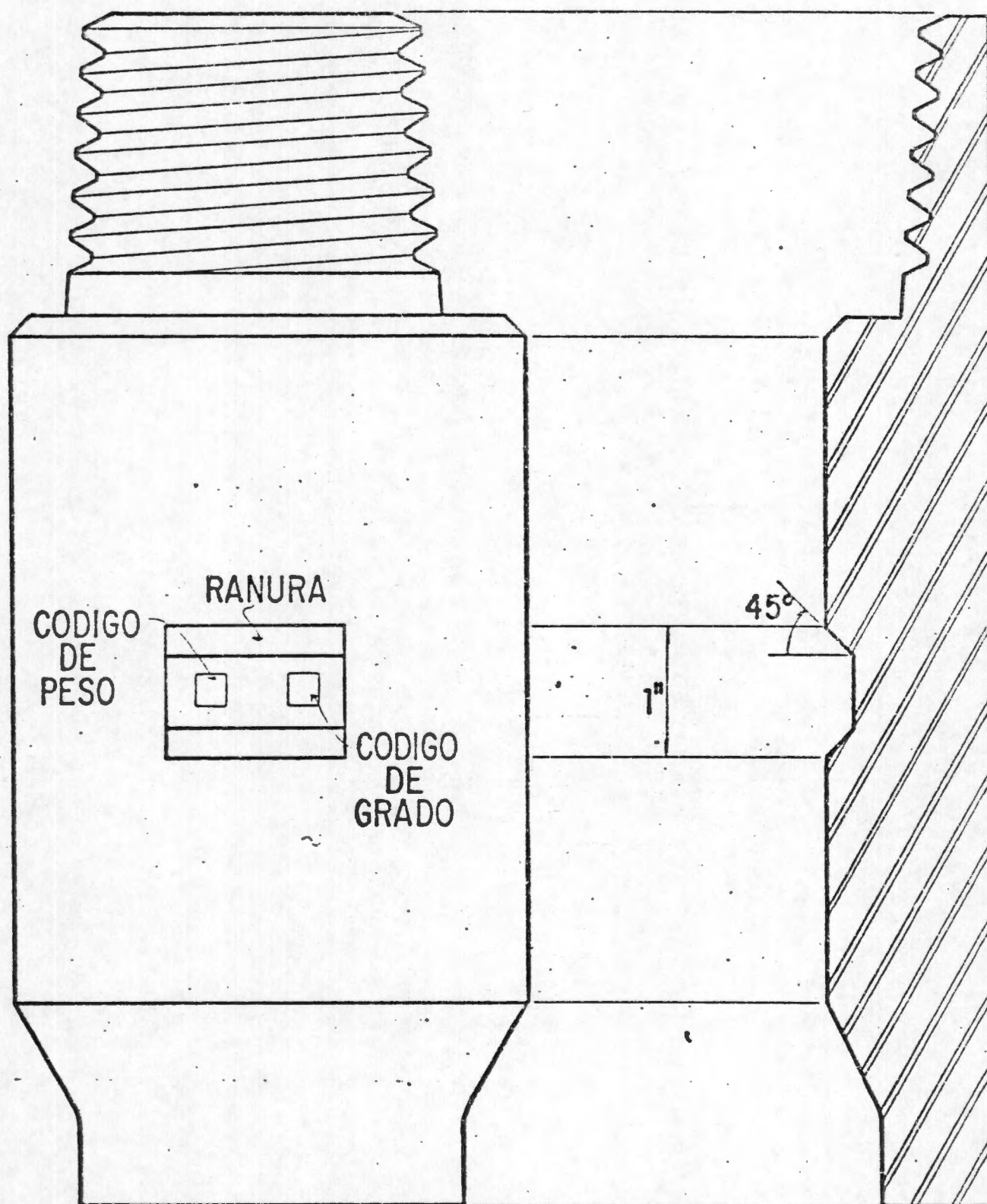


Fig. 2.- TUBERIA PESADA ESTANDAR EN GRADO.

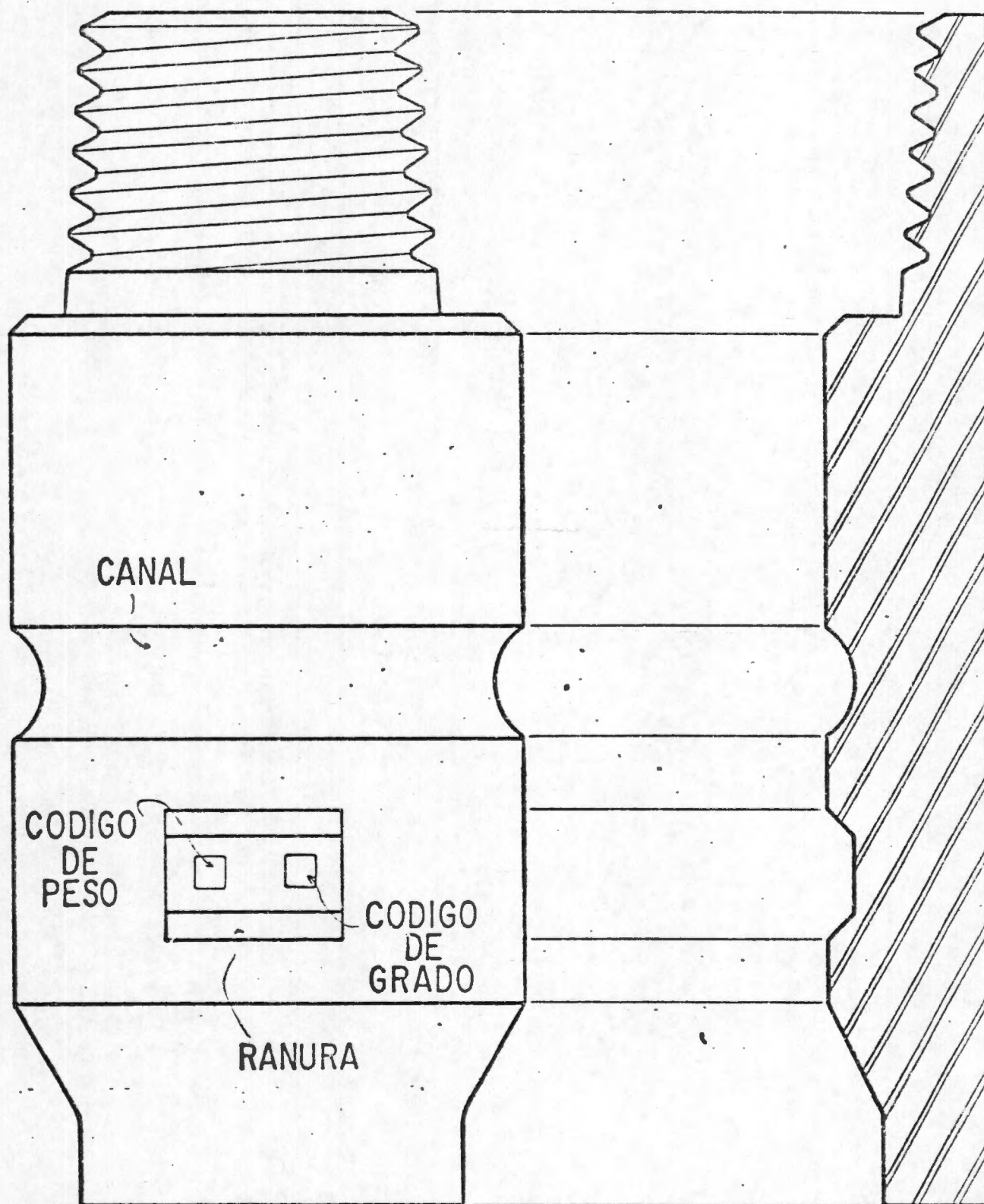


Fig. 3.- TUBERIA DE ALTA RESISTENCIA ESTANDAR EN PESO.

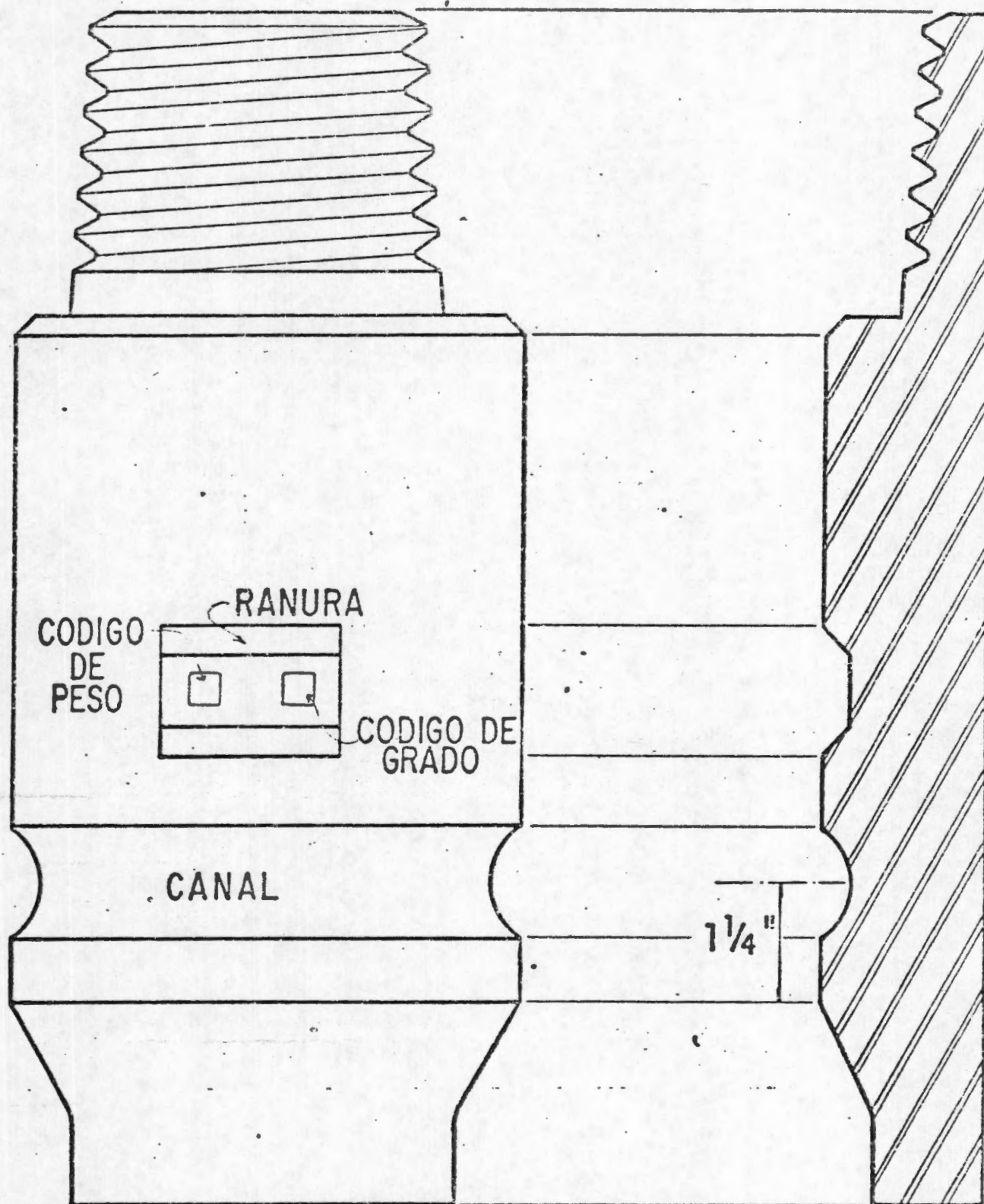


Fig. 4.-TUBERIA PESADA DE ALTA RESISTENCIA.



### III. CLASIFICACION

La clasificación que hace el API de las tuberías de trabajo en función a su desgaste es como sigue:

#### Clase Nueva

Esta tubería es aquella que no ha sufrido desgaste y por lo tanto conserva sus propiedades de resistencia originales. En las Tablas del boletín API-RP-7G, 2.1, 2.2 y 2.3 se muestran sus especificaciones.

#### Clase Premium

Las tuberías que se clasifican en esta categoría son aquellas que han sufrido como máximo un desgaste exterior uniforme del 20% del área de acero del cuerpo del tubo. Sus propiedades mecánicas y características geométricas aparecen en las Tablas 2.4 y 2.5.

#### Clase 2

En esta clasificación se ubican las tuberías que han perdido como máximo un 20% del área de acero del cuerpo del tubo en forma excéntrica. Para el cálculo de los esfuerzos de presión interna, colapso y torsión, se considera que en algún punto, la pérdida de metal en la parte externa ha alcanzado como máximo, un 35% del espesor original, en las Tablas 2.6 y 2.7 se muestran sus propiedades.

#### Clase 3

Cuando una tubería se desgasta un 37.5% del área de acero original en forma excéntrica cae en esta clasificación, también se considera que el espesor en algún punto se menoscaba en un 45%. Las unidades de inspección de tubería en Pemex consideran esta tubería como de desecho, las propiedades se pueden ver en las Tablas 2.8 y 2.9.

### Código de Identificación

Una vez que la tubería ha sido clasificada, el API recomienda que sea marcada como se ilustra en la Fig. 4 con el siguiente código de colores.

#### Clasificación

nueva  
premium  
clase 2  
desecho

#### Número y color de bandas

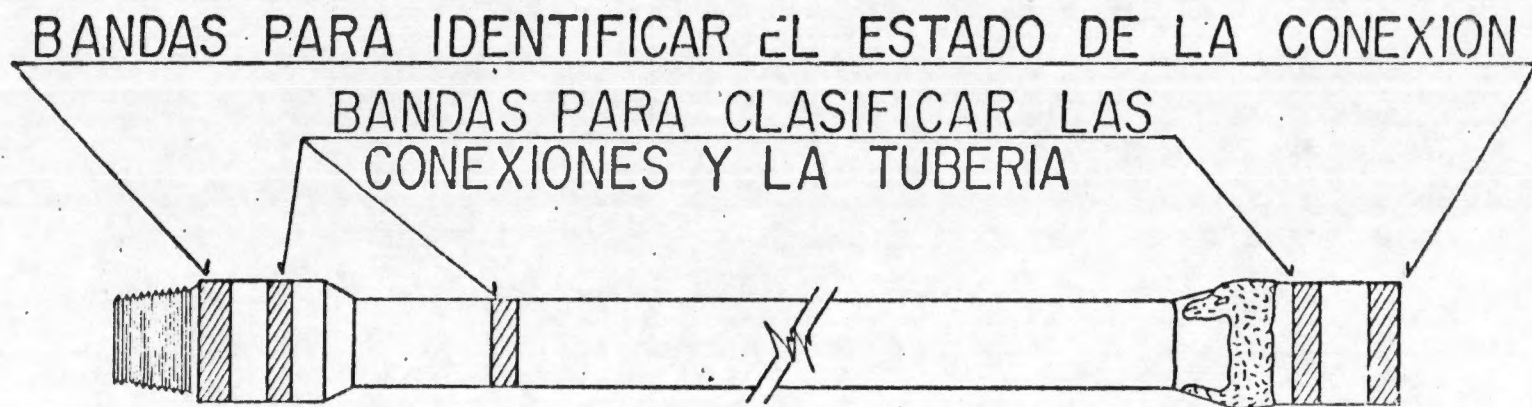
una blanca  
dos blancas  
una amarilla  
una roja

#### Estado de la conexión

reparable en taller  
reparable en localización

#### Número y color de bandas

roja  
verde



| CLASIFICACION DE LA TUBERIA Y SU CONEXION | COLOR Y NUMERO DE BANDAS | ESTADO DE LA CONEXION | COLOR DE LAS BANDAS |
|-------------------------------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------|
| NUEVA                                     | 1 BLANCA                 | DESHECHO O            | ROJA                |
| PREMIUM                                   | 2 BLANCA                 | REPARABLE             |                     |
| CLASE 2                                   | 1 AMARILLA               | EN TALLER             |                     |
| CLASE 3                                   | 1 AZUL                   | REPARABLE             |                     |
| CLASE 4                                   | 1 VERDE                  | EN LOCALIZA-          | VERDE               |
| DESHECHO                                  | 1 ROJA                   | CION                  |                     |

Fig. 4.- CODIGO DE COLORES PARA IDENTIFICAR TUBERIA DE TRABAJO Y SU CONEXION.

TABLA 2.1

## DATOS DE LAS DIMENSIONES DE LA T.P. NUEVA

| 1          | 2                         | 3                       | 4                      | 5                       | 6                                      | 7                                      |
|------------|---------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| D.E.       | PESO<br>NOMINAL           | PESO<br>SIN<br>COPLA(1) | ESPESOR<br>DE<br>PARED | D.I.                    | AREA<br>DE<br>SECCION                  | MODULO<br>POLAR DE<br>SECCION          |
| (pg.)<br>D | (lb./pie)                 | (lb./pie)               | (pg)                   | (pg)<br>d               | (pg <sup>2</sup> ) <sup>(2)</sup><br>A | (pg <sup>3</sup> ) <sup>(3)</sup><br>Z |
| 2%         | † 4.85<br>6.65            | 4.43<br>6.26            | .190<br>.280           | 1.995<br>1.815          | 1.3042<br>1.8429                       | 1.321<br>1.733                         |
| 2%         | † 6.85<br>10.40           | 6.16<br>9.72            | .217<br>.362           | 2.441<br>2.151          | 1.8120<br>2.8579                       | 2.241<br>3.204                         |
| 3%         | 9.50<br>13.30<br>15.50    | 8.81<br>12.31<br>14.63  | .254<br>.368<br>.449   | 2.992<br>2.764<br>2.602 | 2.5902<br>3.6209<br>4.3037             | 3.923<br>5.144<br>5.847                |
| 4          | †11.85<br>14.00<br>†15.70 | 10.46<br>12.93<br>14.69 | .262<br>.330<br>.380   | 3.476<br>3.340<br>3.240 | 3.0767<br>3.8048<br>4.3215             | 5.400<br>6.458<br>7.157                |
| 4%         | 13.75<br>16.60<br>20.00   | 12.24<br>14.98<br>18.65 | .271<br>.337<br>.430   | 3.958<br>3.826<br>3.640 | 3.6004<br>4.4074<br>5.4981             | 7.184<br>8.543<br>10.232               |
| 5          | †16.25<br>19.50<br>25.60  | 14.87<br>17.93<br>24.03 | .296<br>.362<br>.500   | 4.408<br>4.276<br>4.000 | 4.3743<br>5.2746<br>7.0686             | 9.718<br>11.415<br>14.491              |
| 5%         | †19.20<br>21.90<br>24.70  | 16.87<br>19.81<br>22.54 | .304<br>.361<br>.415   | 4.892<br>4.778<br>4.670 | 4.9524<br>5.8282<br>6.6295             | 12.221<br>14.062<br>15.658             |
| 6%         | 25.20                     | 22.19                   | .330                   | 5.965                   | 6.5262                                 | 19.572                                 |

(1) lb./pie = 3.3996 x A (columna 6)

(2) A = 0.7854 (D<sup>2</sup> - d<sup>2</sup>)(3) Z = 0.19635 ( $\frac{D^4 - d^4}{D}$ )



TABLA 2.2

# DATOS DE TENSION Y TORSION DE TUBERIAS DE PERFORACION NUEVAS

| 1                          | 2     | 3                                 | 4     | 5     | 6     | 7      | 8                             | 9      | 10     | 11     | 12     |
|----------------------------|-------|-----------------------------------|-------|-------|-------|--------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| D.E. PESO<br>(Pg.) NOMINAL |       | RESISTENCIA A LA TORSION (lb-pie) |       |       |       |        | RESISTENCIA A LA TENSION (lb) |        |        |        |        |
| (lb/pie)                   |       | D                                 | E     | 95    | 105   | 135    | D                             | E      | 95     | 105    | 135    |
| 2%                         | 4.85  | 3490                              | 4760  | 6030  | 6570  | 8570   | 71730                         | 97820  | 123900 | 136940 | 176070 |
|                            | 6.65  | 4580                              | 6250  | 7920  | 8750  | 11250  | 101360                        | 139220 | 175080 | 193500 | 248790 |
| 2%                         | 6.85  | 5930                              | 8080  | 10240 | 11320 | 14550  | 99660                         | 135900 | 172140 | 190260 | 244620 |
|                            | 10.40 | 8470                              | 11550 | 14640 | 16180 | 20800  | 157180                        | 214340 | 271500 | 300080 | 385220 |
| 3%                         | 9.50  | 10370                             | 14150 | 17920 | 19800 | 25460  | 142460                        | 194270 | 246070 | 271970 | 349680 |
|                            | 13.30 | 13500                             | 18550 | 23500 | 25970 | 33390  | 193150                        | 271570 | 343990 | 380190 | 488820 |
|                            | 15.50 | 15460                             | 21090 | 26710 | 29520 | 37950  | 236700                        | 322780 | 408350 | 451890 | 581000 |
| 4                          | 11.85 | 14280                             | 19470 | 24670 | 27260 | 35050  | 169220                        | 230750 | 292290 | 323050 | 415350 |
|                            | 14.00 | 17080                             | 23290 | 29500 | 32600 | 41920  | 209260                        | 285360 | 361460 | 399500 | 513650 |
|                            | 15.70 | 18930                             | 25810 | 32690 | 36130 | 46460  | 237690                        | 324120 | 410550 | 453770 | 583420 |
| 4%                         | 13.75 | 19000                             | 25910 | 32820 | 36270 | 46630  | 198020                        | 270030 | 342040 | 378040 | 486050 |
|                            | 16.60 | 22590                             | 30810 | 39020 | 43130 | 55450  | 242410                        | 330560 | 418700 | 462780 | 595000 |
|                            | 20.00 | 27060                             | 36900 | 46740 | 51660 | 66420  | 302400                        | 412360 | 522320 | 577300 | 742240 |
| 5                          | 16.25 | 25700                             | 35040 | 44390 | 49060 | 63080  | 204590                        | 328070 | 415560 | 459300 | 590530 |
|                            | 19.50 | 30190                             | 41170 | 52140 | 57600 | 74100  | 290100                        | 395600 | 501090 | 553830 | 712070 |
|                            | 25.60 | 38320                             | 52260 | 66190 | 73160 | 94060  | 368770                        | 530150 | 671520 | 742200 | 954260 |
| 5%                         | 19.20 | 32320                             | 44070 | 55630 | 61700 | 79330  | 272930                        | 372180 | 471430 | 521050 | 669920 |
|                            | 21.90 | 37190                             | 50710 | 64230 | 70930 | 91280  | 320550                        | 437120 | 553690 | 611960 | 786810 |
|                            | 24.70 | 41490                             | 56570 | 71660 | 79200 | 101830 | 364630                        | 497220 | 629810 | 696110 | 895000 |
| 6%                         | 25.20 | 51760                             | 70580 | 89400 | 99810 | 127050 | 358940                        | 489470 | 619990 | 685250 | 881040 |

TABLA 2.3

DATOS DE COLAPSO Y PRESION INTERNA  
DE TUBERIAS DE PERFORACION NUEVAS

| 1          | 2                         | 3                                          | 4                       | 5                       | 6                       | 7                       | 8                                                      | 9                      | 10                      | 11                      | 12                      |
|------------|---------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| D. E.      | PESO                      | RESTENCIA AL COLAPSO (lb/Pg <sup>2</sup> ) |                         |                         |                         |                         | RESISTENCIA A LA PRESION INTERNA (lb/Pg <sup>2</sup> ) |                        |                         |                         |                         |
| (Pg.)      | NOMINAL                   |                                            |                         |                         |                         |                         |                                                        |                        |                         |                         |                         |
| (lb / pie) |                           | D                                          | E                       | 95                      | 105                     | 135                     | D                                                      | E                      | 95                      | 105                     | 135                     |
| 2%         | † 4.85<br>6.65            | 8100<br>11440                              | 11040<br>15600          | 13930<br>19760          | 15460<br>21840          | 19070<br>28030          | —<br>11350                                             | 10500<br>15470         | 13300<br>19600          | 14700<br>21660          | 18900<br>27850          |
| 2%         | † 6.85<br>10.40           | 7680<br>12110                              | 10470<br>16510          | 12930<br>20910          | 14010<br>23110          | 17060<br>29720          | —<br>12120                                             | 9910<br>16530          | 12550<br>20930          | 13870<br>23140          | 17830<br>29750          |
| 3%         | 9.50<br>13.30<br>15.50    | 7400<br>10350<br>12300                     | 10040<br>14110<br>16770 | 12060<br>17850<br>21250 | 13050<br>19760<br>23480 | 15780<br>25400<br>30190 | —<br>10120<br>12350                                    | 9520<br>13800<br>16840 | 12070<br>17490<br>21330 | 13340<br>19320<br>23570 | 17150<br>24840<br>30310 |
| 4          | *11.85<br>14.00<br>†15.70 | 6590<br>8330<br>9460                       | 8410<br>11350<br>12900  | 9960<br>14380<br>16340  | 10700<br>15900<br>18050 | 12650<br>20170<br>23210 | —<br>7940<br>9140                                      | 8600<br>10830<br>12470 | 10390<br>13720<br>15790 | 12040<br>15160<br>17460 | 15480<br>19490<br>22440 |
| 4%         | *13.75<br>16.60<br>20.00  | 5720<br>7620<br>9510                       | 7200<br>10390<br>12960  | 8400<br>12750<br>16420  | 8950<br>13820<br>18150  | 10310<br>16500<br>23330 | —<br>7210<br>9200                                      | 7900<br>9830<br>12540  | 10010<br>12450<br>15890 | 11070<br>13760<br>17500 | 14230<br>17690<br>22580 |
| 5          | *16.25<br>19.50<br>25.60  | 5560<br>7390<br>9900                       | 6970<br>10000<br>13500  | 8090<br>12010<br>17100  | 8610<br>12990<br>18900  | 9860<br>15700<br>24300  | —<br>6970<br>9620                                      | 7770<br>9500<br>13120  | 9840<br>12040<br>16620  | 10860<br>13300<br>18380 | 13990<br>17110<br>23620 |
| 5%         | †19.20<br>21.90<br>24.70  | 4910<br>6610<br>7670                       | 6070<br>8440<br>10460   | 6930<br>10000<br>12920  | 7300<br>10740<br>14000  | 8120<br>12710<br>17050  | —<br>6320<br>7260                                      | 7250<br>8610<br>9900   | 9190<br>10910<br>12540  | 10160<br>12000<br>13860 | 13060<br>15510<br>17830 |
| 6%         | 25.20                     | 4010                                       | 4810                    | 5310                    | 5490                    | 6040                    | 4790                                                   | 6540                   | 8280                    | 9150                    | 11770                   |

$lb/ft = 3.9996 \times (\text{col. 6})$

$A = 0.7854 (D^2 - d^2)$

$Z = 0.19635 \left( \frac{D - d}{D} \right) \text{--- MODULO POLAR DE SECCION}$

+ ESTOS TAMAÑOS Y PESOS NO SON A. P. I.

\* ESTOS TAMAÑOS Y PESOS ESTAN CLASIFICADOS COMO TENTATIVOS POR EL A. P. I.

TABLA 2.4.

# DATOS DE TENSION Y TORSION DE TUBERIAS DE PERFORACION PREMIUM

| 1              | 2                           | 3                                 | 4     | 5     | 6     | 7     | 8                             | 9      | 10     | 11     | 12     |
|----------------|-----------------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| D. E.<br>(Pg.) | PESO<br>NOMINAL<br>(lb/pie) | RESISTENCIA A LA TORSION (lb-pie) |       |       |       |       | RESISTENCIA A LA TENSION (lb) |        |        |        |        |
|                |                             | D                                 | E     | 95    | 105   | 135   | D                             | E      | 95     | 105    | 135    |
| 2%             | 4.85                        | 2730                              | 3730  | 4720  | 5220  | 5710  | ---                           | 76880  | 97380  | 107640 | 138390 |
|                | 6.65                        | 3530                              | 4910  | 6090  | 6730  | 8660  | 78930                         | 107620 | 136330 | 150680 | 193730 |
| 2%             | 6.85                        | 4640                              | 6330  | 8020  | 8860  | 11400 | ---                           | 106950 | 135470 | 149730 | 192510 |
|                | 10.40                       | 6490                              | 8850  | 11220 | 12400 | 15940 | 122100                        | 166500 | 210900 | 233100 | 299700 |
| 3½             | 9.50                        | 8140                              | 11090 | 14050 | 15530 | 19970 | ---                           | 153000 | 193800 | 214200 | 275400 |
|                | 13.30                       | 10530                             | 14360 | 18190 | 20100 | 25850 | 155650                        | 212250 | 268350 | 297150 | 382050 |
|                | 15.50                       | 11840                             | 16140 | 20450 | 22600 | 29060 | 183700                        | 250500 | 317300 | 350700 | 450900 |
| 4              | 11.85                       | 11230                             | 15310 | 19390 | 21430 | 27560 | ---                           | 182020 | 230560 | 254840 | 327640 |
|                | 14.00                       | 13340                             | 18200 | 23050 | 25470 | 32750 | 164400                        | 224180 | 283960 | 313650 | 403520 |
|                | 15.70                       | 14720                             | 20070 | 25420 | 28030 | 36120 | 186180                        | 253880 | 321560 | 355430 | 456920 |
| 4½             | 13.75                       | 14960                             | 20400 | 25840 | 28560 | 36730 | ---                           | 213220 | 270080 | 298510 | 393900 |
|                | 16.60                       | 17700                             | 24130 | 30570 | 33790 | 43450 | 190740                        | 260100 | 329460 | 364140 | 468180 |
|                | 20.00                       | 21030                             | 28660 | 36330 | 40150 | 51630 | 236830                        | 322950 | 409070 | 452130 | 581310 |
| 5              | 16.25                       | 20250                             | 27610 | 34970 | 38650 | 49690 | ---                           | 259120 | 328220 | 362760 | 466420 |
|                | 19.50                       | 23680                             | 32290 | 40890 | 45200 | 58110 | 228460                        | 311540 | 394600 | 436150 | 560760 |
|                | 25.60                       | 29730                             | 40540 | 51360 | 56760 | 72980 | 304110                        | 414690 | 525270 | 580570 | 746440 |
| 5½             | 21.90                       | 29230                             | 39860 | 50490 | 55810 | 71750 | ---                           | 344780 | 436720 | 482690 | 620600 |
|                | 24.70                       | 32500                             | 44320 | 56140 | 62050 | 79780 | 286940                        | 391280 | 495630 | 547800 | 704310 |

TABLA 2.5

DATOS DE COLAPSO Y PRESION INTERNA  
DE TUBERIAS DE PERFORACION PREMIUM

| 1              | 2        | 3                                            | 4     | 5     | 6     | 7     | 8                                                       | 9     | 10    | 11    | 12    |
|----------------|----------|----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| D. E.<br>(Pg.) | PESO     | RESISTENCIA AL COLAPSO (lb/pg <sup>2</sup> ) |       |       |       |       | RESISTENCIA A LA PRESION INTERNA (lb /Pg <sup>2</sup> ) |       |       |       |       |
|                | NOMINAL  |                                              |       |       |       |       |                                                         |       |       |       |       |
|                | (lb/pie) | D                                            | E     | 95    | 105   | 135   | D                                                       | E     | 95    | 105   | 135   |
| 2 1/2          | 4.65     | 6690                                         | 8550  | 10150 | 10900 | 12920 | 7040                                                    | 9600  | 12160 | 13440 | 17280 |
|                | 6.65     | 9810                                         | 13380 | 16950 | 18730 | 24050 | 10370                                                   | 14150 | 17920 | 19810 | 25470 |
| 2 3/4          | 6.85     | 6060                                         | 7670  | 9090  | 9620  | 11210 | 6640                                                    | 9060  | 11470 | 12650 | 16300 |
|                | 10.40    | 10430                                        | 14220 | 18020 | 19910 | 25600 | 11080                                                   | 15110 | 19140 | 21150 | 27200 |
| 3 1/4          | 9.50     | 5650                                         | 7100  | 8270  | 8800  | 10120 | 6390                                                    | 8710  | 11030 | 12190 | 15680 |
|                | 13.30    | 8810                                         | 12020 | 15220 | 16820 | 21630 | 9250                                                    | 12620 | 15980 | 17660 | 22710 |
|                | 15.50    | 10610                                        | 14470 | 18330 | 20260 | 26050 | 11290                                                   | 15390 | 19500 | 21550 | 27710 |
| 4              | 11.85    | 4670                                         | 5730  | 6490  | 6820  | 7470  | 5760                                                    | 7860  | 9960  | 11000 | 14150 |
|                | 14.00    | 7000                                         | 9040  | 10780 | 11610 | 13570 | 7260                                                    | 9900  | 12540 | 13860 | 17820 |
|                | 15.70    | 8000                                         | 10910 | 13820 | 15180 | 18630 | 8360                                                    | 11400 | 14440 | 15960 | 20520 |
| 4 1/2          | 13.75    | 3940                                         | 4710  | 5170  | 5340  | 5910  | 5300                                                    | 7230  | 9150  | 10120 | 13010 |
|                | 16.60    | 5950                                         | 7550  | 8850  | 9460  | 10990 | 6590                                                    | 8990  | 11380 | 12580 | 16180 |
|                | 20.00    | 8050                                         | 10980 | 13900 | 15340 | 18840 | 8410                                                    | 11470 | 14520 | 16050 | 20640 |
| 5              | 16.25    | 3800                                         | 4510  | 4920  | 5060  | 5670  | 5210                                                    | 7100  | 9000  | 9950  | 12790 |
|                | 19.50    | 5630                                         | 7070  | 8230  | 8760  | 10050 | 6370                                                    | 8690  | 11000 | 12160 | 15640 |
|                | 25.60    | 8400                                         | 11460 | 14510 | 16040 | 20540 | 8800                                                    | 12000 | 15200 | 16800 | 21600 |
| 5 1/2          | 19.20    | 3260                                         | 3760  | 4140  | 4340  | 4720  | 4860                                                    | 6630  | 8400  | 9290  | 11940 |
|                | 21.90    | 4690                                         | 5760  | 6530  | 6860  | 7520  | 5780                                                    | 7880  | 9980  | 11020 | 14180 |
|                | 24.70    | 6060                                         | 7670  | 9000  | 9620  | 11200 | 6640                                                    | 9050  | 11470 | 12650 | 16300 |
| 6 1/2          | 25.20    | 2510                                         | 2930  | 3250  | 3350  | 3430  | 4380                                                    | 5980  | 7570  | 8370  | 10750 |



TABLA 2.6

**DATOS DE TENSION Y TORSION DE TUBERIAS  
DE PERFORACION CLASE 2.**

| 1     | 2        | 3                                 | 4     | 5     | 6     | 7     | 8                             | 9      | 10     | 11     | 12     |
|-------|----------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| D.E.  | PESO     | RESISTENCIA A LA TORSION (lb-pie) |       |       |       |       | RESISTENCIA A LA TENSION (lb) |        |        |        |        |
| (Pg.) | NOMINAL  |                                   |       |       |       |       |                               |        |        |        |        |
|       | (lb/pie) | D                                 | E     | 95    | 105   | 135   | D                             | E      | 95     | 105    | 135    |
| 2%    | 4.85     | 2250                              | 3040  | 3850  | 4250  | 5470  | .....                         | 76880  | 97380  | 107640 | 138380 |
|       | 6.65     | 2880                              | 3920  | 4970  | 5490  | 7060  | 78930                         | 107620 | 136330 | 150650 | 193730 |
| 2½    | 6.85     | 3790                              | 5160  | 6540  | 7230  | 9290  | .....                         | 106950 | 135470 | 149730 | 192510 |
|       | 10.40    | 5300                              | 7220  | 9150  | 10110 | 13000 | 122100                        | 166500 | 210900 | 233100 | 299700 |
| 3½    | 9.50     | 6630                              | 9040  | 11450 | 12650 | 16280 | .....                         | 153000 | 193800 | 214200 | 275400 |
|       | 13.30    | 8590                              | 11710 | 14830 | 16390 | 21070 | 155650                        | 212250 | 268850 | 297150 | 382050 |
|       | 15.50    | 9650                              | 13160 | 16670 | 18430 | 23690 | 183700                        | 250500 | 317300 | 350700 | 450900 |
| 4     | 11.85    | 9150                              | 12480 | 15810 | 17470 | 22460 | .....                         | 182020 | 230560 | 254840 | 327640 |
|       | 14.00    | 10880                             | 14830 | 18790 | 20770 | 26700 | 164400                        | 224180 | 283960 | 313850 | 403520 |
|       | 15.70    | 12000                             | 16360 | 20720 | 22900 | 29450 | 186180                        | 253880 | 321580 | 355430 | 456980 |
| 4½    | 13.75    | 12190                             | 16630 | 21060 | 23280 | 29930 | .....                         | 213220 | 270080 | 298510 | 383800 |
|       | 16.60    | 14430                             | 19630 | 24920 | 27550 | 35420 | 190740                        | 260100 | 329460 | 364140 | 468180 |
|       | 20.00    | 17150                             | 23380 | 29620 | 32740 | 42090 | 236830                        | 322950 | 409070 | 452130 | 581310 |
| 5     | 16.25    | 16500                             | 22500 | 28500 | 31500 | 40500 | .....                         | 259120 | 328220 | 362780 | 466420 |
|       | 19.50    | 19300                             | 26320 | 33330 | 36840 | 47370 | 228460                        | 311540 | 394600 | 436150 | 560760 |
|       | 25.60    | 24240                             | 33050 | 41870 | 46270 | 59490 | 304110                        | 414690 | 525270 | 589570 | 746440 |
| 5½    | 21.90    | 23830                             | 32490 | 41150 | 45490 | 58480 | .....                         | 344780 | 436720 | 482690 | 620600 |
|       | 24.70    | 26490                             | 36130 | 45760 | 50580 | 65030 | 286940                        | 391250 | 495630 | 547800 | 704310 |

TABLA 2.7

DATOS DE COLAPSO Y PRESION INTERNA  
DE TUBERIAS DE PERFORACION CLASE 2.

| 1      | 2        | 3                                            | 4     | 5     | 6     | 7     | 8                                                      | 9     | 10    | 11    | 12    |
|--------|----------|----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| D. E.  | PESO     | RESISTENCIA AL COLAPSO (lb/Pg <sup>2</sup> ) |       |       |       |       | RESISTENCIA A LA PRESION INTERNA (lb/Pg <sup>2</sup> ) |       |       |       |       |
| (P g.) | NOMINAL  |                                              |       |       |       |       |                                                        |       |       |       |       |
|        | (lb/pie) | D                                            | E     | 95    | 105   | 135   | D                                                      | E     | 95    | 105   | 135   |
| 2%     | 4.85     | 4820                                         | 6020  | 6870  | 7240  | 8030  | ----                                                   | 7800  | 9350  | 10920 | 14040 |
|        | 6.05     | 8420                                         | 11480 | 14540 | 16080 | 20630 | 8430                                                   | 11490 | 14560 | 16090 | 20690 |
| 2½     | 6.85     | 4340                                         | 5270  | 5900  | 6150  | 6610  | ----                                                   | 7360  | 9320  | 10300 | 13250 |
|        | 10.40    | 8990                                         | 12250 | 15520 | 17160 | 22060 | 9000                                                   | 12280 | 15550 | 17190 | 22100 |
| 3½     | 9.50     | 3990                                         | 4790  | 5270  | 5450  | 6010  | ----                                                   | 7080  | 8960  | 9910  | 12740 |
|        | 13.30    | 7520                                         | 10250 | 12420 | 13450 | 16310 | 7520                                                   | 10250 | 12990 | 14350 | 18450 |
|        | 15.50    | 9150                                         | 12480 | 15810 | 17480 | 22470 | 9170                                                   | 12510 | 15840 | 17510 | 22510 |
| 4      | 11.85    | 3160                                         | 3620  | 4020  | 4210  | 4550  | ----                                                   | 6390  | 8090  | 8940  | 11500 |
|        | 14.00    | 5180                                         | 6440  | 7410  | 7850  | 8840  | 5900                                                   | 8040  | 10190 | 11260 | 14480 |
|        | 15.70    | 6700                                         | 8560  | 10150 | 10910 | 12930 | 6790                                                   | 9260  | 11730 | 12970 | 16570 |
| 4½     | 13.75    | 2540                                         | 2950  | 3290  | 3400  | 3480  | ----                                                   | 5870  | 7440  | 8220  | 10570 |
|        | 16.60    | 4270                                         | 5170  | 5770  | 6010  | 6490  | 5350                                                   | 7300  | 9250  | 10220 | 13140 |
|        | 20.00    | 6770                                         | 8660  | 10280 | 11050 | 13120 | 6830                                                   | 9320  | 11800 | 13040 | 16770 |
| 5      | 16.25    | 2420                                         | 2850  | 3150  | 3240  | 3300  | ----                                                   | 5770  | 7310  | 8080  | 10390 |
|        | 19.50    | 3970                                         | 4760  | 5230  | 5410  | 5970  | 5180                                                   | 7060  | 8940  | 9880  | 12710 |
|        | 25.60    | 7150                                         | 9420  | 11270 | 12160 | 14590 | 7150                                                   | 9750  | 12350 | 13650 | 17550 |
| 5½     | 19.20    | 2110                                         | 2440  | 2610  | 2650  | 2650  | ----                                                   | 5390  | 6830  | 7540  | 9700  |
|        | 21.90    | 3170                                         | 3640  | 4040  | 4230  | 4580  | 4690                                                   | 6400  | 8110  | 8960  | 11520 |
|        | 24.70    | 4340                                         | 5260  | 5890  | 6140  | 6610  | 5400                                                   | 7360  | 9320  | 10300 | 13250 |
| 6%     | 25.20    | 1690                                         | 1870  | 1900  | 1900  | 1900  | ----                                                   | ----  | ----  | ----  | ----  |

# PROPIEDADES MECANICAS DE TUBERIA DE PERFORACION NUEVA GRADO "E" Y SUS CONEXIONES

| 1                      | 2                   | 3                    | 4    | 5           | 6              | 7              | 8                               | 9                         | 10                            | 11    | 12    |
|------------------------|---------------------|----------------------|------|-------------|----------------|----------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------|-------|
| TUBERIA                |                     |                      |      |             |                |                |                                 |                           |                               |       |       |
| D. E.<br>(Pg.)         | PESO PESO* REFUERZO |                      |      | CONEXION    |                |                | DIAMETRO<br>CALIBRADOR<br>(Pg.) | PROPIEDADES MECANICAS     |                               |       |       |
|                        | NOMINAL<br>(lb/pie) | AJUSTADO<br>(lb/pie) |      | TIPO        | D. E.<br>(Pg.) | D. I.<br>(Pg.) |                                 | TENSION (lb)<br>TP CONEX. | TORSION (lb-pie)<br>TP CONEX. |       |       |
|                        |                     |                      |      |             |                |                |                                 |                           |                               |       |       |
| 2 3/8                  | 4.85                | 5.15                 | E.U. | NC26 (I.F.) | 3 3/8          | 1 3/4          | 1.625                           | 97820                     | 313580                        | 4760  | 6800  |
|                        |                     | 5.09                 | E.U. | W.O.        | 3 3/8          | 2              | 1.807                           | 97820                     | 195720                        | 4760  | 4500  |
|                        |                     | 4.87                 | E.U. | O.H.        | 3 3/8          | 2              | 1.807                           | 97820                     | 206250                        | 4760  | 4600  |
|                        |                     | 4.94                 | E.U. | SL-H90      | 3 3/4          | 2              | 1.850                           | 97820                     | 202670                        | 4760  | 5100  |
|                        | 6.65                | 7.00                 | E.U. | NC26 (I.F.) | 3 3/4          | 1 3/4          | 1.625                           | 138220                    | 313680                        | 6250  | 6800  |
|                        |                     | 6.87                 | E.U. | O.H.        | 3 3/4          | 1 3/4          | 1.625                           | 138220                    | 294600                        | 6250  | 6400  |
|                        |                     | 6.65                 | I.U. | P.A.C.      | 2 7/8          | 1 3/8          | 1.250                           | 138220                    | 238440                        | 6250  | 4800  |
|                        |                     |                      |      |             |                |                |                                 |                           |                               |       |       |
| 2 7/8                  | 6.85                | 7.33                 | E.U. | NC31 (I.F.) | 4 1/8          | 2 1/8          | 2.000                           | 135900                    | 447130                        | 8080  | 11800 |
|                        |                     | 7.25                 | E.U. | W.O.        | 4 1/8          | 2 7/16         | 2.253                           | 135900                    | 277550                        | 8080  | 7400  |
|                        |                     | 6.91                 | E.U. | O.H.        | 3 3/4          | 2 7/16         | 2.253                           | 135900                    | 223680                        | 8080  | 5700  |
|                        |                     | 6.97                 | E.U. | SL-H90      | 3 7/8          | 2 7/16         | 2.296                           | 135900                    | 260760                        | 8080  | 7600  |
|                        | 10.40               | 10.82                | E.U. | NC31 (I.F.) | 4 1/8          | 2 1/8          | 1.963                           | 214340                    | 447130                        | 11550 | 11800 |
|                        |                     | 10.57                | E.U. | O.H.        | 3 7/8          | 2 5/32         | 1.963                           | 214340                    | 345360                        | 11550 | 8900  |
|                        |                     | 10.53                | E.U. | SL-H90      | 3 7/8          | 2 5/32         | 2.006                           | 214340                    | 382550                        | 11550 | 11300 |
|                        |                     |                      |      |             |                |                |                                 |                           |                               |       |       |
| 10.40                  | 11.20               |                      | I.U. | X.H.        | 4 1/4          | 1 7/8          | 1.750                           | 214340                    | 505080                        | 11550 | 13400 |
|                        |                     | 10.37                | I.U. | NC26 (S.H.) | 3 3/8          | 1 3/4          | 1.625                           | 214340                    | 313650                        | 11550 | 6300  |
| 10.40                  | 10.29               |                      | I.U. | P.A.C.      | 3 1/8          | 1 1/2          | 1.375                           | 214340                    | 269470                        | 11550 | 5800  |
| 3 1/2                  | 9.50                | 10.39                | E.U. | NC38 (I.F.) | 4 3/4          | 2 11/16        | 2.563                           | 194270                    | 587310                        | 14150 | 18100 |
|                        |                     | 10.25                | E.U. | NC38 (W.O.) | 4 3/4          | 3              | 2.804                           | 194270                    | 419500                        | 14150 | 12500 |
|                        |                     | 9.95                 | E.U. | O.H.        | 4 1/2          | 3              | 2.804                           | 194270                    | 392040                        | 14150 | 12100 |
|                        |                     | 10.12                | E.U. | SL-H90      | 4 5/8          | 3              | 2.847                           | 194270                    | 366450                        | 14150 | 12600 |
| 13.30                  | 13.86               |                      | E.U. | NC38 (I.F.) | 4 3/4          | 2 11/16        | 2.457                           | 271570                    | 587310                        | 18550 | 18100 |
|                        |                     | 13.86                | E.U. | O.H.        | 4 3/4          | 2 11/16        | 2.414                           | 271570                    | 559560                        | 18550 | 17400 |
| 13.30                  | 14.06               |                      | I.U. | X.H.        | 4 3/4          | 2 7/16         | 2.313                           | 271570                    | 570940                        | 18550 | 17100 |
|                        |                     | 13.51                | I.U. | NC31 (S.H.) | 4 1/8          | 2 1/8          | 2.000                           | 271570                    | 447130                        | 18550 | 11800 |
| 15.50                  | 16.42               |                      | E.U. | NC38 (I.F.) | 5              | 2 3/16         | 2.414                           | 322760                    | 649160                        | 21090 | 20300 |
| 4                      | 11.85               | 13.63                | E.U. | NC46 (I.F.) | 6              | 3 1/4          | 3.125                           | 230750                    | 901170                        | 19470 | 32500 |
|                        |                     | 13.48                | E.U. | NC46 (W.O.) | 6              | 3 7/16         | 3.313                           | 230750                    | 782990                        | 19470 | 29100 |
|                        |                     | 12.16                | E.U. | O.H.        | 5 1/4          | 3 15/32        | 3.287                           | 230750                    | 621240                        | 19470 | 22200 |
| 11.85                  | 13.09               |                      | I.U. | H-90        | 5 1/2          | 2 13/16        | 2.688                           | 230750                    | 913470                        | 19470 | 35400 |
| (Continued on page 15) |                     |                      |      |             |                |                |                                 |                           |                               |       |       |

(Continued on page 15)

\* INCLUYE CONEXION Y TUBO

PROPIEDADES MECANICAS DE TUBERIA DE PERFORACION  
NUEVA DE ALTA RESISTENCIA Y SUS CONEXIONES

| 1                | 2                   | 3                    | 4        | 5           | 6             | 7             | 8                               | 9                     | 10      | 11               | 12     |       |       |
|------------------|---------------------|----------------------|----------|-------------|---------------|---------------|---------------------------------|-----------------------|---------|------------------|--------|-------|-------|
| TUBERIA          |                     |                      |          |             |               |               |                                 |                       |         |                  |        |       |       |
| U. E.<br>(P. g.) | PESO                |                      | REFUERZO | CONEXION    |               |               | DIAMETRO<br>CALIBRADOR<br>(Pg.) | PROPIEDADES MECANICAS |         |                  |        |       |       |
|                  | NOMINAL<br>(lb/pie) | AJUSTADO<br>(lb/pie) |          | TIPO        | D.E.<br>(Pg.) | D.I.<br>(Pg.) |                                 | TENSION (lb)          |         | TORSION (lb-pie) |        |       |       |
|                  |                     |                      |          |             |               |               |                                 | TP CONEX.             |         | TP CONEX.        |        |       |       |
| 2 3/8            | 6.65                | 7.08                 | E.U.-95  | NC26(I.F.)  | 3 3/8         | 1 3/4         | 1.625                           | 175030                | 313630  | 7920             | 6600   |       |       |
|                  |                     | 6.91                 | E.U.-95  | SL-H90      | 3 1/4         | 1 13/16       | 1.670                           | 175080                | 270040  | 7920             | 6900   |       |       |
|                  |                     | 7.08                 | E.U.-105 | NC26(I.F.)  | 3 3/8         | 1 3/4         | 1.625                           | 193500                | 313650  | 8750             | 6800   |       |       |
|                  |                     | 6.91                 | E.U.-105 | SL-H90      | 3 1/4         | 1 13/16       | 1.670                           | 193500                | 270040  | 8750             | 6900   |       |       |
| 2 7/8            | 10.40               | 10.89                | E.U.-95  | NC31(I.F.)  | 4 1/8         | 2             | 1.875                           | 271500                | 495730  | 14640            | 13200  |       |       |
|                  |                     | 10.83                | E.U.-95  | SL-H90      | 4             | 2             | 1.875                           | 271500                | 443760  | 14640            | 13200  |       |       |
|                  |                     | 10.89                | E.U.-105 | NC31(I.F.)  | 4 1/8         | 2             | 1.875                           | 300080                | 495730  | 16180            | 13200  |       |       |
|                  |                     | 10.83                | E.U.-105 | SL-H90      | 4             | 2             | 1.875                           | 300080                | 443760  | 16180            | 13200  |       |       |
|                  |                     | 11.20                | E.U.-135 | NC31(I.F.)  | 4 3/8         | 1 5/8         | 1.500                           | 385820                | 623840  | 20300            | 17000  |       |       |
|                  |                     | 11.11                | E.U.-135 | SL-H90      | 4 1/8         | 1 5/8         | 1.500                           | 385820                | 571870  | 20800            | 17200  |       |       |
|                  |                     | 3 1/2                | 13.30    | 14.32       | E.U.-95       | NC38(I.F.)    | 5                               | 2 7/16                | 2.438   | 343990           | 649160 | 23500 | 20300 |
|                  |                     |                      |          | 14.09       | E.U.-95       | SL-H90        | 4 3/4                           | 2 7/16                | 2.438   | 343990           | 595310 | 23500 | 20900 |
| 14.38            | E.U.-105            |                      |          | NC38(I.F.)  | 5             | 2 7/16        | 2.313                           | 380190                | 709060  | 25970            | 22200  |       |       |
| 14.09            | E.U.-105            |                      |          | SL-H90      | 4 3/4         | 2 7/16        | 2.438                           | 380190                | 595810  | 25970            | 20900  |       |       |
|                  |                     | 14.45                | E.U.-135 | NC38(I.F.)  | 5             | 2 1/8         | 2.000                           | 488820                | 835400  | 33390            | 26400  |       |       |
|                  |                     | 14.69                | E.U.-135 | SL-H90      | 5             | 2 1/8         | 2.000                           | 488820                | 785090  | 33390            | 28100  |       |       |
|                  |                     | 14.95                | E.U.-135 | NC40(4F.H.) | 5 3/8         | 2 7/16        | 2.313                           | 488820                | 897160  | 33390            | 30000  |       |       |
|                  |                     | 15.50                | E.U.-95  | NC38(I.F.)  | 5             | 2 7/16        | 2.313                           | 408850                | 708060  | 26710            | 22200  |       |       |
|                  |                     | 16.61                | E.U.-105 | NC38(I.F.)  | 5             | 2 1/8         | 2.000                           | 451890                | 836400  | 29520            | 26400  |       |       |
|                  |                     | 17.43                | E.U.-135 | NC40(4F.H.) | 5 1/2         | 2 1/4         | 2.125                           | 581000                | 980000  | 37950            | 32900  |       |       |
|                  |                     | 4                    | 14.00    | 15.92       | E.U.-95       | NC46(I.F.)    | 6                               | 3 1/4                 | 3.125   | 361460           | 901170 | 29500 | 33600 |
|                  |                     |                      |          | 15.92       | E.U.-105      | NC46(I.F.)    | 6                               | 3 1/4                 | 3.125   | 399500           | 901170 | 32600 | 33600 |
| 16.06            | E.U.-135            |                      |          | NC46(I.F.)  | 6             | 3             | 2.875                           | 513650                | 1048430 | 41920            | 39200  |       |       |
| 15.16            | I.U.-95             |                      |          | NC40(F.H.)  | 5 1/4         | 2 11/16       | 2.563                           | 361460                | 776400  | 29500            | 25400  |       |       |
|                  |                     | 15.57                | I.U.-95  | H-90        | 5 1/2         | 2 13/16       | 2.688                           | 361460                | 913470  | 29500            | 35400  |       |       |
|                  |                     | 15.65                | I.U.-105 | NC40(F.H.)  | 5 1/2         | 2 7/16        | 2.313                           | 399500                | 897160  | 32600            | 30000  |       |       |
|                  |                     | 15.57                | I.U.-105 | H-90        | 5 1/2         | 2 13/16       | 2.688                           | 399500                | 913470  | 32600            | 35400  |       |       |

(Continued on page 17)

(Continued on page 17)

\* INCLUYE CONEXION Y TUBO



TABLA 2.12

# DIAMETRO EXTERIOR MINIMO Y APRIETE RECOMENDADO PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE CONEXIONES

| 1              | 2                | 3                           | 4                 | 5              | 6                      | 7      | 8                                                   | 9                | 10     | 11                                                  | 12               | 13     |
|----------------|------------------|-----------------------------|-------------------|----------------|------------------------|--------|-----------------------------------------------------|------------------|--------|-----------------------------------------------------|------------------|--------|
| TUBERIA        |                  |                             | CONEXION NUEVA    |                |                        |        | PREMIUM                                             |                  |        | CLASE 2                                             |                  |        |
| D. E.<br>(Pg.) | PESO<br>(lb/pie) | REFUERZO<br>NOMINAL Y GRADO | TIPO              | D. E.<br>(Pg.) | D. E. TORSION<br>(Pg.) | 0b-pie | D. E. HOMBRO<br>MINIMO<br>CONX. DE LA<br>CAJA (Pg.) | TORSION<br>(Pg.) | 0b-pie | D. E. HOMBRO<br>MINIMO<br>CONX. DE LA<br>CAJA (Pg.) | TORSION<br>(Pg.) | 0b-pie |
| 2 1/2          | 4.85             | E.U. 75                     | W.O.              | 3 3/4          | 2                      | 2300   | 3 3/4                                               | 3/32             | 2000   | 3                                                   | 3/32             | 1500   |
|                | 4.85             | E.U. 75                     | NC26(I.F.)        | 3 3/4          | 1 1/2                  | 3500   | 3 3/4                                               | 3/32             | 2000   | 3 3/4                                               | 3/32             | 2000   |
|                | 4.85             | E.U. 75                     | O.H.              | 3 3/4          | 2                      | 2400   | 3                                                   | 3/32             | 1800   | 2 3/4                                               | 3/32             | 1600   |
|                | 4.85             | E.U. 75                     | SL-H90            | 3 3/4          | 2                      | 2600   | 2 3/4                                               | 3/32             | 2000   | 2 3/4                                               | 3/32             | 2000   |
|                | 6.65             | I.U. 75                     | P.A.C.            | 2 1/2          | 1 1/2                  | 2500   | 2 3/4                                               | 3/32             | 2500   | 2 3/4                                               | 1/4              | 2100   |
|                | 6.65             | E.U. 75                     | NC26(I.F.)        | 3 3/4          | 1 1/2                  | 3500   | 3 3/4                                               | 3/32             | 2500   | 3 3/4                                               | 3/32             | 2000   |
|                | 6.65             | E.U. 75                     | SL-H90            | 3 3/4          | 2                      | 2600   | 3 3/4                                               | 3/32             | 2600   | 2 3/4                                               | 3/32             | 2000   |
|                | 6.65             | E.U. 75                     | O.H.              | 3 3/4          | 1 1/2                  | 3300   | 3 3/4                                               | 1/4              | 2300   | 3 3/4                                               | 1/4              | 2100   |
|                | 6.65             | E.U. 95                     | NC26(I.F.)        | 3 3/4          | 1 1/2                  | 3500   | 3 3/4                                               | 1/4              | 3000   | 3 3/4                                               | 3/32             | 2500   |
|                | 6.65             | E.U. 105                    | NC26(I.F.)        | 3 3/4          | 1 1/2                  | 3500   | 3 3/4                                               | 1/4              | 3300   | 3 3/4                                               | 3/32             | 2700   |
|                | 6.85             | E.U. 75                     | NC31 (2 1/2 I.F.) | 4 1/2          | 2 1/2                  | 5900   | 3 3/4                                               | 3/32             | 3200   | 3 3/4                                               | 3/32             | 2800   |
|                | 6.85             | E.U. 75                     | W.O.              | 4 1/2          | 2 1/2                  | 3800   | 3 3/4                                               | 3/32             | 3200   | 3 3/4                                               | 3/32             | 2500   |
|                | 6.85             | E.U. 75                     | O.H.              | 3 3/4          | 2 1/2                  | 2900   | 3 3/4                                               | 1/4              | 3300   | 3 3/4                                               | 3/32             | 2700   |
|                | 6.85             | E.U. 75                     | SL-H90            | 3 3/4          | 2 1/2                  | 3800   | 3 3/4                                               | 3/32             | 3800   | 3 3/4                                               | 3/32             | 3800   |
|                | 10.40            | E.U. 75                     | NC31(2 1/2 I.F.)  | 4 1/2          | 2 1/2                  | 5900   | 3 3/4                                               | 3/32             | 4600   | 3 3/4                                               | 3/32             | 3500   |
|                | 10.40            | I.U. 75                     | X.H.              | 4 1/2          | 1 1/2                  | 6700   | 3 3/4                                               | 1/4              | 4400   | 3 3/4                                               | 1/4              | 3700   |
| 3 1/2          | 9.50             | E.U. 75                     | NC38(W.O.)        | 4 1/2          | 3                      | 6400   | 4 1/2                                               | 3/32             | 5300   | 4 1/2                                               | 3/32             | 4800   |
|                | 9.50             | E.U. 75                     | NC38(I.F.)        | 4 1/2          | 2 3/4                  | 9100   | 4 1/2                                               | 3/32             | 5300   | 4 1/2                                               | 3/32             | 4800   |
|                | 9.50             | E.U. 75                     | O.H.              | 4 1/2          | 3                      | 6100   | 4 1/2                                               | 1/4              | 5500   | 4 1/2                                               | 3/32             | 4600   |
|                | 9.50             | E.U. 75                     | SL-H90            | 4 1/2          | 3                      | 6300   | 4 1/2                                               | 3/32             | 5500   | 4 1/2                                               | 3/32             | 4500   |
|                | 13.30            | E.U. 75                     | NC38(I.F.)        | 4 1/2          | 2 3/4                  | 9100   | 4 1/2                                               | 3/32             | 7300   | 4 1/2                                               | 3/32             | 5800   |
|                | 13.30            | I.U. 75                     | NC31(2 1/2 S.H.)  | 4 1/2          | 2 1/2                  | 6000   | 4                                                   | 3/32             | 6900   | 3 3/4                                               | 3/32             | 5700   |
|                | 13.30            | E.U. 75                     | O.H.              | 4 1/2          | 2 3/4                  | 8700   | 4 1/2                                               | 3/32             | 7000   | 4 1/2                                               | 3/32             | 6000   |
|                | 13.30            | E.U. 75                     | H90               | 5 1/2          | 2 1/2                  | 12000  | 4 1/2                                               | 3/32             | 7500   | 4 1/2                                               | 3/32             | 6200   |
|                | 13.30            | E.U. 95                     | NC38(I.F.)        | 5              | 2 3/4                  | 10200  | 4 1/2                                               | 3/32             | 8800   | 4 1/2                                               | 3/32             | 7300   |
|                | 13.30            | E.U. 95                     | SL-H90            | 4 1/2          | 2 3/4                  | 9300   | 4 1/2                                               | 3/32             | 8800   | 4 1/2                                               | 3/32             | 7100   |
|                | 13.30            | E.U. 95                     | H90               | 5 1/2          | 2 1/2                  | 12000  | 4 1/2                                               | 3/32             | 8800   | 4 1/2                                               | 3/32             | 7500   |
|                | 13.30            | E.U. 105                    | NC38(I.F.)        | 5              | 2 3/4                  | 11100  | 4 1/2                                               | 3/32             | 9900   | 4 1/2                                               | 3/32             | 8300   |
|                | 13.30            | E.U. 135                    | NC40(4 F.H.)      | 5 1/2          | 2 3/4                  | 15000  | 5                                                   | 3/32             | 12600  | 4 1/2                                               | 3/32             | 10200  |
|                | 13.30            | E.U. 135                    | NC38(3 1/2 I.F.)  | 5              | 2 3/4                  | 13300  | 4 1/2                                               | 3/32             | 12600  | 4 1/2                                               | 3/32             | 10400  |

#### IV. ESFUERZOS A QUE SE SOMETEN LAS SARTAS DE TRABAJO

Para efecto de diseño, el API considera que la sarta de trabajo, solamente es sometida a tres esfuerzos principales; tensión, colapso y torsión.

Se hace notar que no se considera para el diseño los esfuerzos derivados de la presión interna, debido a dos razones importantes; la primera es por indicación del API en el sentido que no recomienda usar la tubería de trabajo para operaciones en la que se tengan altas presiones interiores, y segundo, las tuberías más usuales en nuestro trabajo son de diámetro pequeño relativamente, y tienen alta capacidad para resistir presión interna.

A continuación se detallan cada uno de los esfuerzos y la forma de cuantificarlos.

##### a) Tensión

Este esfuerzo es generado por tres componentes principales:

1. El peso propio de la sarta.
2. Fuerzas aplicadas mecánicamente desde la superficie.
3. Fricción de la tubería con las paredes del agujero o tubería de revestimiento.

La capacidad a la tensión,  $P_t$ , de una tubería nueva, queda definida por la ecuación (1); la ecuación (2) define el mismo parámetro para una tubería premium o una tubería clase 2.

$$P_t = Y_m A_T \quad (1)$$

$$P_t = Y_m [(0.8 D_P + 0.2 D_I)^2 - (D_I)^2] \pi / 4 \quad (2)$$

Donde:  $P_T$  = resistencia a la tensión en (lb)

$A_T$  = área transversal del acero del cuerpo del tubo ( $\text{pg}^2$ )

TABL

| <u>GRADO</u> | <u>A'</u> |     | <u>C'</u> |
|--------------|-----------|-----|-----------|
| E            | 3.060     | 2   | 1805.0    |
| X-95         | 3.125     | 15  | 2405.0    |
| G-105        | 3.162     | 95  | 2700.0    |
| S-135        | 3.280     | 145 | 3600.0    |

TABL

| <u>GRADO</u> | <u>VALOR</u>             |
|--------------|--------------------------|
| E            | $13.67 < D/t \leq 23.09$ |
| X-95         | $12.83 < D/t \leq 21.21$ |
| G-105        | $12.56 < D/t \leq 20.66$ |
| S-135        | $11.90 < D/t \leq 19.14$ |

Si los valores de la relación,  $D/t$  caen dentro del rango dado en la Tabla 6, la resistencia al colapso se debe estimar con la expresión (5).

$$RCN = Y_m \left[ \frac{A}{(D/t)} - B \right] \quad (5)$$

TABLA 6

| <u>GRADO</u> | <u>A</u> | <u>B</u> | <u>VALOR</u>             |
|--------------|----------|----------|--------------------------|
| E            | 1.985    | .0417    | $23.09 < D/t \leq 32.05$ |
| X-95         | 2.047    | .0490    | $21.21 < D/t \leq 28.25$ |
| G-105        | 2.052    | .0515    | $20.66 < D/t \leq 26.86$ |
| S-135        | 2.129    | .0613    | $19.14 < D/t \leq 23.42$ |

Si las relaciones  $D/t$  son mayores que los especificados en la Tabla 7, con la expresión (6) se debe calcular la resistencia al colapso.

$$RCN = \frac{46.95 \times 10^6}{(D/t) [(D/t) - 1]^2}$$

6)

23.

# TABLA

## GRADO

E

X-95

G-105

S-135

Donde :  $RCN$  = resistencia<sup>n</sup> (lb/pg<sup>2</sup>).

Los valores del diámetro exterior de pared, están en función del desgaste exterior. En la continuación se dan expresiones para calcularlos según la considerada.

## Tubería nueva

$$D = DP \quad (7)$$

$$t = .5 (DP - DI) \quad (8)$$

## Premium

$$D = .8DP + .2DI \quad (9)$$

$$t = .4 (DP - DI) \quad (10)$$

## Clase 2

$$D = DP - .35 (DP - DI) \quad (11)$$

$$t = .325 (DP - DI) \quad (12)$$

Ver Figura 4-Bis



$Y_m$  = esfuerzo mínimo de cedencia (grado) (lb/pg<sup>2</sup>)

$D_p$  = diámetro exterior \* (pg)

$D_i$  = diámetro interior \* (pg)

#### b) Presión externa

Este esfuerzo es producido por la carga hidrostática del fluido de control y las presiones externas de cualquier tipo que sobre él se apliquen y accionen en la parte externa de la sarta.

La resistencia de la tubería al colapso por presión externa, sin estar sujeta a tensión y/o torsión, queda expresada en las ecuaciones 3, 4, 5 y 6; en función de la relación del diámetro exterior - real ( $D$ ), al espesor mínimo real ( $Z$ ).

$$RCN = 2Y_m \left[ \frac{D/t - 1}{(D/t)^2} \right] \quad (3)$$

La expresión (3) es aplicable para los distintos grados de acero, si la relación  $D/t$  cae en el rango establecido en la Tabla 3.

TABLA 3

| GRADO |            | VALOR |
|-------|------------|-------|
| E     | $D/t \leq$ | 13.67 |
| X-95  | $D/t \leq$ | 12.83 |
| G-105 | $D/t \leq$ | 12.56 |
| S-135 | $D/t \leq$ | 11.96 |

$$RCN = Y_m \left[ \frac{A'}{D/t} - B' \right] - C' \quad (4)$$

El rango de aplicación de la ecuación (4) se da en las Tablas 4 y

5.

\* Se refiere a dimensiones de la tubería en condiciones originales.

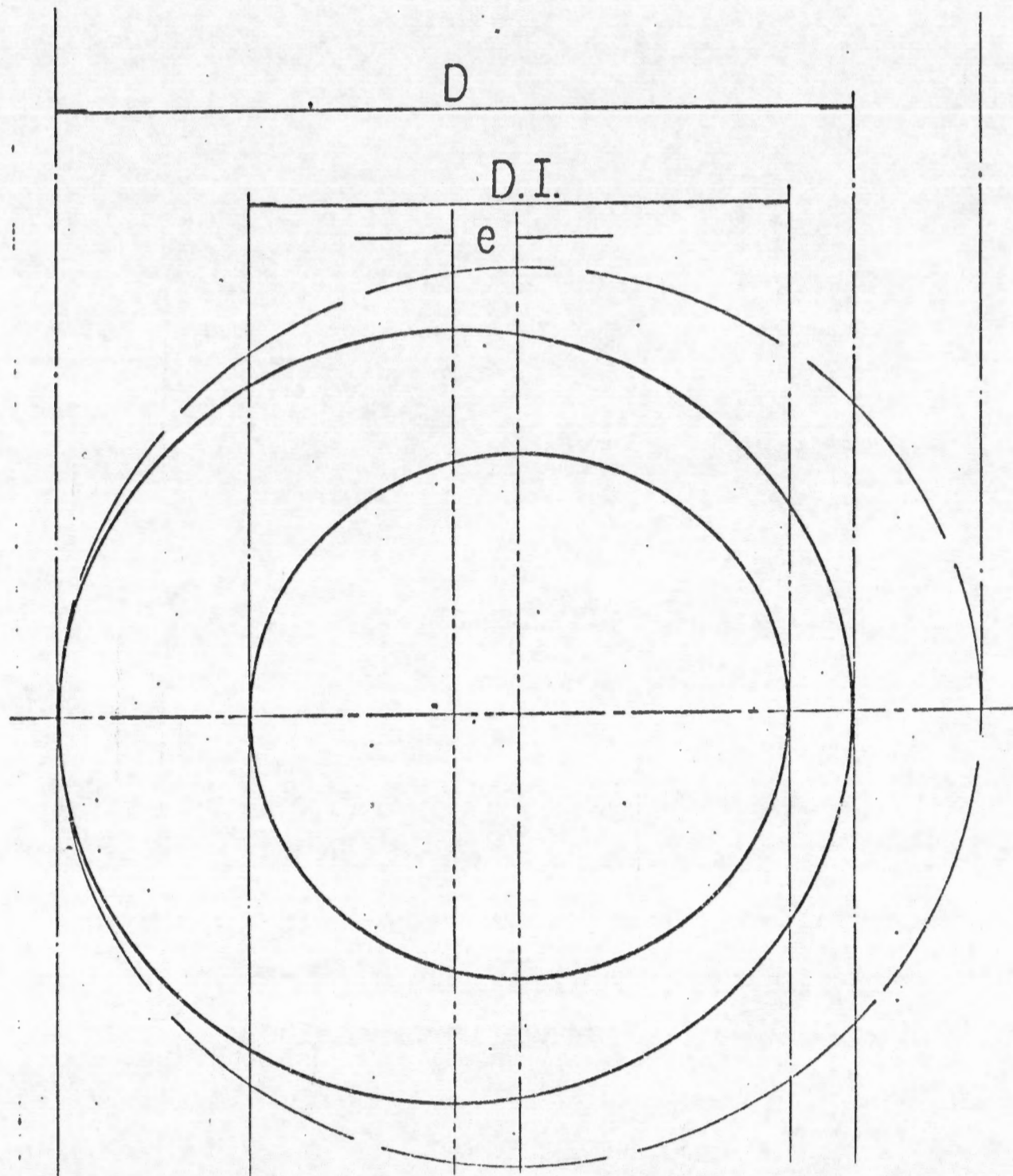


Fig. 4bis.-EXCENTRICIDAD POR DESGASTE DE UNA TUBERIA.

## c) Torsión

El esfuerzo de torsión a que puede someterse el cuerpo de una tubería sin estar sometida a otros esfuerzos, se estima con la expresión siguiente:

$$T = \frac{\pi S_s (D^4 - D_1^4)}{192 D F} \quad (13)$$

Donde:

$$F = 1 + \frac{4N^2 \emptyset}{(1-N^2)} + \frac{32 N^2 \emptyset^2}{(1-N^2)(1-N^4)} + \frac{48 N (1+2N^2+3N^4+2N^6) \emptyset^{13}}{(1-N^2)(1-N^4)(1-N^6)} \quad (14)$$

$$N = \frac{D_1}{D} \quad (15)$$

$$S_s = .577 Y_m \quad (16)$$

$$\emptyset = e/D \quad (17)$$

$$e = \frac{D_P - D_1}{2} - t \quad (18)$$

El diámetro exterior  $D$  y el espesor,  $t$ , se calculan con las expresiones 7 a 12, dadas anteriormente.

## V. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

De acuerdo a lo establecido por el API, para el diseño de sartas de trabajo, sólo se consideran los esfuerzos de tensión, presión externa y torsión.

### 5.1 Método Analítico

#### a) Diseño por tensión

Previo a iniciar el procedimiento, se recomienda fijar los siguientes parámetros:

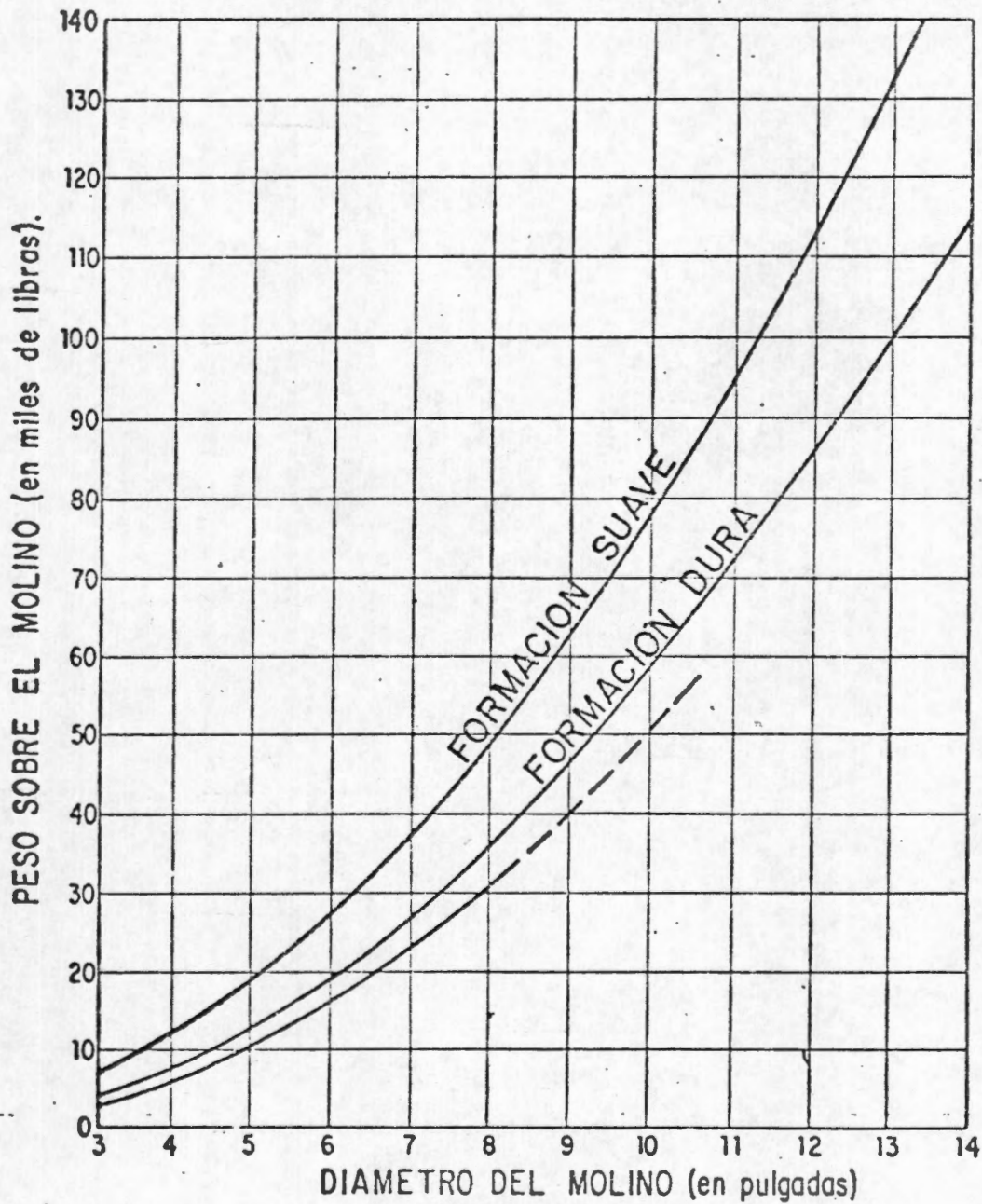
- . peso máximo sobre el molino.
- . longitud de lastrabarrenas.
- . margen para tensionar.

La cantidad recomendable de lastrabarrenas que se deben usar en una sarta de trabajo, depende principalmente del peso que se desea aplicar sobre la barrena o molino, para el caso de herramientas que operan por fricción, como es el caso de molinos, en la Fig. 5 se presentan las curvas de comportamiento para barrenas de diamante de la Compañía Hughes; en ésta, dado el diámetro de la barrena y dependiendo del tipo de formación se obtiene el peso máximo que se puede cargar sobre la herramienta. Por similitud en la forma de operación y de acuerdo con criterios prácticos de operación en México, se elaboró la curva discontinua para operación con molinos. El peso que puede cargarse puede también ser estimado con la ecuación 19, en esta ecuación el factor de seguridad  $F_m$ , es de 0.75 para diámetro de molino mayores o iguales que 4.5" y de 1 para diámetros menores, lo anterior es válido siempre y cuando la sarta vaya sin estabilizadores, de lo contrario  $F_m$  vale 1.

En la Tabla 8 se dan los pesos máximos permisibles para el caso de molinos.



FIGURA 5  
PESO SOBRE MOLINO MAXIMO RECOMENDADO.  
(REDUCE UN 25 % SI NO USA ESTABILIZADORES)



$$P_{sm} = [121001.8 - 103251.6 D_m + 32292.19 D_m^2 - 4250 D_m^3 + 208.33 D_m^4] F_m \quad (19)$$

Donde  $P_{sm}$  = peso sobre el molino en (lb)

$D_m$  = diámetro del molino en (pg)

$F_m = .75$  si  $D_m \geq 4.5$ ,  $F_m = 1$  si  $D_m < 4.5$

TABLA 8

| $D_m$ (pg) | $P_{sm}$ (lb) | $D_m$ (pg) | $P_{sm}$ (lb) |
|------------|---------------|------------|---------------|
| 3 1/2      | 4500          | 5 1/2      | 9750          |
| 3 5/8      | 5000          | 5 7/8      | 12000         |
| 3 7/8      | 6000          | 6 1/2      | 15000         |
| 4 1/4      | 7000          |            |               |
| 4 5/8      | 7500          |            |               |

En pozos revestidos se recomienda el uso de estabilizadores con la finalidad de obtener las condiciones de operación favorables siguientes:

1. Distribuir el peso adecuadamente sobre la barrena o molino para mejorar los ritmos de penetración.
2. Evitar daños a la T.R.
3. Prolongar la vida útil de la barrena o molino.
4. Disminuir vibraciones en la sarta de trabajo.

La forma en que deben distribuirse en la sarta según la Compañía DRILCO es: uno inmediatamente arriba de la barrena o molino, otro espaciado un lastrabarrenas corto y un tercero colocado en seguida de un lastrabarrenas de longitud normal, esquemáticamente se puede ver en la Fig.

10.

El tipo de estabilizador recomendable es el que se muestra en la Fig.

11. Este estabilizador es de camisa de hule no rotatorio con lo que se evita al máximo los daños a la tubería de revestimiento.



ESTABILIZADOR

LASTRABARRENAS (30pies)



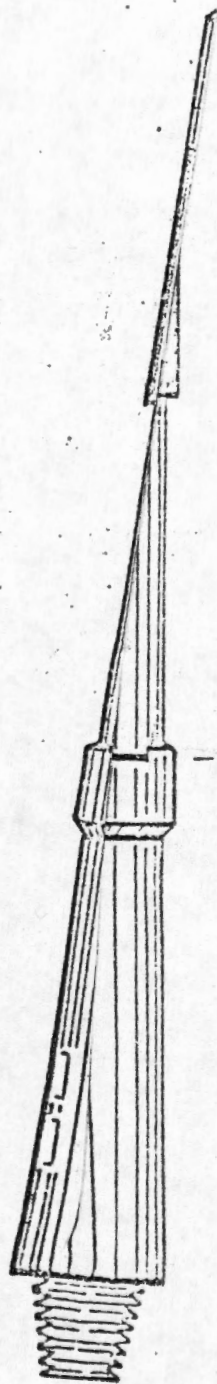
ESTABILIZADOR

LASTRABARRENA (CORTO)



ESTABILIZADOR

BARRENA O MOLINO



1.- ESTARILIZADOR CON CAMISA DE HULE.



En caso de que el diseño anterior no permita bajar la sarta libremente, se recomienda eliminar el estabilizador superior para disminuir la rigidez.

La cantidad de lastrabarrenas que debe llevar la sarta en función del peso sobre la barrena o el molino requeridos, se calcula con la expresión 20.

$$L_{oc} = \frac{(.3048) P_{sm}}{K_b \cdot F_s \cdot \cos \alpha \cdot W_{dc}} \quad (20)$$

Donde  $L$  = longitud de lastrabarrenas en (m)

$F_s$  = factor de seguridad de punto neutro, se recomienda un valor de .85.

$\alpha$  = ángulo de desviación del pozo referido a la vertical.

$W_{dc}$  = peso nominal unitario de las lastrabarrenas en (lb/pie).

$$K_b = \left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_a}\right) = \text{Factor Flotación} \quad (21)$$

$\rho_L$  = densidad del fluido de control en gr/cc.

$\rho_a$  = densidad del acero en gr/cc.

La cantidad permisible de tubería que se puede introducir en un pozo - considerando sólo efectos de tensión se determina con la ecuación (22), la cual se da en su forma general. Para calcular cada una de las secciones que conforman la sarta considerando las tuberías disponibles, el procedimiento consiste en ir calculando cada una de las secciones iniciando con la de menor resistencia hasta completar la longitud total.

$$L_n = \left[ \left( \frac{P_{tn}(0.9) - 2200 \text{ MOP} - T_F}{W_n K_b} \right) - \left( \frac{W_{n-1} L_{n-1} + W_{n-2} L_{n-2} + \dots + W_{dc} L_{dc}}{W_n} \right) \right] 0.3048 \quad (22)$$

Donde  $L_n$  = longitud de tubería de la sección en (m)

$P_{tn}$  = capacidad de tensión calculada con las expresiones 6.2 dependiendo de la clase de la tubería en (lb)

MOP = margen para tensionar, se fija a criterio del diseñador,

en función de las herramientas que en algún momento -  
dado se requiera utilizar (ton).

$W_n$  = peso ajustado unitario de la tubería (lb/pie)

$K_b$  = factor de flotación (adimensional)

$TF$  = fuerza que se genera por efecto de fricción en los -  
cambios de dirección en pozos desviados, en (lb), se  
calcula con la ecuación (23).

$$TF = 63\theta DPW \quad (23)$$

Donde  $\theta$  = pendiente de la desviación en ( $^{\circ}/100$  pie)

$DP$  = diámetro exterior de la tubería de trabajo mayor que -  
pase frente a la desviación (pg).

$W$  = peso unitario nominal de la tubería de mayor diámetro  
que pase la zona desviada (lb/pie).

#### b) Colapso

Una vez que se dispone del diseño por tensión, paso imprescindible para  
continuar, se procede al diseño por colapso.

El diseño consiste en determinar la reducción en la capacidad de la tu-  
bería para resistir presión externa como resultado de la tensión apli-  
cada. Esto debe efectuarse en los extremos de cada sección de tubería  
diseñada previamente por tensión.

El procedimiento que se recomienda seguir es el siguiente:

1. determinar la constante adimensional,  $r$ , definida en la expresión -  
24.
2. obtener el valor de la constante,  $Z$ , con la ecuación de la elipse de -  
esfuerzos biaxiales normalizada dada en 25.
3. con la relación 26 calcular la resistencia al colapso en condiciones  
de tensión. El factor de seguridad para este concepto es 1.125.

$$r = \frac{\text{tensión aplicada}}{A_t \overline{PCP}} \quad (24)$$

$$z^2 + rz + r^2 - 1 = 0 \quad (25)$$

$$z = \frac{-r + \sqrt{4 - 3r^2}}{2} \quad (25-A)$$

$$R_{cb1} = Z (RCN) \quad (26)$$

Donde  $A_t$  = área transversal del acero del cuerpo del tubo en (pg<sup>2</sup>)

$\overline{PCP}$  = punto de cedencia promedio (lb/pg<sup>2</sup>)

$RCN$  = resistencia al colapso nominal (lb/pg<sup>2</sup>) calculada con las expresiones 3 a 6 según la clase de la tubería.

$R_{cb1}$  = resistencia al colapso de una tubería tensionada - - (lb/pg<sup>2</sup>).

El punto de cedencia promedio,  $\overline{PCP}$ , es la media aritmética de la mínima y máxima resistencia cedente, para cada calidad de acero se da en la Tabla 9.

TABLA 9.

| GRADO | $\overline{PCP}$<br>(lb/pg <sup>2</sup> ) | $PC_{min}$<br>(lb/pg <sup>2</sup> ) | $PC_{max}$<br>(lb/pg <sup>2</sup> ) |
|-------|-------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| E     | 85000                                     | 75000                               | 95000                               |
| X     | 110000                                    | 95000                               | 125000                              |
| G     | 120000                                    | 105000                              | 135000                              |
| S-135 | 145000                                    | 135000                              | 155000                              |

### c) Torsión

La cantidad de esfuerzo de torsión que resiste una tubería bajo tensión, se calcula con la expresión (27); el cálculo debe hacerse en cada cambio de grado, peso ó diámetro de tubería. El valor mínimo que resulte en cualquiera de los puntos analizados deberá ser la condición de fron-

tera en operaciones reales de campo. En caso de herramientas que se operan con torsión y tensión como es el caso de algunas herramientas de percusión el valor de torsión obtenido por diseño deberá ser superior a la torsión necesaria para operar los martillos de lo contrario se deberá cambiar el diseño de la sarta.

$$T_T = \frac{0.096167 J}{D} \left( \gamma m^2 - \frac{P^2}{A t^2} \right)^{1/2} \quad (27)$$

Donde  $T_T$  = par de torsión bajo condiciones de tensión (lb/pie)

$J$  = momento polar de inercia definido como:

$$J = \frac{\pi}{32} (D^4 - D_i^4) \quad (28)$$

$D$  = diámetro exterior definido según las ecuaciones 7, 10 y 12.

$P$  = peso aplicado en el punto de interés (lb)

Una vez efectuado el procedimiento marcado en los incisos a), b) y c) se procederá de la siguiente manera:

- 1) En un sistema de coordenadas en el cual aparezcan valores de presión en el eje horizontal y profundidad en el eje vertical, se traza la línea de gradiente del fluido de control afectado por un factor de seguridad de 1.125.
- 2) Ubicar los valores de resistencia al colapso bajo tensión calculados en el inciso b), de acuerdo a su profundidad y unirlos.
- 3) La parte de la línea que una los valores de,  $R_{cbt}$ , y que quedan en el espacio comprendido entre el eje vertical y la línea de gradiente quedarán fuera de diseño.
- 4) Las secciones de tubería que estén en el caso del inciso anterior -- deben ser sustituidos por tuberías de grado o calidad inmediata superior y repetir el procedimiento de diseño a partir del inciso b).



## 5.2 Método Gráfico

En base a las ecuaciones que se mencionaron en párrafos anteriores y con el fin de hacer más sencillo el diseño de una sarta de trabajo se elaboraron las gráficas que a continuación se describen:

Con la primera gráfica (Figura # 8) se puede calcular la longitud de cada sección que forma la sarta por efecto de tensión; en el eje horizontal se graficó el esfuerzo a la tensión y en el eje vertical la profundidad.

Entrando al eje de las abscisas con la máxima resistencia a la tensión de las tuberías (obtenida de Tablas RP-7G-API) y observando como va disminuyendo esta resistencia al ir teniendo carga, llegando al eje de las ordenadas, indicándonos la máxima longitud que se podrá usar de esta tubería correspondiente a cero de resistencia a la tensión. Estas gráficas se elaboraron para tuberías de 2 3/8", 2 7/8" y 3 1/2", para grados E-75, X-95, G-105, S-135, para clase nueva, premium y dos así como para diferentes densidades de lodo desde 0.8 hasta 2.0 gr/cc.

Para uso de estas gráficas se procede como sigue:

- 1) Se seleccionan las gráficas de las tuberías que se tengan disponibles en el campo.
- 2) Con la gráfica de menor grado y peso se inicia el diseño.
- 3) Se calcula el peso de lastrabarrenas.
- 4) Se establece el margen para tensionar (MOP).
- 5) Con la suma de los dos valores anteriores se entra al eje horizontal obteniendo un punto. Desde ese punto se baja una vertical hasta intersectar la recta correspondiente al lodo que se está usando.
- 6) Desde este punto se traza una horizontal hasta el eje vertical obteniendo la longitud máxima de tubería que se puede meter de esta primera sección.

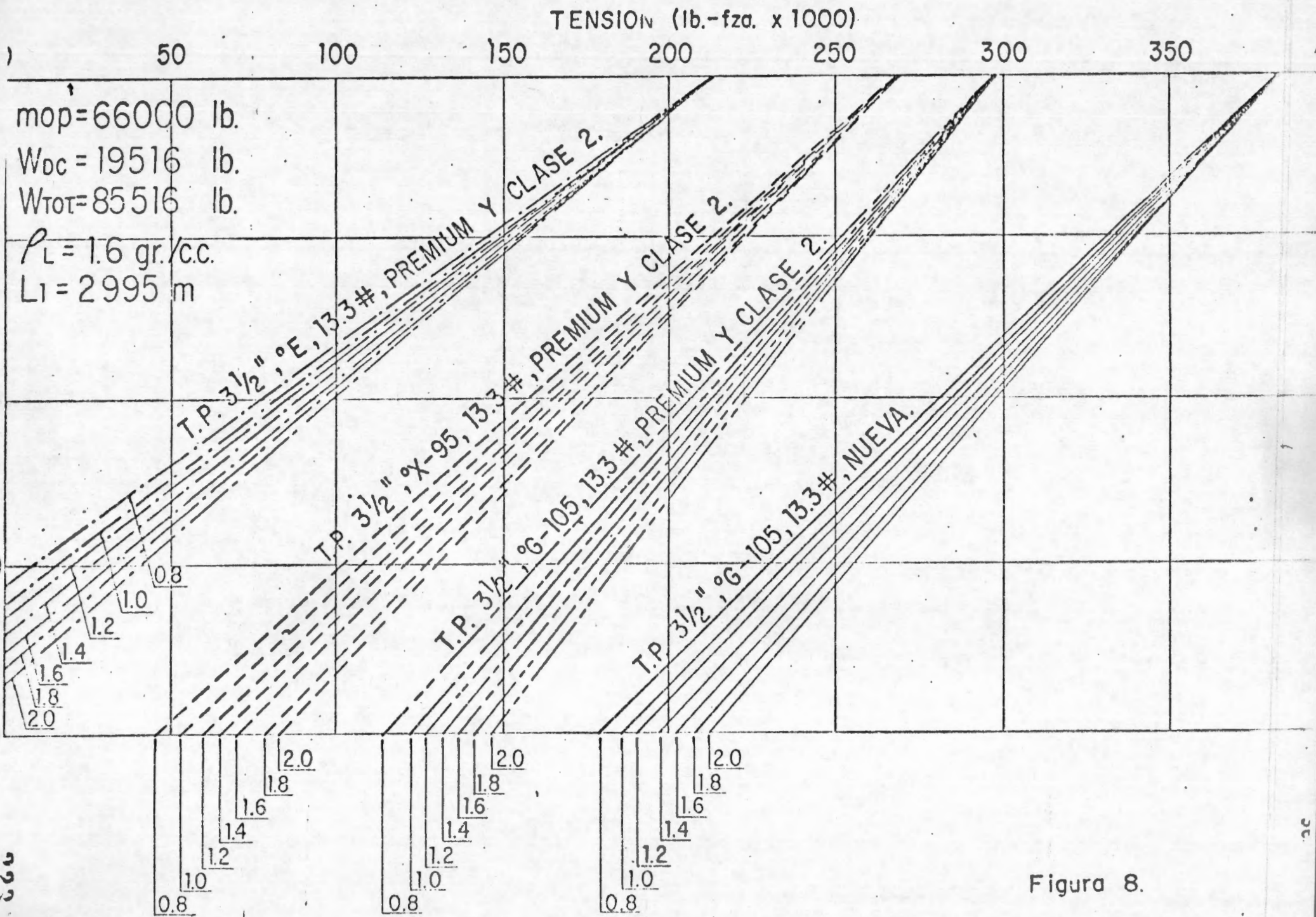


Figura 8.

- 7) Partiendo del valor máximo de resistencia a la tensión de la tubería antes mencionada, en la gráfica que sigue de mayor grado, mayor peso o diferente clase y procediendo de igual forma que la explicada en el punto 3 se obtiene la longitud de la segunda sección.
- 8) Así hasta acompletar la longitud total necesaria de tubería.
- 9) En dado caso que no se introduzca el total de la sección calculada, como puede ser el caso de sartas combinadas; lo que procede es transformar en resistencia la longitud de tubería que no entró y restarla del valor máximo que se tiene, obteniendo la cantidad con la que hay que entrar a las gráficas para estimar la longitud de la siguiente sección.
- 10) El siguiente paso en el diseño es calcular la sarta por colapso, utilizando la Elipse de esfuerzos (ver Fig. 6).

El procedimiento es el siguiente:

- i) Contando con el peso en los extremos de cada una de las secciones anteriormente diseñadas se procede a calcular el por ciento que está tensionada la TP en cada punto de la siguiente manera:

$$\% \text{ tensión} = \frac{\text{Tensión en el punto considerado}}{\text{Resistencia total tensión}} \times Cr$$

$$\text{donde } Cr = \frac{\text{Grado TP}}{\text{PCP}} \times 100$$

- ii) Con este valor se entra a la Elipse de esfuerzos sobre el eje de tensión encontrando un punto, se baja una vertical hasta intersectar la curva obteniendo el por ciento de resistencia al colapso que tiene la tubería cuando se tiene sometida a una cierta tensión. Este valor encontrado se multiplica por el valor al colapso dado en Tablas y se obtiene el valor al colapso en el punto deseado.



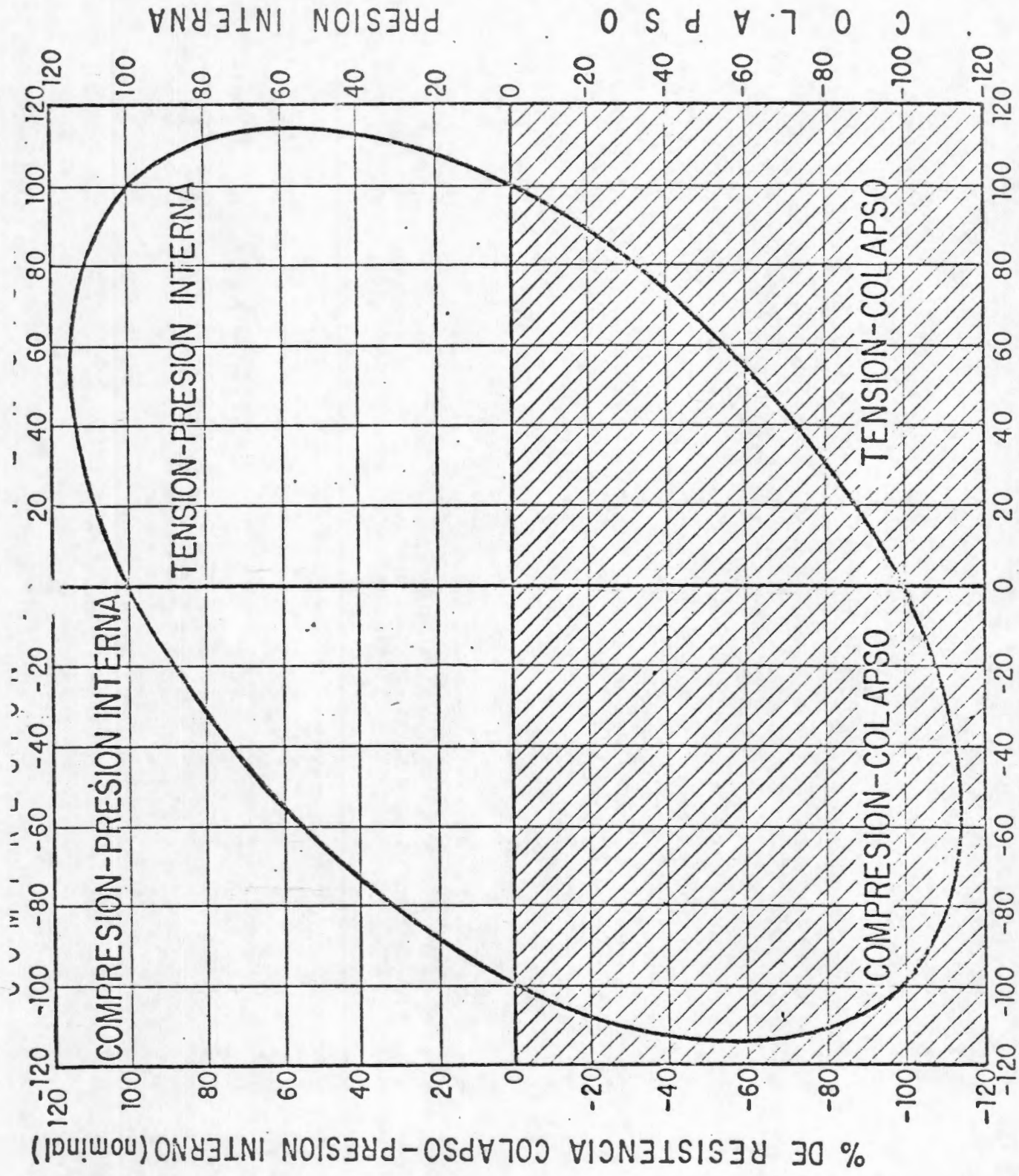


Fig. 6.-ELIPSE DE ESFUERZOS BIAXIALES.



iii) Este valor se compara con la presión que ejerce el fluido en ese punto, si es menor, entonces la T.P. no es recomendable por presión externa, se tendrá que ir al siguiente grado de T.P. y volver a hacer el diseño por colapso hasta que los valores de presión sean cercanos o iguales, entonces, nuestra sarta estará en condiciones favorables -- por colapso.

11) Continuando con el diseño de nuestra sarta el último punto por calcular es el que se refiere a la torsión.

Para calcular la sarta por torsión y con el fin de hacer más sencillo el diseño se hicieron las gráficas como la mostrada en la Fig. 9 en donde se vé en el eje horizontal la tensión aplicada y en el eje vertical el esfuerzo a la torsión.

De igual manera que la gráfica (8) tensión-profundidad también se elaboraron para las tuberías ya mencionadas.

Entrando a estas gráficas con el valor de tensión ya calculado en cada punto diseñado anteriormente, levantando una vertical hasta intersectar la curva correspondiente a la clase de tubería se obtiene el valor máximo del esfuerzo a la torsión. Con todos los valores de torsión encontrados en la sarta se escoge el mínimo, este valor será con el cual nuestra sarta pueda trabajar o dicho de otra manera será el valor máximo al que debe regularse la mesa rotatoria.

### 5.3 Costos

La tubería de trabajo es una de las herramientas más caras usadas para -- ejecutar las operaciones en la intervención de un pozo, por lo que, considerando la información de la Tabla A se hacen cálculos elementales en donde se puede ver el beneficio económico de una sarta optimizada en comparación con una que sólo está constituida por tubos de grado G-105.

# TABLA A

COSTO POR CADA TUBO DE PERFORACION DE 3 1/2", 13.3 #/PIE, RANGO 2

| C O N C E P T O                                        | COSTO, \$/TUBO |           |           |           |
|--------------------------------------------------------|----------------|-----------|-----------|-----------|
|                                                        | E E            | X         | G         | S         |
| 1. TUBO CON EXTREMOS RECALCADOS SIN JUNTAS             | 65443          | 77811     | 92735     | 102090    |
| 2. CONEXIONES (INCLUYE MAQUINADO DE ROSCA Y SOLDADURA) | 92101          | 107062    | 112519    | 132038    |
| 3. REVESTIMIENTO PLASTICO INTERIOR                     | 4700           | 4700      | 4700      | 4700      |
| 4. PROTECTOR DEL PIRON                                 | 2500           | 2500      | 2500      | 2500      |
| COSTO TOTAL/TUBO                                       | \$ 164744      | \$ 192073 | \$ 212454 | \$ 241328 |

## VI. EJEMPLO ILUSTRATIVO

Considerando que se dispone de la tubería de 3 1/2" IF, 13.3<sup>#</sup>/pie anotada en la Tabla A1, calcular la sarta económicamente óptima para trabajar a una profundidad de 6000 m. bajo las condiciones siguientes:

Peso sobre el molino ..... 6 ton.  
 Lastrabarreras ..... 4 3/4" x 2" de 50<sup>#</sup>/pie  
 MOP ..... 30 ton.  
 Densidad del fluido de control ..... 1.6 gr/cc  
 Angulo de desviación ..... pozo vertical

TABLA A-1

| T.P. | GRADO | CLASE   | DI<br>(pg) | W<br>(lb/pie) | P<br>(lb) | RCN<br>(lb/pg <sup>2</sup> ) | T<br>(lb-pie) | T<br>(lb-pie) |
|------|-------|---------|------------|---------------|-----------|------------------------------|---------------|---------------|
| 1    | E-75  | 2       | 2.764      | 14            | 212250    | 10250                        | 11710         | 18100         |
| 2    | E-75  | Premium | 2.764      | 14            | 212250    | 12020                        | 14360         | 18100         |
| 3    | X-95  | Premium | 2.764      | 14.6          | 268850    | 15220                        | 18190         | 20300         |
| 4    | G-105 | Nueva   | 2.764      | 14.7          | 380190    | 19760                        | 25970         | 22200         |

## Secuencia

## 1. Factor de flotación

$$K_b = 1 - \frac{e L}{e a} = 0.796$$

## 2. De la ecuación (20) la cantidad de lastrabarreras necesarias son:

$$L_{DC} = \frac{.3048 P_{sm}}{K_b \cdot F_s \cdot \cos \alpha \cdot W_{dc}} = \frac{.3048 (6000 \times 2.2)}{.796 \times .85 \times \cos 0^\circ \times 50} = 119M$$

## 3. Cada una de las secciones de tubería que pueden introducirse considerando sólo efectos de tensión se calculan con la expresión (22).

$$L_1 = \left( \frac{P_1(0.9) - MOP - T F}{W_i K_b} - \frac{LDC}{W_i} \frac{W_{DC}}{W_i} \right) 0.3048$$

$$= \left( \frac{212250 \times .9 - 30000 \times 2.2}{14 \times .796} - \frac{119 \times 50 \times 3.28}{14} \right) \times 0.3048$$

= 2995.0 m. de T.P. 3 1/2" IF, 13.3 lb/pie clase 2

De manera similar se estimaron las secciones de tubería anotadas en la Tabla A-1 Bis.

TABLA A-1 Bis

| SECCION | Ø<br>T.P. | GRADO | CLASE   | CONEX. | W<br>(lb/pie) | L<br>(m)     | L<br>(acum)<br>(m) |
|---------|-----------|-------|---------|--------|---------------|--------------|--------------------|
| 3       | 3 1/2"    | G-105 | Nueva   | IF     | 14.7          | 1734         | 6000               |
| 2       | 3 1/2"    | X-95  | Premium | IF     | 14.6          | 1152<br>1338 | 4266               |
| 1       | 3 1/2"    | F-75  | Clase 2 | IF     | 14            | 2995         | 3114               |
| DC      | 4 3/4"-2" | -     | -       | -      | 50            | 119          | 119                |

De acuerdo con el procedimiento descrito anteriormente, ya determinadas las secciones por tensión, se calcula la disminución de la resistencia al colapso por efecto de tensión  $R_{cb2}$ , en los puntos 1-6 del esquema de la parte izquierda, los resultados se resumen en la Tabla A-2.

$$\frac{W_{b/pie} (lb)}{W_{b/pie}} [pie]$$



TABLA A-2

| PUNTO | PROF (m) | RESISTENCIA AL COLAPSO BAJO TENSION (kg/cm <sup>2</sup> ) |         |          |       | P.ext.(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|-------|----------|-----------------------------------------------------------|---------|----------|-------|-----------------------------|
|       |          | E                                                         | X       | G        |       |                             |
|       |          | CLASE 2                                                   | PREMIUM | PREMIUM. | NUEVA |                             |
| 1     | 5881     | 698                                                       | 818     | 1043     | -     | 1057                        |
| 2     | 2886     | 465                                                       | 545     | 750      | -     | 519                         |
| 3     | 2886     |                                                           |         | 781      | -     | 519                         |
| 4     | 1734     |                                                           |         | 642      | 1040  | 312                         |
| 5     | 1734     |                                                           |         |          | 852   | 0                           |

Para interpretar de una manera más clara la información de la Tabla anterior es recomendable auxiliarse de una gráfica como la que se muestra en la Fig.A-3 en donde en un sistema cartesiano se grafican, la línea de gradiente del fluido de control y las profundidades de las secciones de tubería con un valor -- asociado de  $R_{cvt}$ . Es obvio que las tuberías °E clase 2 y premium quedan fuera de especificaciones ya que están en la parte inferior de la línea de gradiente, de tal manera que deben ser substituidas por X-95 premium la cual justo -- apenas cumple para la condición de colapso.

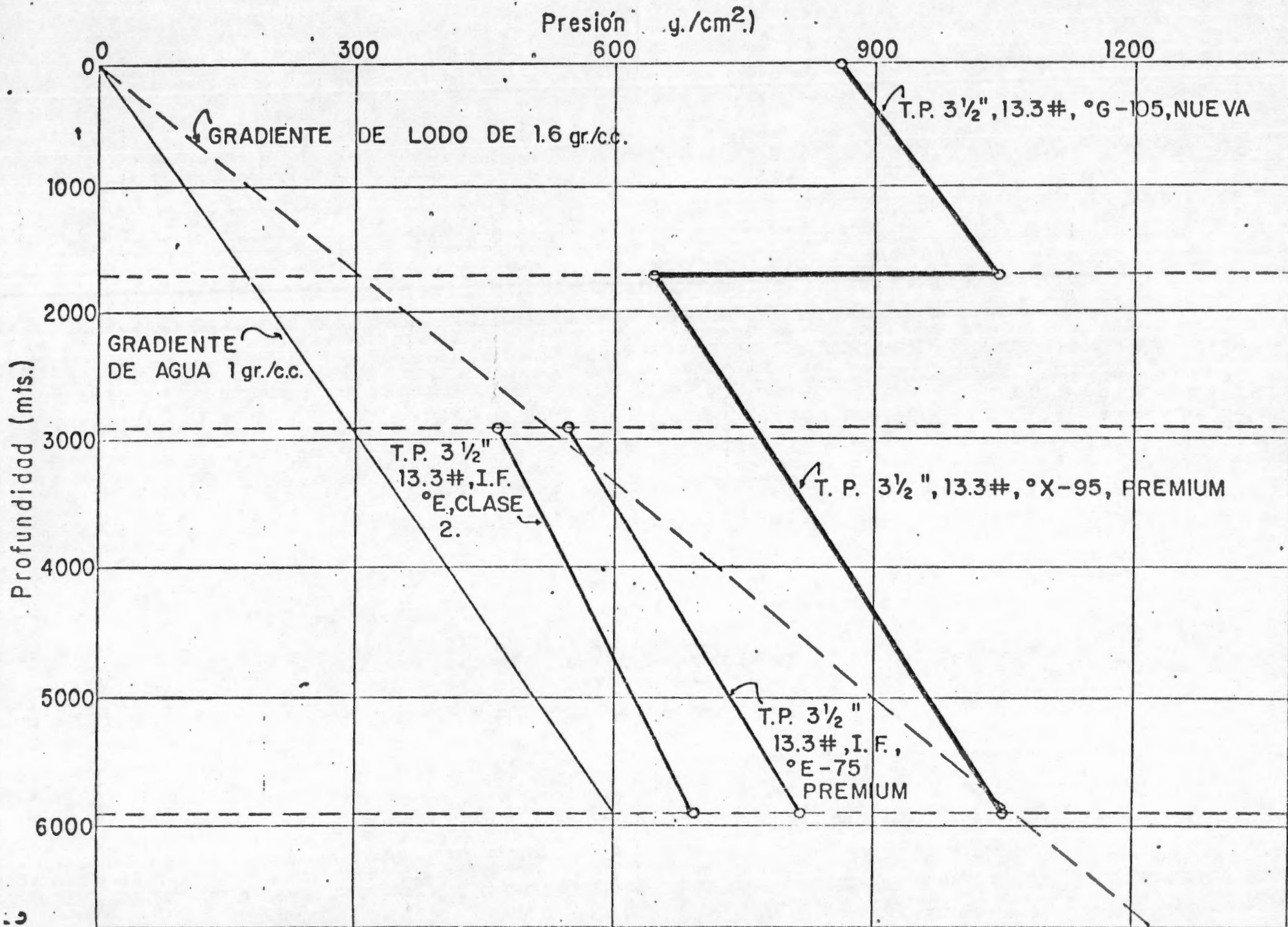


FIGURA 3-A.

## Análisis por Torsión

la reducción que la sarta sufre en su resistencia a la torsión se evalúa con la expresión (27) y el cálculo se hace en los puntos 1 a 4 del esquema A-2.

$$T_{T1} = \frac{0.096167 J}{D} \left( Y_m^2 - \frac{P^2}{A t^2} \right)^{1/2}$$

Para la tubería 1 el diámetro es

$$D_1 = .8 D_P + .2 D_I = .8 (3.5) + .2 (2.764) = 3.35"$$

$$J_1 = \frac{\pi}{32} (D^4 - D_I^4) = 6.6759 \text{ pg}^4$$

$$A_1 = 2.81 \text{ pg}^2$$

Para la tubería 2

$$D_2 = D_P = 3.5"$$

$$J_2 = \frac{\pi}{32} (D^4 - D_I^4) = 9 \text{ pg}^4$$

$$A_2 = 3.6409 \text{ pg}^2$$

Por tanto

$$T_{T1} = \left( \frac{.096167 \times 6.6759}{3.35} \right) \left( 95\,000^2 - \frac{(119 \times 3.28 \times .796 \times 50^2)}{2.81^2} \right)^{1/2}$$
$$= 17396.21 \text{ lb-pie}$$

de la misma forma

$$T_{12} = 13829 \text{ lb-pie}$$

$$T_{13} = 23133 \text{ lb-pie}$$

$$T_{14} = 20201 \text{ lb-pie}$$

## VII. CONCLUSIONES

El método requerido para la selección adecuada de las tuberías que conforman un "string" de trabajo contempla dos aspectos importantes, uno técnico y otro económico. El primero, le permite al personal operativo de campo conocer con detalle la capacidad y limitación de la sarta, de tal manera que esté en posibilidades de decidir dentro de que rango puede trabajar en forma segura, evitando las condiciones extremas en que se somete la sarta a esfuerzos no recomendables. El método gráfico descrito dada su sencillez simplifica de manera especial la secuencia de cálculo. Por otro lado, analizando someramente el aspecto económico, se puede asegurar que dependiendo de la profundidad de operación se logran beneficios que fluctúan, entre un 22 y 29% cuando se usa una sarta optimizada en comparación a utilizar una constituida totalmente con tubos de grados G-105. El cálculo se hizo en base a precios de tubería nueva, ya que no se dispuso de una fuente confiable de costos de tubería usada.

A continuación se dan algunas recomendaciones que serán de utilidad el observarlas para mantener en buen estado la tubería y tener el mayor aprovechamiento de ella:

1. Evitar toda acción corrosiva de los fluidos que se manejan sobre la tubería (ácidos, lodos corrosivos, ácido sulfhídrico, etc.).
2. Protegerla con los guardaroscas en el transporte y manejo en la localización.
3. Durante la introducción o extracción, no golpear la junta, al sentar en las cuñas observar que la distancia entre la mesa rotatoria y la conexión sea la adecuada para evitar enchuecarla.
4. No sobrepasar las especificaciones de tensión, torsión y colapso, -



Las tuberías que conforman la sarta se anotan en la Tabla A-3

TABLA A-3

| SECCION | DESCRIPCION            | CLASE   | LONG.<br>(m) | T<br>(lb-pie) | LONG. ACUM.<br>(m) |
|---------|------------------------|---------|--------------|---------------|--------------------|
| 2       | T.P. 3 1/2" G-105 13.3 | NUEVA   | 1734         | 20201         | 6000               |
| 1       | T.P. 3 1/2" X-95 13.3  | PREMIUM | 4147         | 13829         | 4266               |
| DC      | 4 3/4" - 2" 50 lb/pie  | -       | 119          | -             | 119.0              |

considerando los márgenes de seguridad, usar amortiguador de vibraciones en operaciones de pesca en donde se operen herramientas de percusión.

5. Usar las grasas adecuadas.
6. Observar las normas establecidas por la Superintendencia de Servicios a Pozos de inspeccionar la tubería cada seis meses o cada 50 viajes lo que primero suceda.
7. Evitar el uso de dados gastados tanto en las cuñas como en la llave de fuerza para no dañar el cuerpo del tubo.

# VIII. BIBLIOGRAFIA

- 1) API-RP-7G, 10 ED, ENERO 1981, "DRILL STEM DESIGN AND OPERATING LIMITS".
- 2) SERVCO 4ED. DIVISION OF SMITH INTERNATIONAL, INC. "DATA HANDBOOK".
- 3) DRILCO, DIVISION OF SMITH INTERNATIONAL, INC. "MANUAL DRILCO DE CONJUNTOS DE PERFORACION".
- 4) CAUDILLO M. PEDRO M. EN I. APUNTES DE LA CLASE. "PERFORACION AVANZADA" EN LA DEPTI DE LA UNAM.
- 5) HERNANDEZ VALERO C., "COMUNICACION VERBAL".

Una sarta optimizada de tubería nueva de 3 1/2", peso estandar, de rango 2 para trabajar a 6000 m. está constituida de 4500.0 m. de grado E y - - 400.0 m. de Grado X, suponiendo 100 m. de lastrabarrenas y no incluyendo el valor de éstos, el costo total es de \$109,516,752.0 considerándolo la misma longitud de °G el costo sería de \$133,348,780.00 dando una diferencia de 22%, si la profundidad de operación fuera como máximo 4500 m. el beneficio alcanzaría un 29%.



TENSION (lb.-fza.)x1000

T.P. 2 $\frac{3}{8}$ ", °X-95, 6.65 lb./pie.

— TUBERIA NUEVA.  
- - - TUBERIA PREMIUM Y  
CLASE 2.

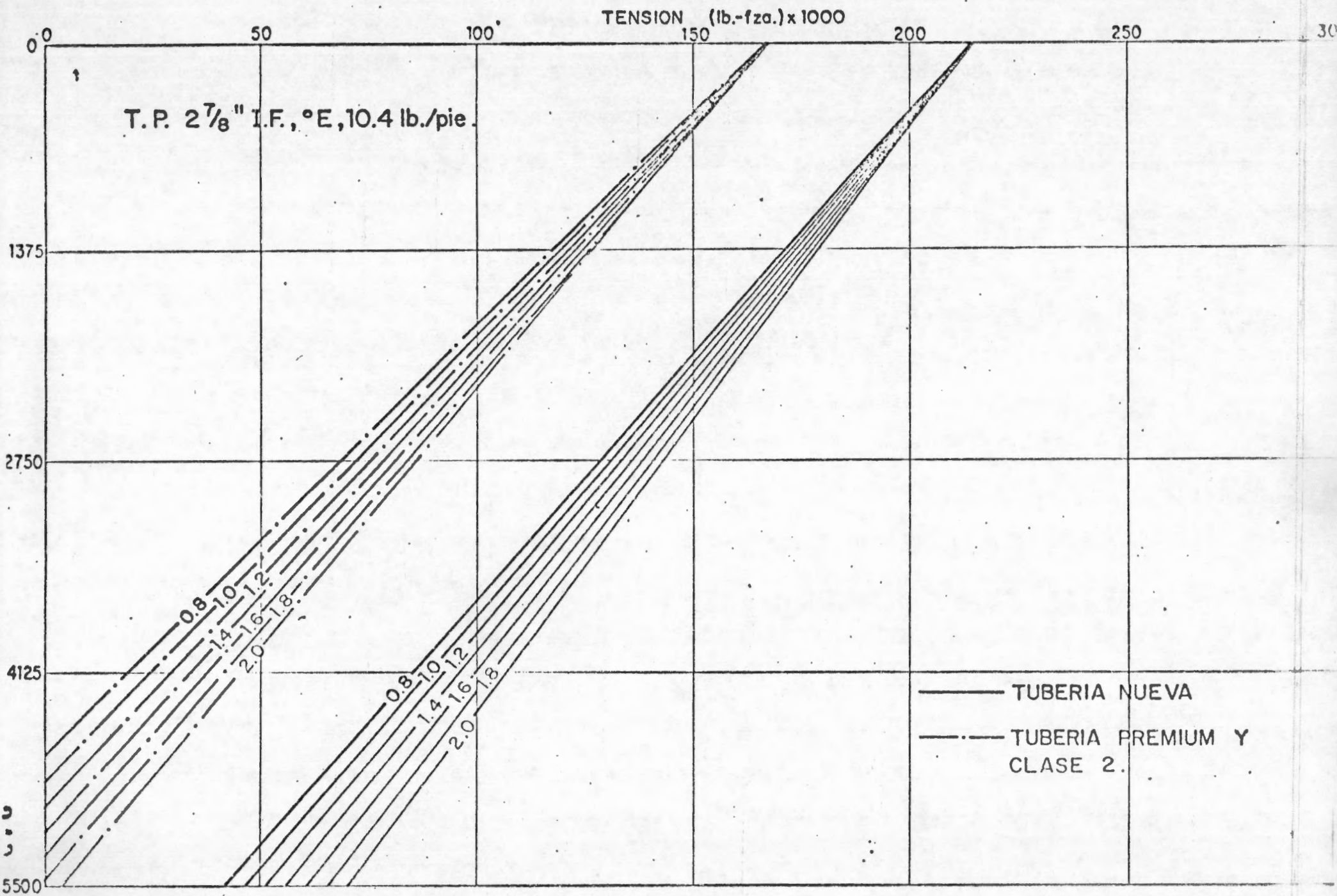
TENSION (lb.-fza.) x 1000

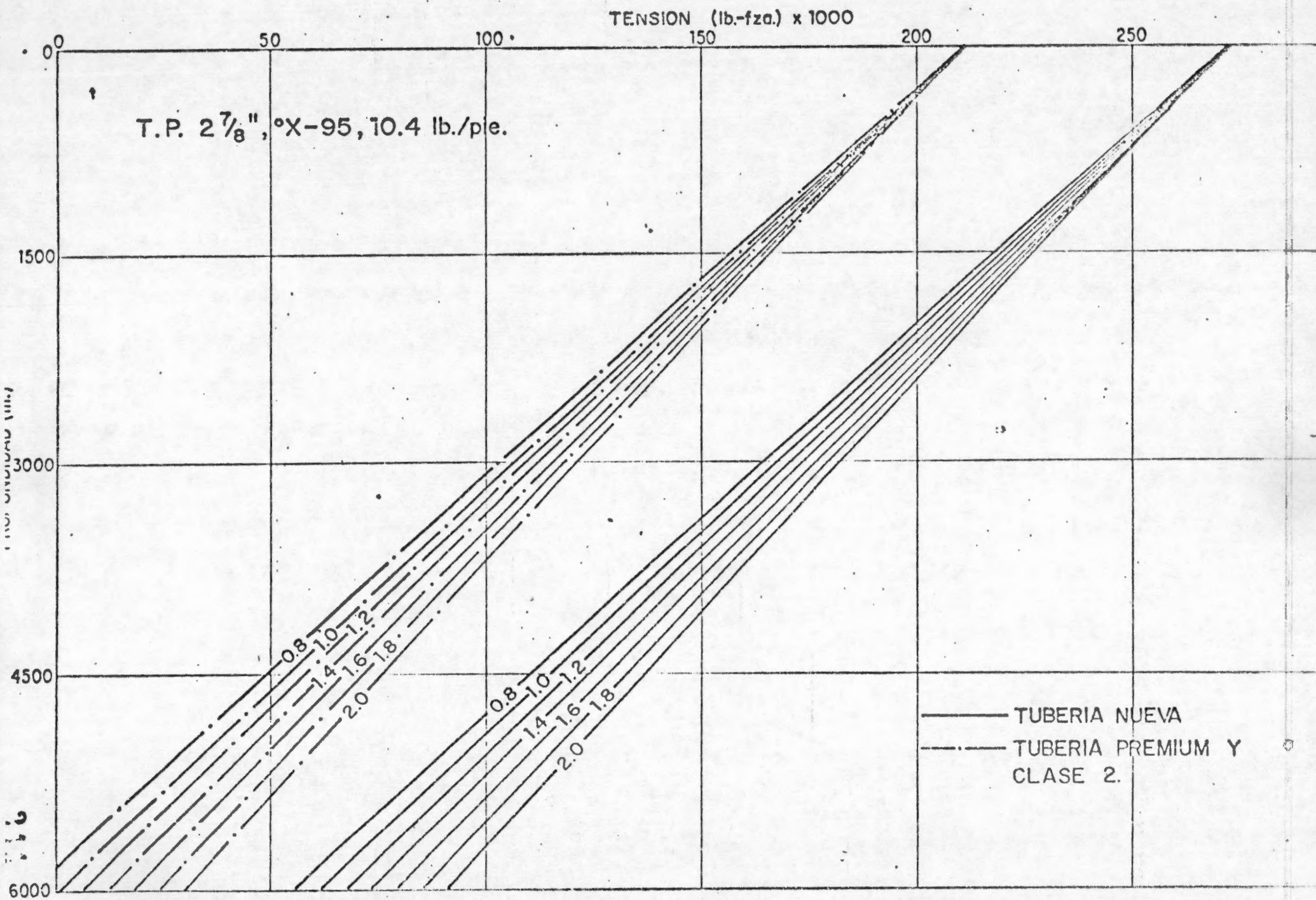
T.P. 2 $\frac{3}{8}$ ", S-135, 6.65 lb./pie.

— TUBERIA NUEVA  
— TUBERIA PREMIUM Y  
CLASE 2.

0.8 1.0 1.2  
1.4 1.6 1.8  
2.0

0.8 1.0 1.2  
1.4 1.6 1.8  
2.0



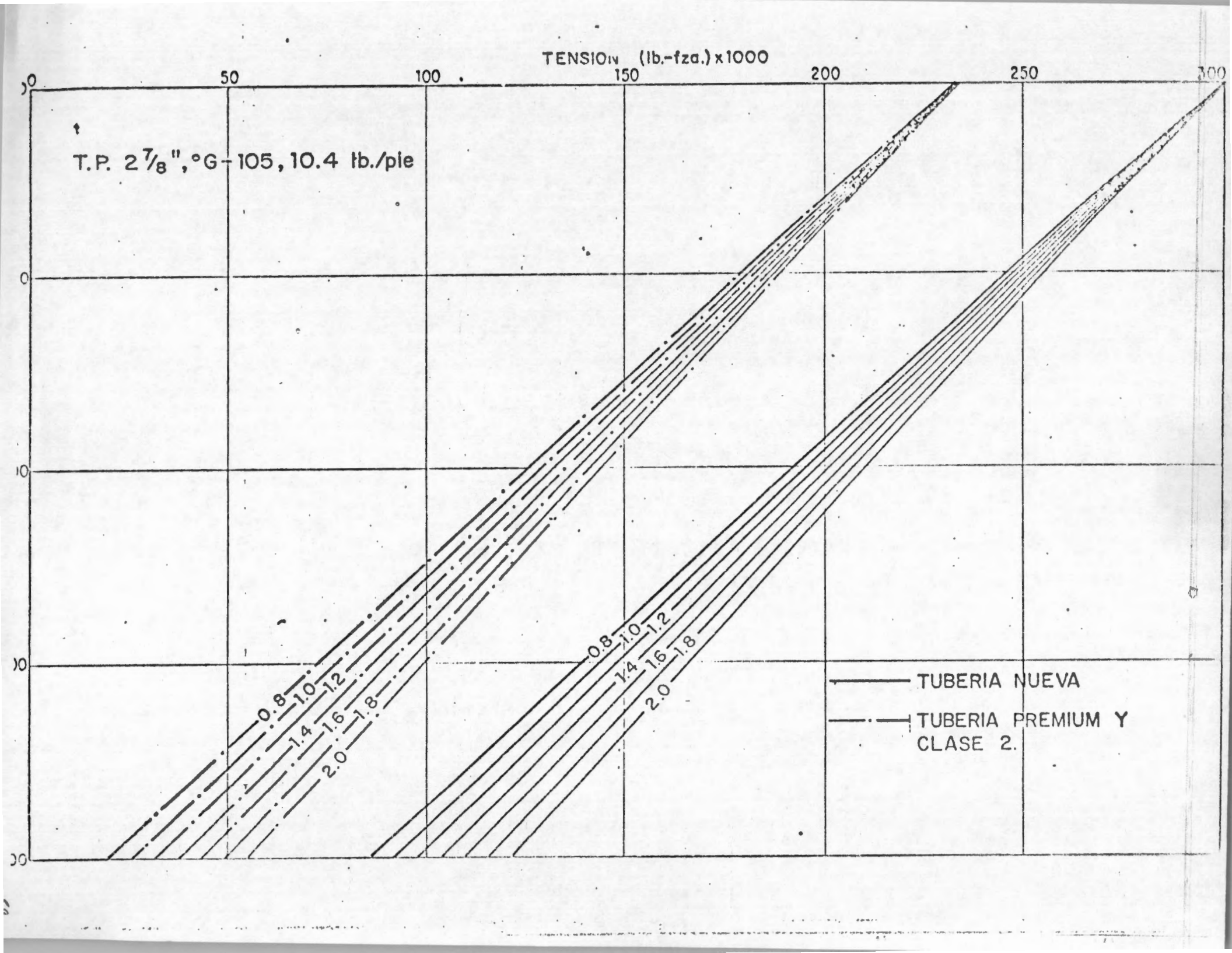


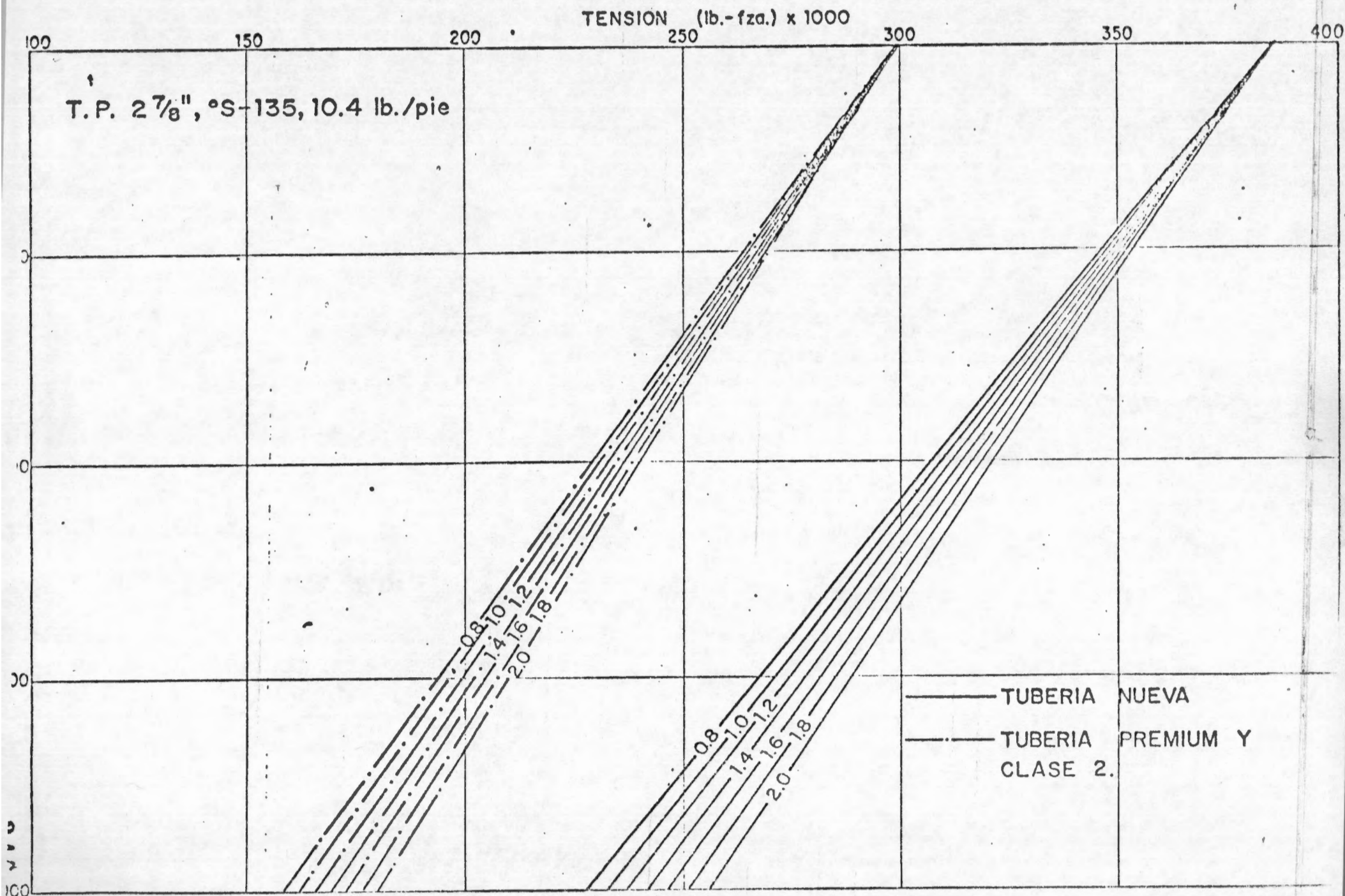


TENSION (lb.-fza.) x 1000

T.P. 2 7/8", °G-105, 10.4 lb./pie

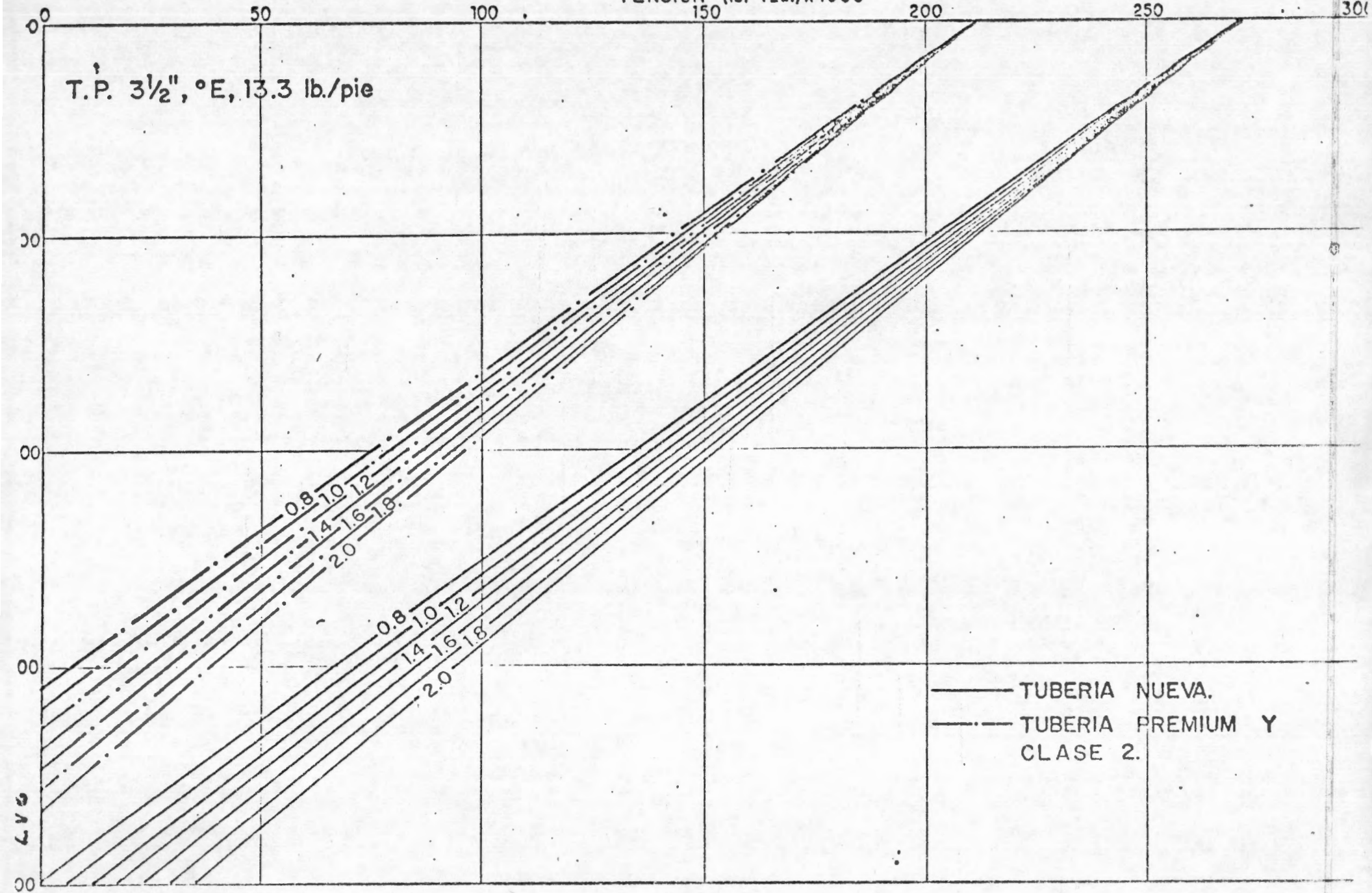
— TUBERIA NUEVA  
— TUBERIA PREMIUM Y  
CLASE 2.



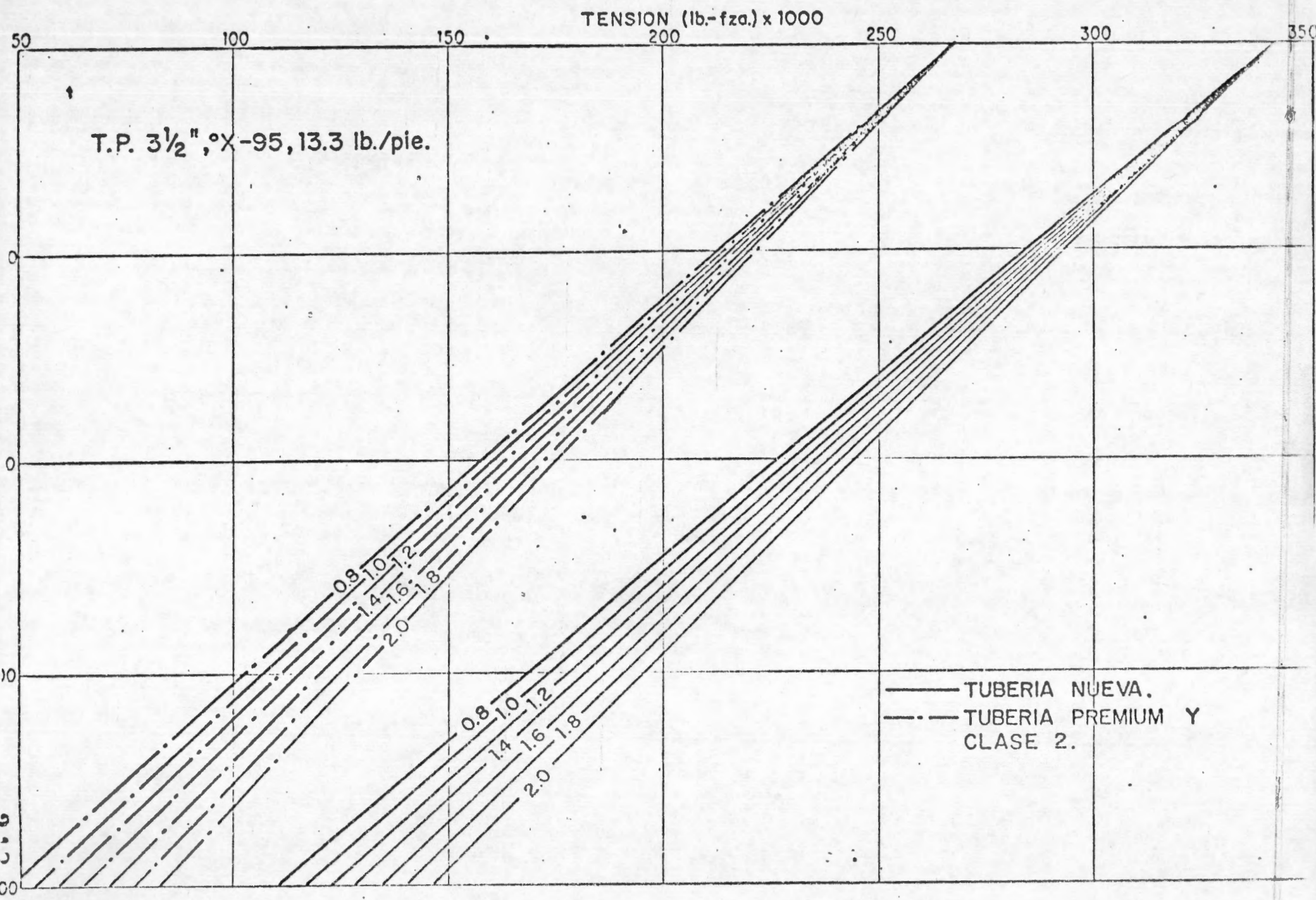


TENSION (lb.-fza.) x 1000

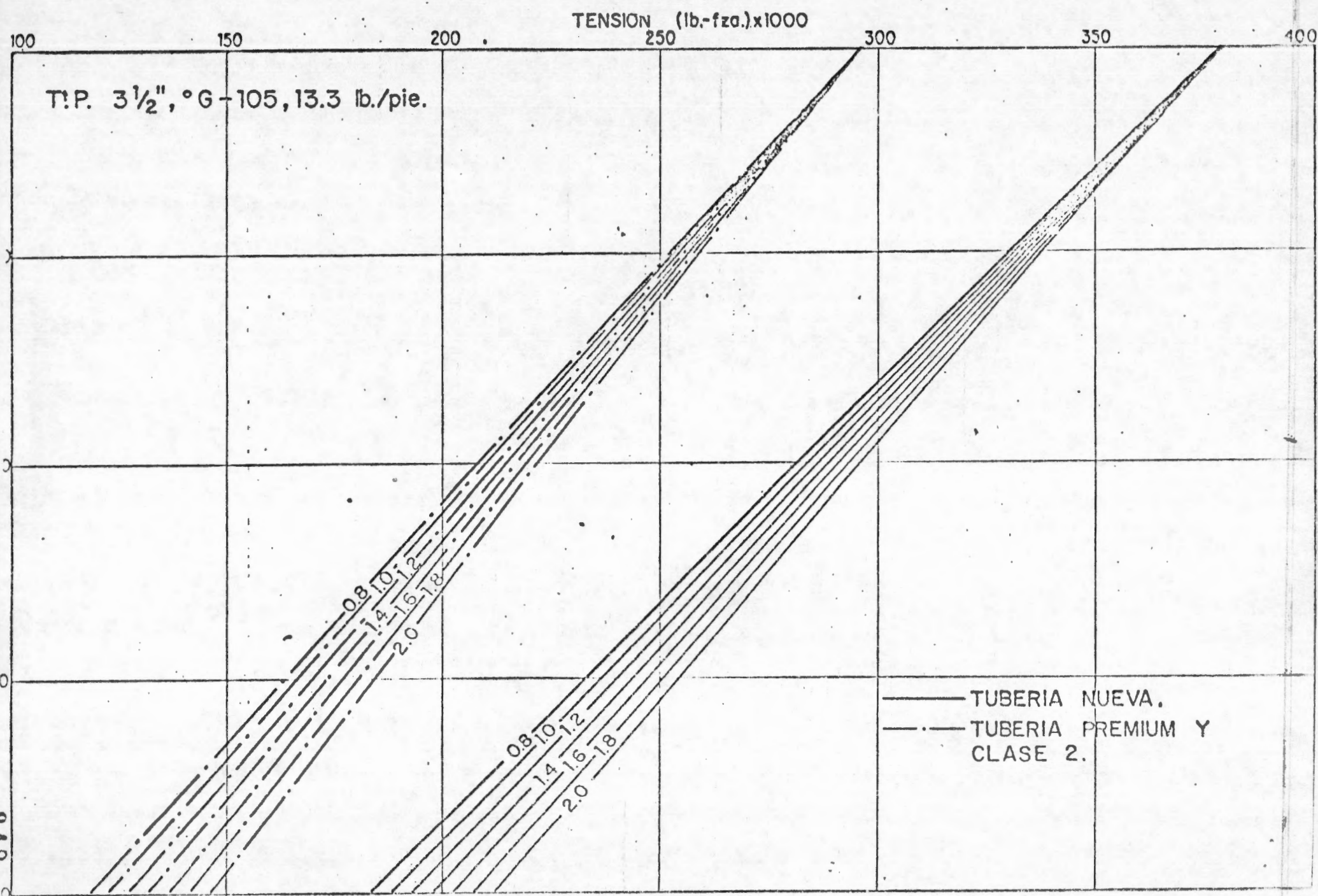
T.P. 3½", °E, 13.3 lb./pie

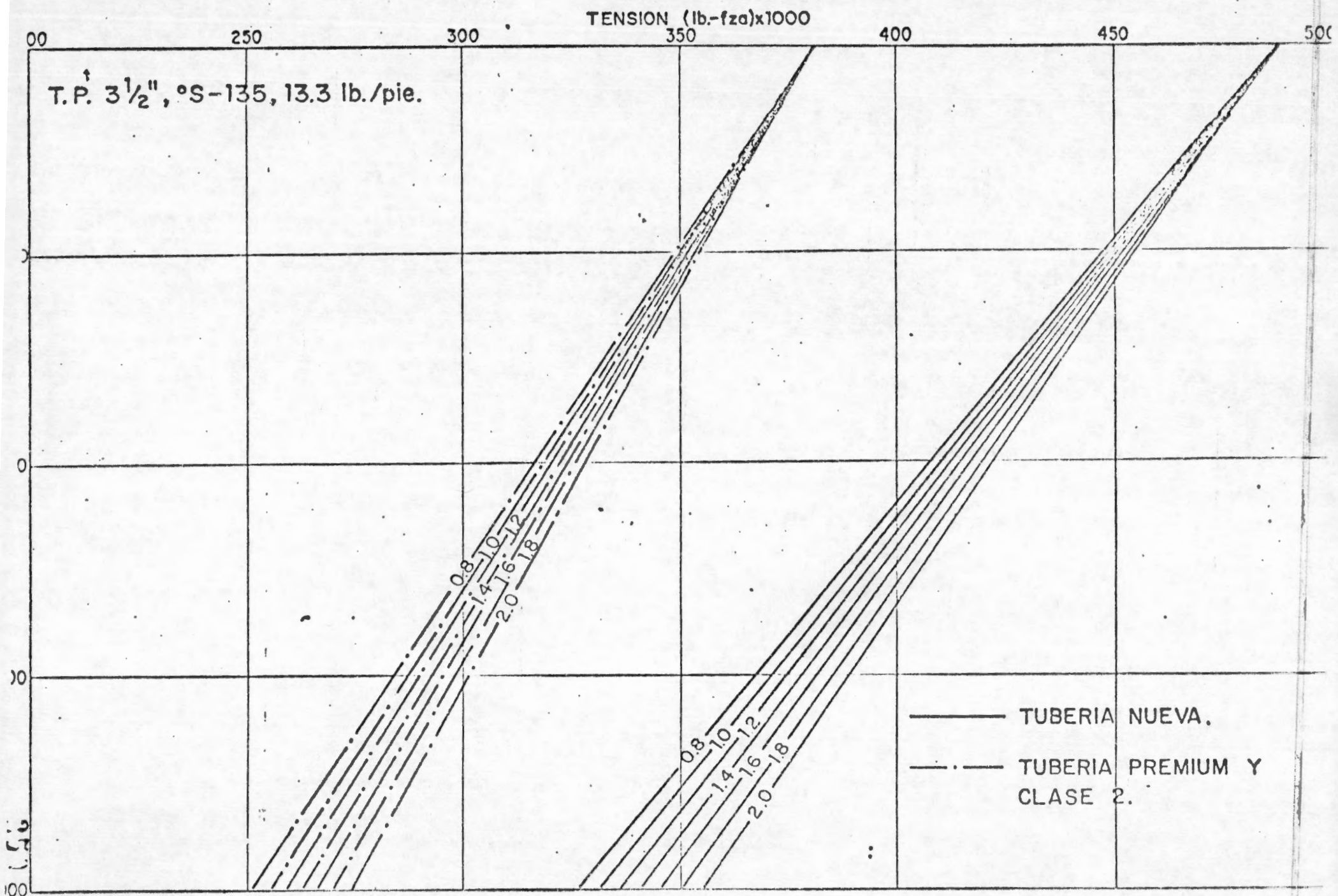


— TUBERIA NUEVA.  
- - - TUBERIA PREMIUM Y  
CLASE 2.









T.P. 3½" I.F., °X-95, 13.3 lb./pie.

— TUBERIA NUEVA.  
- · - TUBERIA PREMIUM.  
- - - TUBERIA CLASE 2.

TENSION (lb.-fza.) x 1000

300

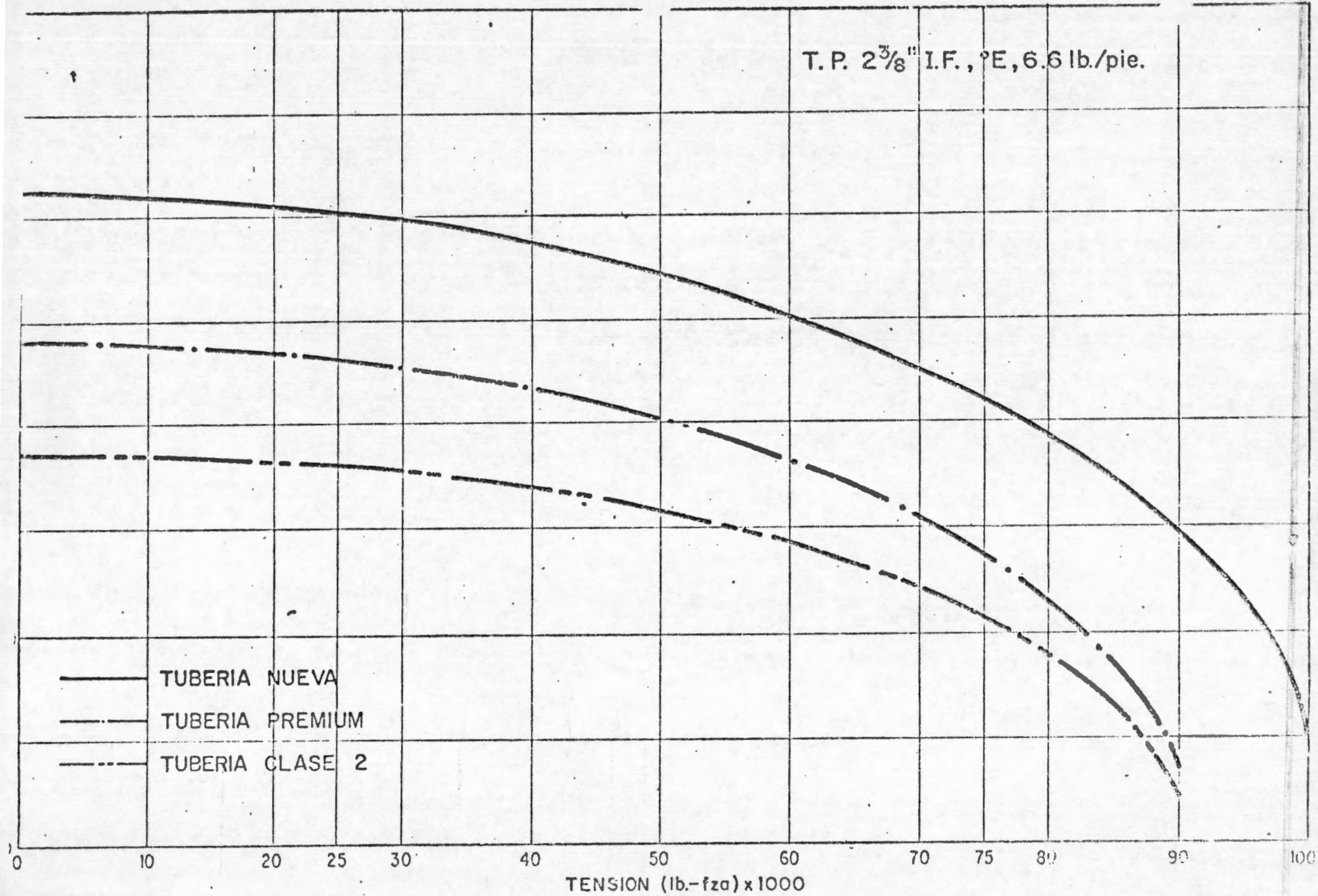
T.P. 3½" I.F., °E, 13.3 lb./pie

— TUBERIA NUEVA.  
— TUBERIA PREMIUM.  
- - - TUBERIA CLASE 2.

TENSION (lb.-fza.)x1000

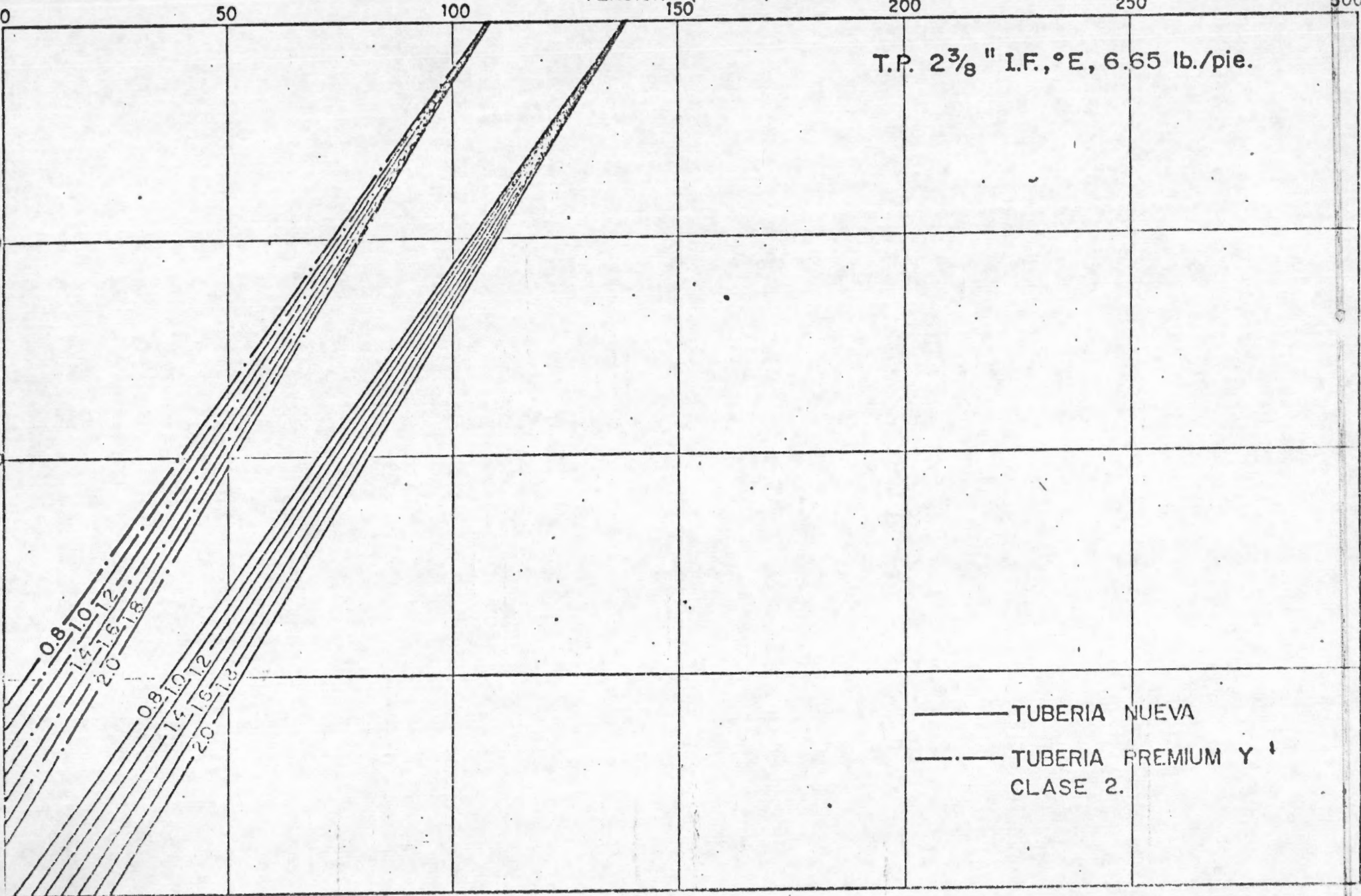


T. P. 2 $\frac{3}{8}$ " I.F., °E, 6.6 lb./pie.



TENSION (lb.-fzda.) x 1000

T.P.  $2\frac{3}{8}$ " I.F., °E, 6.65 lb./pie.

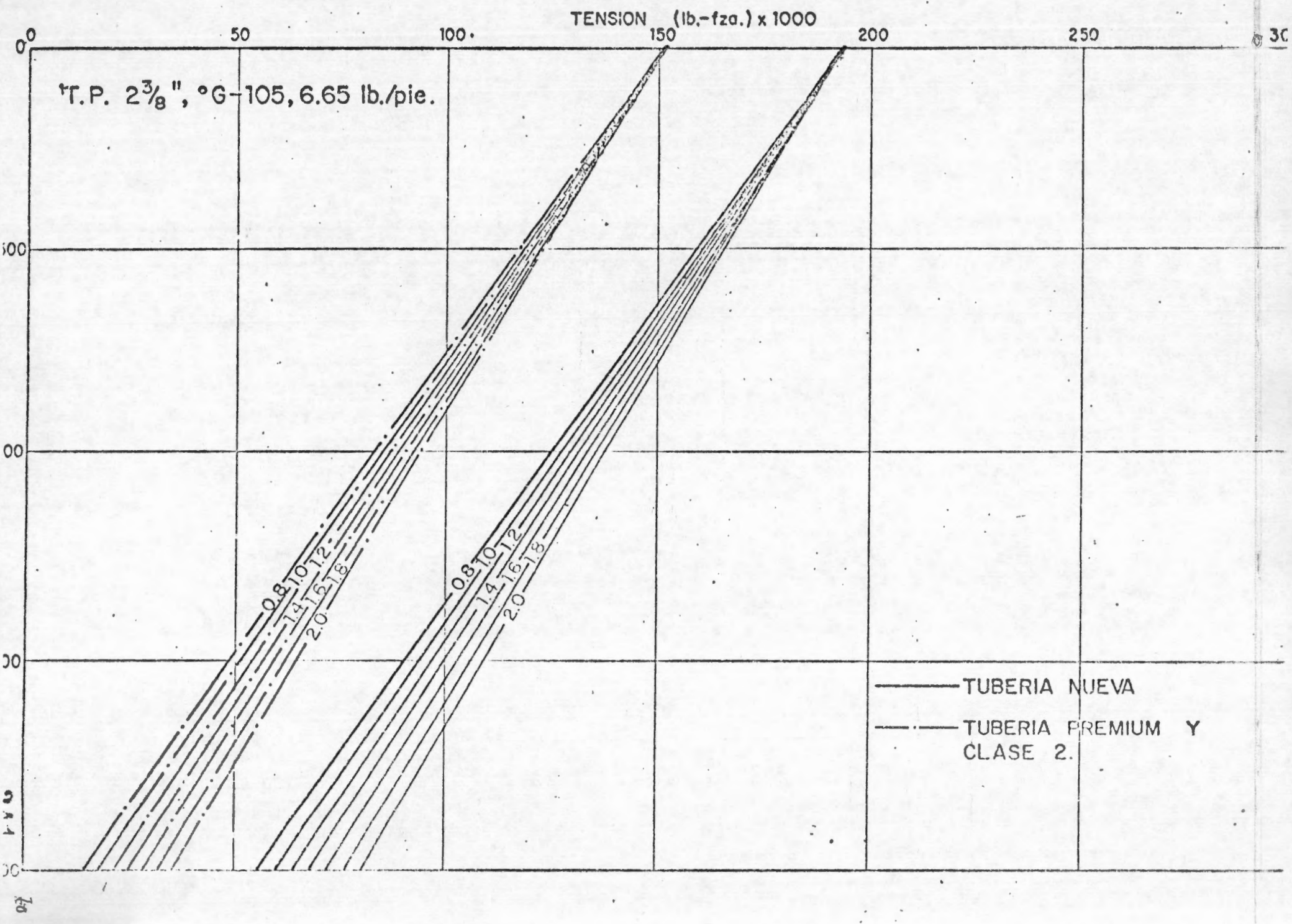


T.P. 2 $\frac{3}{8}$ " I.F., °X-95, 6.6 lb./pie.

— TUBERIA NUEVA  
— · — TUBERIA PREMIUM  
- - - TUBERIA CLASE 2

TENSION (lb.-fza.) x 1000

0 25 50 75 100 125 150





Se presenta una metodología para evaluar los efectos que originan los cambios de presión y temperatura sobre las tuberías de producción, se consideran 3 condiciones: La primera es cuando el empacador le permite libre movimiento a la Sarta la segunda cuando el movimiento es parcialmente restringido y la tercera cuando se dan variaciones de esfuerzo debido a que se restringe totalmente el movimiento de la tubería de producción por estar anclada en el empacador. Se da una aplicación de tipo general, ya sea para aparejos sencillos o cuando estos están conformados con tuberías de diferente tamaño en uno o varios fluidos.

### FUERZAS APLICADAS

#### Aparejos uniformes

Se entiende por aparejos uniformes a aquellos en donde se tiene una tubería de producción de un sólo diámetro que contiene un solo fluido, dentro de una tubería de revestimiento de diámetro uniforme conteniendo un sólo fluido; los fluidos contenidos dentro y fuera de la tubería de producción pueden ser de diferentes propiedades.

En una sarta libremente suspendida en un pozo sin fluido se pueden aplicar dos tipos de fuerzas; una de tensión que elongará la tubería (ver fig. 1-a) y una de compresión que además de acortar la tubería hará que ésta se flambee.

La elongación resultante de la aplicación de la fuerza de tensión se calcula a partir de la ley Hook. La ecuación en términos de cambio de longitud es:

$$\Delta L = - \frac{LF}{EA_s} \quad \text{--- (1)}$$

DONDE

L = Longitud en (pg)  
 F = Fuerza en (Lb)  
 E = Modulo de young (psi)  
 =  $30 \times 10^6$  para el acero  
 AS = Area transversal del acero en (pg<sup>2</sup>)

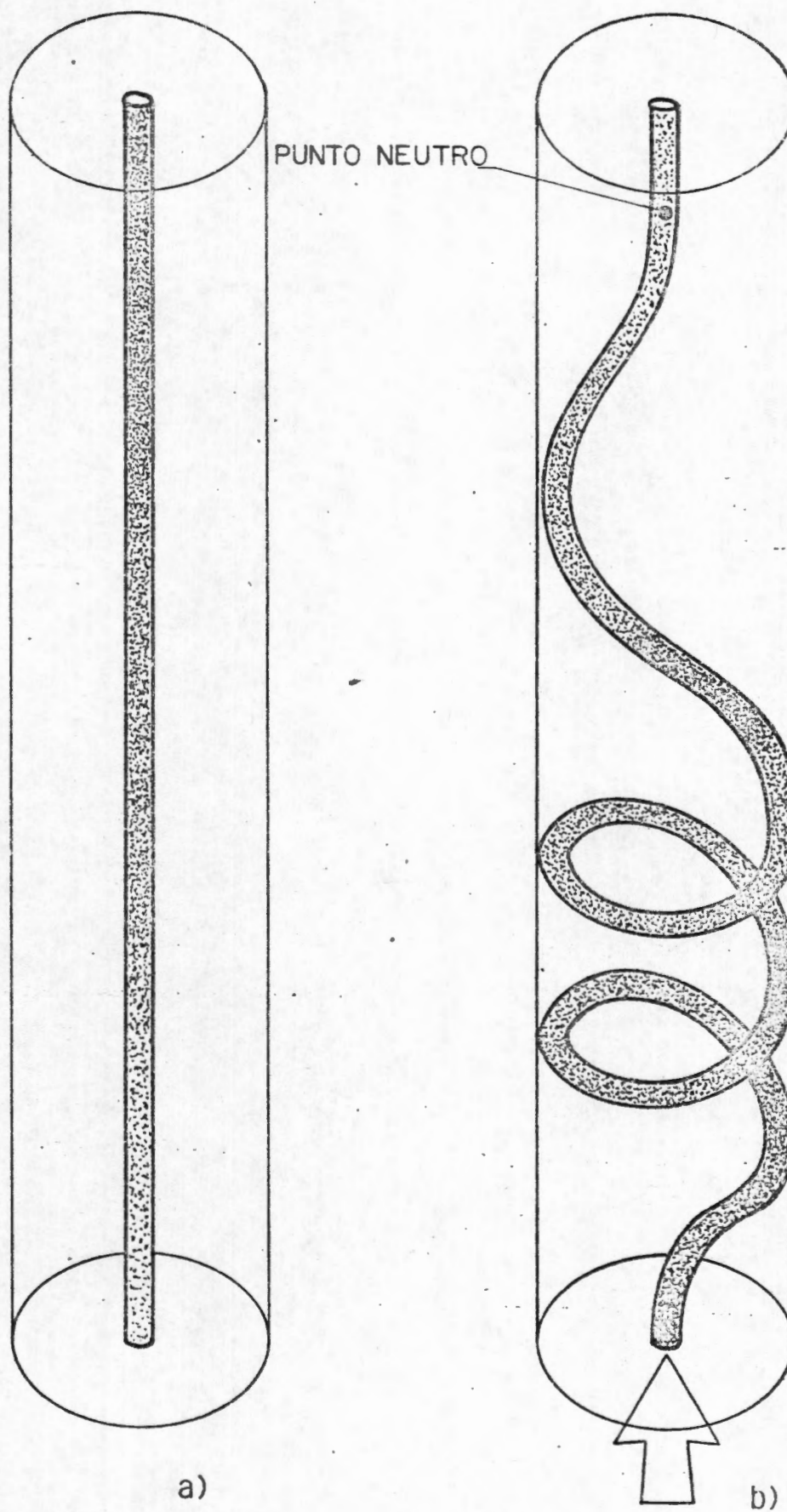


FIG. 1.-TUBERIA FLAMBEADA LIBREMENTE SUSPENDIDA.

En lo subsecuente se establece sólo para efecto de consistencia, que las fuerzas compresivas se consideran positivas y las de tensión negativas, de tal manera que las reducciones en longitud son negativas y las elongaciones positivas. Además todas las ecuaciones que se dan comprenden un sistema consistente de unidades así, la presión se da en (lb/pg<sup>2</sup>), la fuerza en (lb) la densidad en gradiente de presión (lb/pg<sup>2</sup>/pg) ó (lb/pg<sup>3</sup>), el peso unitario en (lb/pg) y la longitud en (pg).

Si axialmente en el extremo de una sarta se aplica una fuerza compresiva dará por resultado un acortamiento debido al efecto de la Ley de Hook y un encojimiento adicional debido al flambeo en la parte inferior del punto neutro (ver fig. 1-B).

El punto neutro se define como el punto o plano en la sarta en donde los esfuerzos (axiales, radiales y tangenciales) son iguales. En ausencia de fluidos y presión (los esfuerzos radial y tangencial son cero) el punto neutro es donde el esfuerzo axial es igual a cero. La distancia desde el extremo al punto neutro se estima con la expresión 2)

$$N = F/W \quad (2)$$

DONDE  $F$  = Fuerza ficticia (lb)

$W$  = Peso unitario de la tubería considerando efecto de los fluidos (lb/pg).

La ecuación para calcular el cambio de longitud resultante del flambeo cuando el punto neutro está dentro de la sarta ( $N < L$ ) se da en la expresión (3)

$$\Delta L = - \frac{r^2 F^2}{8 E I W} \quad (3)$$

DONDE

$r$  = Diferencia radial TR, TP (pg)

$F$  = Fuerza ficticia en (lb)

$I$  = Momento polar de inercia de la tubería de producción (pg<sup>4</sup>)

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)$$

D = Diámetro externo de la T.P. (pg)

d = Diámetro interior de la T.P. (pg)

Quando el punto neutro calculado está arriba de la sarta, o sea que toda la tubería está flambeada la ecuación (4) se utiliza para estimar el cambio de longitud causado por el flambeo.

$$\Delta L_2 = - \frac{r^2 F^2}{8EIW} \left[ \frac{LW}{F} \left( 2 - \frac{LW}{F} \right) \right] - (4)$$

El peso unitario de una tubería al estar sumergida en líquidos donde el externo e interno son de diferente densidad se modifica según la ecuación siguiente:

$$W = W_s + \rho_i A_i - \rho_o A_o - (5)$$

DONDE

$W_s$  = Peso unitario de la tubería considerando coples (lb/pg).

$\rho_i$  = Densidad del fluido contenido dentro de la tubería de producción (lb/pg<sup>3</sup>)

$\rho_o$  = Densidad del fluido en el espacio anular (lb/pg<sup>3</sup>)

$A_i$  = Area interna de la T.P. (pg<sup>2</sup>)

## 2.2 Sartas combinadas.

Se dice que se tiene un aparejo de producción combinado cuando está presente una de las tres condiciones siguientes:

- Más de una tubería de producción.
- Más de una tubería de revestimiento.
- Dos o más fluidos dentro de la T.P. o espacio anular.

En el caso de las sartas combinadas al aplicar axialmente una fuerza compresiva (ver fig. 2) el efecto de la ley de Hooke se calcula aplicando la ecuación 1 para cada sección y al final se suman algebraicamente los resultados. En el caso de la ecuación (1) la fuerza aplicada es constante a través de todas las secciones de tal manera que una forma generalizada de la ecuación (1) es:



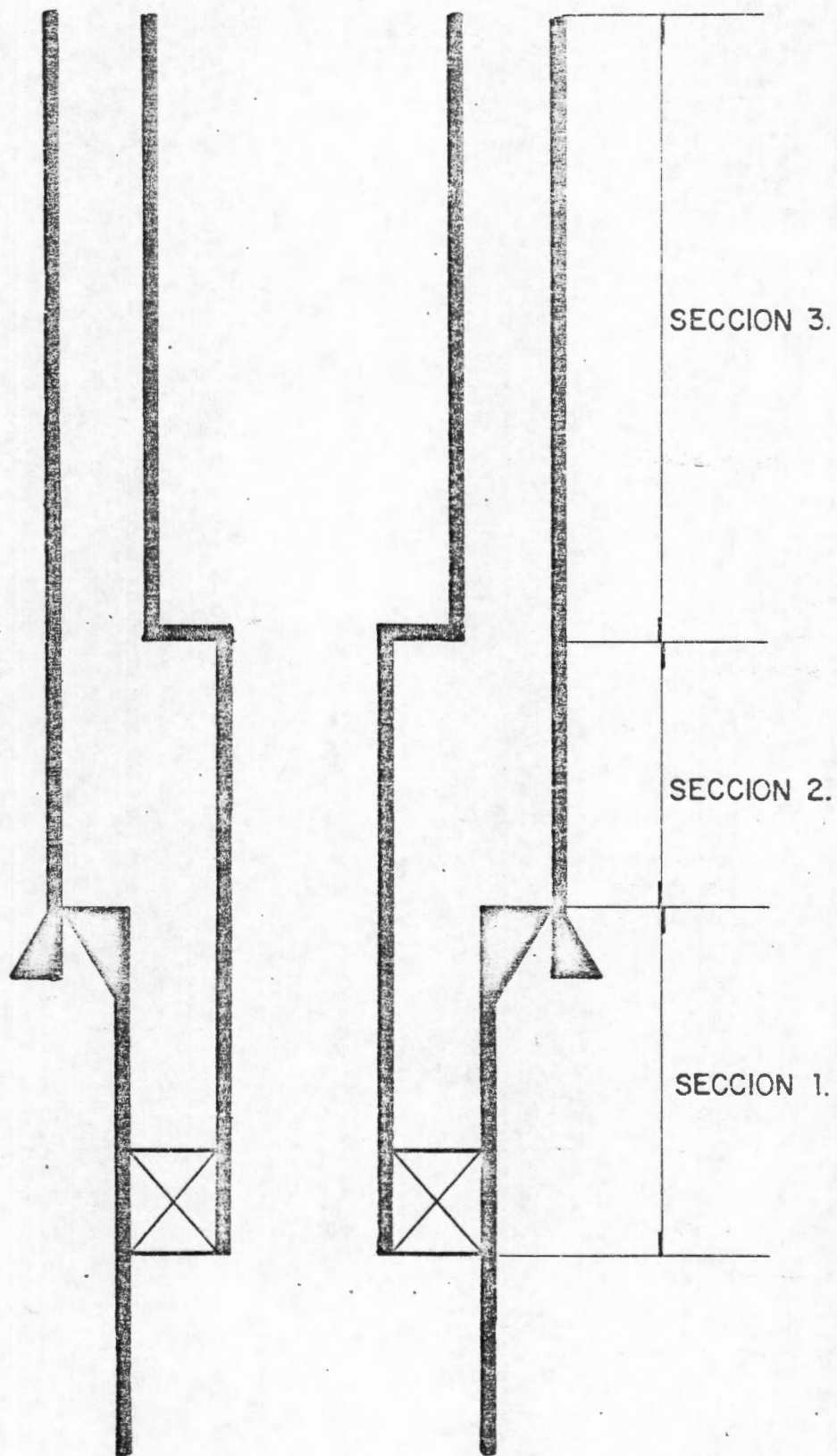


FIG. 2.- APAREJO DE PRODUCCION COMBINADO.

$$AL1i = - \frac{F}{\sum_{i=1}^{NS} \left[ \frac{L}{A_i} \right]_i} \quad (6)$$

Donde ns = Número de secciones de la sarta.

Para calcular el acortamiento por flambeo previamente debe determinarse la posición del punto neutro, para lo cual se recomienda el siguiente procedimiento:

Considere que el punto neutro está en la sección inferior (sección 1) y calcule, n, aplicando la ecuación (2); si el valor de "n" es mayor que la longitud de la sección, L1, (n > L1), entonces, el punto neutro no está en la sección del extremo de la sarta, en tal caso se repite la operación para la sección siguiente usando la ecuación (7)

$$n = \frac{F - (LW)_1}{W_2} + L1 \quad (7)$$

Donde W1, L1 son los pesos unitarios de la sección 1 y W2 es el peso unitario de la sección 2. si resulta que n < (L1 + L2), entonces el punto neutro se localiza en la 2ª sección, si por lo contrario n > (L1 + L2) sera indicativo que el punto está arriba de la sección 2 así la operación se repite usando la expresión generalizada siguiente:

$$n = F - \frac{\sum_{i=1}^m (LW)_i}{W_{m+1}} + \sum_{i=1}^m L1 \quad (8)$$

DONDE m = Número de sección totalmente flambeada.

La sección que contiene el punto neutro está parcialmente flambeada. Si sucede que, n > Σ Li, entonces toda la sarta estará totalmente flambeada. El cambio de longitud que resulta por el efecto del flambeo se determina aplicando la ecuación (4) para cada sección totalmente "bucleada" y la ecuación 3 para la sección

que sólo lo está parcialmente. Los valores de  $r$ ,  $F$ ,  $E$ , y  $W$  son los que corresponden a la geometría específica de cada una de las secciones. La suma algebraica de los cambios de longitud en todas las secciones equivale al cambio de longitud total resultante por el efecto del "buckling". En este caso la fuerza aplicada no es constante así la fuerza  $F_1$  para la sección 1 será la fuerza ficticia aplicada en el empacador (la fuerza para la segunda sección es:  $F_2 = F_1 - (LW)_1$  en la sección  $n$ , se da en la siguiente expresión generalizada.

$$F_n = F_1 - \sum_{i=1}^n (LW)_i \quad \text{---(9)}$$

#### FUERZAS INDUCIDAS POR PRESION

Considerando un sistema donde la T.P. está sellada en el empacador con libre movimiento (ver fig.3) en presencia de fluido y presión se inducen tres fuerzas.

1. Hay presente una fuerza ejercida sobre el área de acero de la T.P. al nivel del empacador llamada comúnmente fuerza real,  $F_r$ , la cual se determina con la ecuación (10).

$$F_r = (A_p - A_i) P_i - (A_p - A_o) P_o \quad \text{---(10)}$$

$F_r$  Puede ser positiva o negativa y se tendrá compresión o tensión respectivamente  $P_o$ ,  $P_i$  = Presión externa e interna al nivel del empacador.

2. La sarta puede ser flambeada o incrementada su rigidez. (enderezada) por el efecto de la presión aplicada. Si la presión interna es mayor que la externa ( $P_i > P_o$ ) el aparejo se flambeará debido a la fuerza real  $F_r$  aplicada en el extremo y las fuerzas radiales.

Inversamente si la presión externa es mayor que la interna ( $P_o > P_i$ ) la T.P. tenderá a permanecer recta incrementando su rigidez. Esta fuerza resultante se llama fuerza ficticia y se da a continuación:

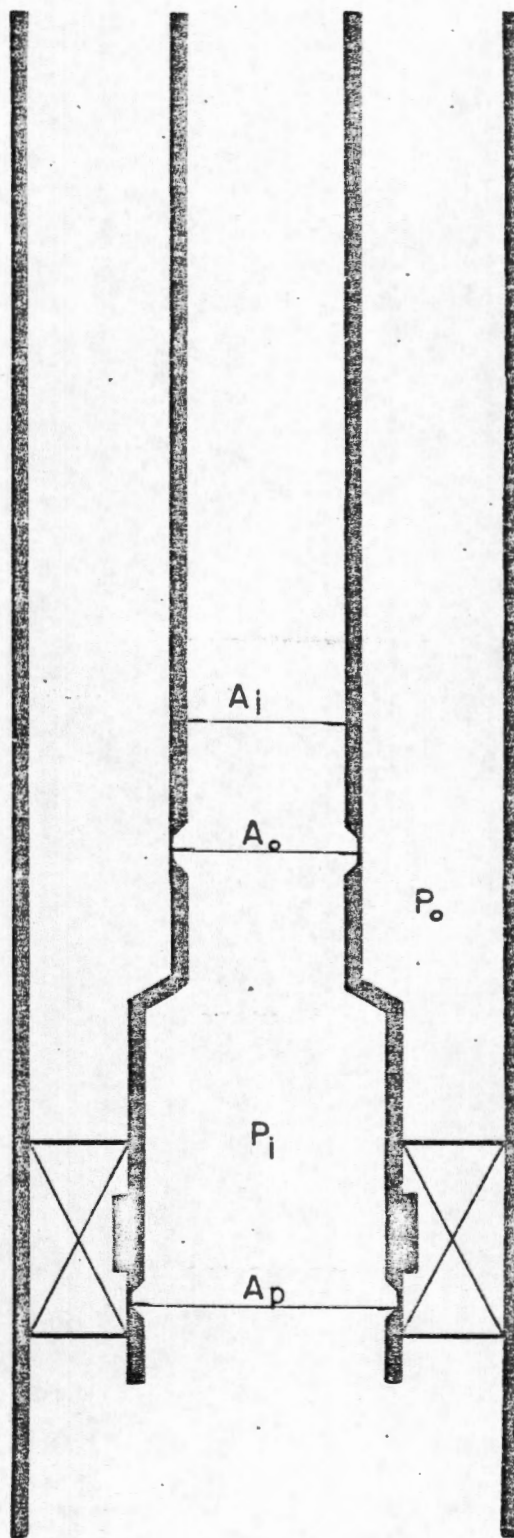


FIG. 3.- APAREJO CON LIBRE MOVIMIENTO.



$$F_f = A_p (P_i - P_o) \quad \text{---(11)}$$

Si  $F_f$  es positiva la sarta se flambeará y permanece recta si  $F_f$  es negativa o nula (Tensión ficticia).

3. La presión también genera fuerzas radiales sobre las paredes de la T.P.

El cambio de longitud del aparejo causado por la fuerza real  $F_r$  se obtiene substituyendo  $F$  por  $F_r$  en la ecuación (1). En condiciones reales de campo,  $F_r$  debe substituirse por  $\Delta F_r$  que es el cambio en la fuerza real dado según la ecuación (12)

$$\Delta F_r = (A_p - A_i) \Delta P_i - (A_p - A_o) \Delta P_o \quad \text{--- (12)}$$

Donde  $A_{Pi}$  y  $A_{Po}$  es la diferencia de presiones de la condición final e inicial en el interior y exterior de la sarta. Se toma como la condición inicial aquella que está presente al momento del ajuste y la final la correspondiente a la condición más severa (condición de diseño) a que se someterá el aparejo. Así el cambio de longitud  $\Delta L_1$  (llamado efecto de pistón) causado por el cambio en la fuerza real  $F_r$  es;

$$\Delta L_1 = -\frac{L}{EA_s} * \Delta F_r \quad \text{---(13)}$$

El cambio de longitud  $\Delta L_2$  resultante por el flambeo se estima empleando las ecuaciones (3) ó (4) dependiendo de la posición del punto neutro. Sustituyendo la fuerza  $F$  por  $F_f$  estimada con la ecuación (11), si el punto neutro está dentro de la sarta entonces:

$$\Delta L_2 = -\frac{r^2 F_f^2}{8E I W} \quad (14)$$

Si por el contrario la sarta está totalmente "buckleada" la ecuación (15) es la que se usa.

$$\Delta L = -\frac{r^2 F_f^2}{8FIW} \left[ \frac{LW}{F_f} \left( 2 - \frac{LW}{F_f} \right) \right] \quad \text{---(15)}$$

El cambio de longitud causado por las fuerzas radiales (baloneo) se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\Delta L_3 = -\frac{\mu}{E} \frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o - \frac{1+2\mu}{2\mu} S}{R^2 - 1} L^2$$

$$-\frac{2\mu}{E} \frac{\Delta P_{is} - R^2 \Delta P_{os}}{R^2 - 1} L \quad \text{---(16)}$$

DONDE  $\mu$  = Relación de poisson (para el acero  $\mu = .3$ )

$\Delta P_i$  = Cambio de densidad dentro de la sarta

$\Delta P_o$  = Cambio de densidad en el espacio anular

$R = D/d$ .

$S$  = Caída de presión debido al flujo por el interior de la sarta por unidad de longitud.

$\Delta P_{is}$  = Cambio de la presión superficial en la T.P.

$\Delta P_{os}$  = Cambio de la presión superficial en el espacio anular.

Fuerza inducidos por presión en sarta combinadas.

En el caso de aparejos combinados el cambio en la fuerza real  $\Delta F_r$ , debe ser estimada en la parte inferior de cada una de las secciones. Al nivel del empacador la fuerza real es la misma que en sartas sencillas y se estima con la ecuación (12). Para el extremo inferior de la sección 2 la fuerza es:

$$\Delta F_2 = \Delta F_1' + \Delta F_2' \quad \text{---(18)}$$

DONDE  $\Delta F_1'$  Se estima con la ec. (12)  
 $\Delta F_2'$  Se da con la ecuación (19)

$$\Delta F_2' = (A_{i1} - A_{i2}) \Delta P_{12} - (A_{o1} - A_{o2}) \Delta P_{02} \quad - (19)$$

$A_{i1}$  = Area interna de la sección 1 ( $Pg^2$ )

$A_{i2}$  = Area interna de la sección 2 ( $Pg^2$ )

$A_{o1}$  = Area externa de la sección 1 ( $Pg^2$ )

$A_{o2}$  = Area externa de la sección 2 ( $Pg^2$ )

Para la sección número 3 se tiene que:

$$\Delta F_3 = \Delta F_1' + \Delta F_2' + \Delta F_3' \quad (20)$$

$\Delta F_3'$  Se estima de manera similar a como se obtuvo  $\Delta F_2'$

La fuerza ficticia  $F_f$  en el punto de interés se estima restando a la fuerza ficticia en el empacador el peso en el aire de las secciones inferiores.

$$F_{fn} = F_f - (L W)_1 - (L W)_2 - \dots - (L W)_{n-1} \quad -21$$

El cambio de longitud inducido por el cambio de temperatura es:

$$\Delta L_4 = L \alpha \Delta T \quad -17$$

DONDE:  $\alpha$  = Coeficiente de expansión térmica  
(para el acero  $\alpha = 6.9 \times 10^{-6} / ^\circ F$ )

$\Delta T$  = Cambio de temperatura ( $^\circ F$ )

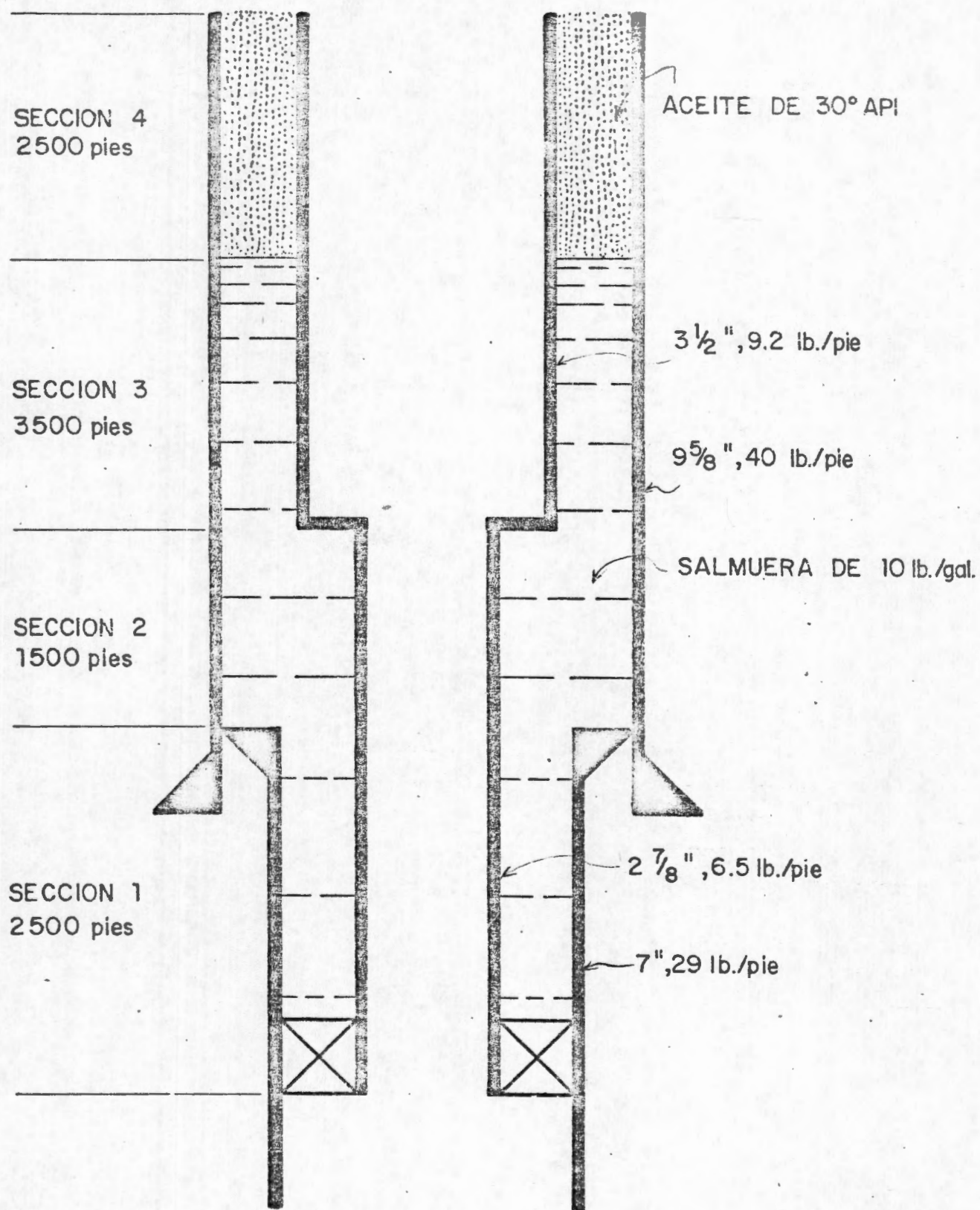


FIG. 4.-APAREJO COMBINADO USADO EN EL EJEMPLO.



EJEMPLO: Un pozo se terminó quedando como se muestra en la fig. 4 se va a estimular mediante un fracturamiento hidráulico usando un fluido fracturante de 15 lb/GAL. La máxima presión permisible en superficie es de 7000 psi para la T.P. y 1000 psi para el espacio anular. Al momento del ajuste el espacio anular queda con 2500 pies de aceite de 30° API. y de 2500 pies a 10000 pies se colocó agua salada de 10lb/GAL. El cambio de temperatura es estimado en -20°F, el diámetro interno del empaque es 3.25" correspondiéndole una área  $A_p = 8.926$  Pg<sup>2</sup> para facilitar la frecuencia de cálculo se elaboran primeramente las siguientes tablas:

Datos del aparejo y la tubería de revestimiento

|                       | T.P. 2 7/8 |           | T.P. 3 1/2 |           |
|-----------------------|------------|-----------|------------|-----------|
|                       | SECCION 1  | SECCION 2 | SECCION 3  | SECCION 4 |
| Ws (lb/pg)            | .54        | .54       | .76        | .76       |
| Ao (pg <sup>2</sup> ) | 6.488      | 6.488     | 9.6        | 9.6       |
| A: (pg <sup>2</sup> ) | 4.67       | 4.67      | 7.02       | 7.02      |
| As (pg <sup>2</sup> ) | 1.81       | 1.81      | 2.57       | 2.57      |
| R -                   | 1.178      | 1.178     | 1.170      | 1.170     |
| I (pg)                | 1.61       | 1.61      | 3.43       | 3.43      |
| L (pg)                | 2.500      | 1500      | 3500       | 2500      |
| r (pg)                | 1.65       | 2.98      | 2.67       | 2.67      |

FACTORES Para convertir lb/GAL a lb/pg<sup>3</sup>  
multiplique por  $4.3287 \times 10^{-3}$

$$P_o = \frac{141.5}{131.5 + \text{°API}}$$

# PRESION INICIAL Y FINAL DENSIDADES Y CAMBIO EN PRESIONES Y DENSIDADES

|              | FONDO<br>SECCION 1 | FONDO<br>SECCION 2 | FONDO<br>SECCION 3 | FONDO<br>SECCION 4 | SUPERFICIE |
|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------|
| Pii          | 4840.              | 3542.              | 2763.              | 947                | 0.         |
| Poi          | 4840.              | 3542.              | 2763.              | 947.               | 0.         |
| Pif          | 14784.             | 12838.             | 11670.             | 8946.              | 7000       |
| Pof          | 5840.              | 4542.              | 3763.              | 1947.              | 1000       |
| $\Delta P_i$ | 9944.              | 9296.              | 8907.              | 7999.              | 7000       |
| $\Delta P_o$ | 1000.              | 1000.              | 1000.              | 1000.              | 1000       |
| Pii          | .043               | .043               | .043               | .031               |            |
| Poi          | .043               | .043               | .043               | .031               |            |
| Pif          | .065               | .065               | .065               | .065               |            |
| Pof          | .043               | .043               | .043               | .031               |            |
| $\Delta P_i$ | .022               | .022               | .022               | .034               |            |
| $\Delta P_o$ | .000               | .000               | .000               | .000               |            |
| Wi           | .464               | .464               | .655               | .686               |            |
| Wf           | .567               | .567               | .810               | .919               |            |

Cálculo de la fuerza real  
utilizando la ecuación (10) se tiene:

$$\begin{aligned}
 Fr &= (A_p - A_i) P_i - (A_o - A_o) P_o \\
 Fr &= (8.296 - 4.68) 14784 - (8.296 - 6.49) 5840 \\
 &= 42912 \text{ lb.}
 \end{aligned}$$

Utilizando la ecuación (11) se estima la fuerza ficticia Ff

$$\begin{aligned}
 Ff &= AP (P_i - P_o) \\
 &= 8.296 (14785 - 5839) \\
 Ff &= 74216 \text{ lb.}
 \end{aligned}$$

Calculo del punto neutro n.

Asumiendo que la primera sección está parcialmente flambeada se tiene:

$$n = \frac{F}{W} = \frac{Ff}{Wf} = \frac{74216}{0.564} = 10965 \text{ pie}$$

Se concluye del valor anterior de n, que toda la sección 1 está flambeada. Ahora se supone que el punto neutro está en la sección 2.

$$n = \frac{F_f - L_1 W_1}{W_2} + L_1 = \frac{74216 - 2500 \times 12 \times .564}{.564} + 2500 \times 12$$

$$= 10965 \text{ pies}$$

Haciendo los mismos comentarios que en el caso anterior ahora se supone que la sección 3 está parcialmente flambeada.

$$n = \frac{74216 - 5200 \times 12 \times .564 - 1500 \times 12 \times .564}{.807} + 2500 \times 12 + 1500 \times 12$$

$$n = 8868 \text{ pie}$$

Del valor anterior de, n, se concluye que las tres secciones inferiores están totalmente "buckleadas".

Haciendo el análisis para la última sección se tiene que:

$$n = \frac{74216 - 2500 \times 12 \times .564 - 1500 \times 12 \times .564 - 3500 \times 12 \times .807}{.919 \times 12} +$$

$$(2500 + 1500 + 3500)$$

$$n = 7933 \text{ pie}$$

El valor anterior de n indica que los vecciones 1, 2, y 3 están totalmente flambeados y la número 4 los está sólo parcialmente.

Evaluación del efecto de pistón

a) Sección 1

La fuerza  $\Delta F$  aplicada en la sección 1 es:

$$\Delta F_1 = (p - A_i) P_i - (A_p - A_o) P_o$$

$$\Delta F_1 = (8.96 - 4.68) 9945.6 - (8.96 - 6.49) 1000$$

$$\Delta F_1 = 34157 \text{ lb}$$

El cambio de longitud en la sección 1,  $L_1$  aplicando la EC. (13) es:

$$\Delta L_1 = \frac{2500 \times 12}{30 \times 10^6 \times 1.81} \times 34157 = -18.87''$$

b) Sección 2

$$\Delta F_2 = \Delta F_1' + \Delta F_2'$$

De acuerdo con la ecuación (17)

$$\Delta F_1' = 34157 \text{ lb.}$$

$\Delta F_2'$  se calcula aplicando la ecuación (18)

$$\begin{aligned} \Delta F_2' &= (A_{i1} - A_{i2}) \Delta P_{i2} - (A_{o1} - A_{o2}) \Delta P_{o2} \\ &= (4.68 - 4.68) 9296 - (6.49 - 6.49) 1000 \end{aligned}$$

$$\Delta F_2' = 0 \text{ lb}$$

De tal manera que:

$$\Delta F_2 = 34157 \text{ lb.}$$

El cambio de longitud de la sección 2 es:

$$\Delta L_2 = \frac{1500 \times 12}{30 \times 10^6 \times 1.81} \times 34157 = -11.32''$$

c) Sección 3

Siguiendo el procedimiento anterior



$$\begin{aligned}\Delta F_3^I &= (A_{i2} - A_{i3}) \Delta P_{i3} - (A_{O2} - A_{O3}) \Delta P_{O3} \\ &= (4.68 - 7.03) 8907 - (6.49 - 9.62) 1000 \\ &= -17771 \text{ lb}\end{aligned}$$

Por tanto:

$$\Delta F_3 = 34157 + 0 + (-17771) = 16385 \text{ lb}$$

El cambio de longitud de esta sección es:

$$\Delta L_{13} = \frac{3500 \times 12}{30 \times 10^6 \times 2.59} \times 16385 = -8.85''$$

d) Sección 4

$$\begin{aligned}\Delta F_4 &= (A_{i3} - A_{i4}) \Delta P_{i4} - (A_{O3} - A_{O4}) \Delta P_{O4} \\ &= (7.03 - 7.03) 7999 - (9.62 - 9.62) 1000\end{aligned}$$

$$\Delta F_4^I = 0$$

Por tanto:  $\Delta F_4 = \Delta F_3 = 16385 \text{ lb}$ .

Al cambio de longitud  $\Delta L_4$  es:

$$\Delta L_{14} = -\frac{2500 \times 12}{30 \times 10^6 \times 2.59} \times 16385 = -6.32$$

Finalmente el cambio de longitud de la sarta debido al efecto de pistón es:

$$\begin{aligned}\Delta L_1 &= \Delta L_{11} + \Delta L_{12} + \Delta L_{13} + \Delta L_{14} \\ &= (-18.77) + (-11.32) + (-8.85) + (-6.32)\end{aligned}$$

$$\Delta L_1 = -45.36''$$

Cálculo de la fuerza ficticia en cada sección

$$Ff1 = AP (Pi1 - Por) = 8.296 (14785 - 5839) \\ = 74216 \text{ lb.}$$

$$Ff2 = Ff1 - (L W) 1 = 74216 - 2500 \times 12 \times .564 \\ Ff2 = 57296 \text{ lb}$$

Siguiendo el mismo procedimiento

$$Ff3 = 47144 \text{ lb}$$

$$Ff4 = 13250$$

Así el cambio de longitud por efecto de flambéo en la sección 1 es:

$$\Delta L_1 = - \frac{r1^2 Ff2}{8 EI W 1} \left[ \frac{L1 W1}{Ff1} \left( 2 - \frac{L1 W1}{Ff1} \right) \right] = \frac{1.65^2 * 74216}{.564 \times 8 \times 30 \times 10^6 \times 1.61} \\ \left[ \frac{2500 \times 12 \times .564}{74216} \left( 2 - \frac{2500 \times 12 \times .564}{84188} \right) \right]$$

$$\Delta L_{21} = - 27.79$$

APLICANDO PARA CADA SECCION EL PROCEDIMIENTO SE TIENE:

$$AL22 = - \frac{2.98^2 \times 57296^2}{8 \times 30 \times 10^6 \times 1.61 \times .564} \left[ \frac{1500 \times 12 \times .564}{57296} \left( \frac{2 - 1500 \times 12 \times .564}{57296} \right) \right]$$

$$= 43.20$$

$$AL23 = - \frac{2.67^2 \times 43144}{8 \times 30 \times 10^6 \times 3.43 \times .807} \left[ \frac{3500 \times 12 \times .807}{47144} \left( \frac{2 - 3500 \times 12 \times .807}{47144} \right) \right]$$

$$AL23 = - 21.96''$$

$$AL24 = \frac{2.67 \times 13250}{8 \times 30 \times 10^6 \times 3.43 \times .919} = -1.65$$

EL ACORTAMIENTO TOTAL POR FLAMBEO ES:

$$AL2 = AL21 + AL22 + AL23 + AL24$$

$$= -94.60''$$

Aplicando la expresión (16) se calculan los cambios de longitud debido a las fuerzas radiales.

$$AL31 = - 9.18''$$

$$AL32 = - 5.39''$$

$$AL33 = - 13.87''$$

$$AL34 = - 9.96''$$

El cambio total por baloneo es:

$$AL3 = -38.4''$$

Los cambios de longitud de cada sección por efecto de temperatura se estima con la expresión (17)

$$AL41 = -4.14''$$

$$AL42 = -2.84''$$

$$AL43 = -5.79$$

$$AL44 = -4.14$$

El cambio de longitud total por temperatura es:

$$AL4 = -16.9''$$

Conjugando todos los efectos el cambio de longitud total es:

$$AL_t = -196.25 \text{ pg.}$$

Análisis de aparejos en donde el movimiento es limitado.

Considerando los datos del ejemplo anterior, suponga que al efectuar el ajuste se dejó un peso aplicado sobre el empacador de 20000 lb. Si el aparejo es como el mostrado en la fig. 5 se calcula la cantidad de sellos necesaria para efectuar la estimulación descrita anteriormente, en condiciones iniciales el punto neutro  $n$ , está ubicado en la 2ª sección.

$$n = \frac{20000}{.463 \times 12} = 3599 \text{ pie}$$

De acuerdo con la ley de Hook el peso dejado sobre el empacador equivale aun cambio de longitud, se estima a continuación.



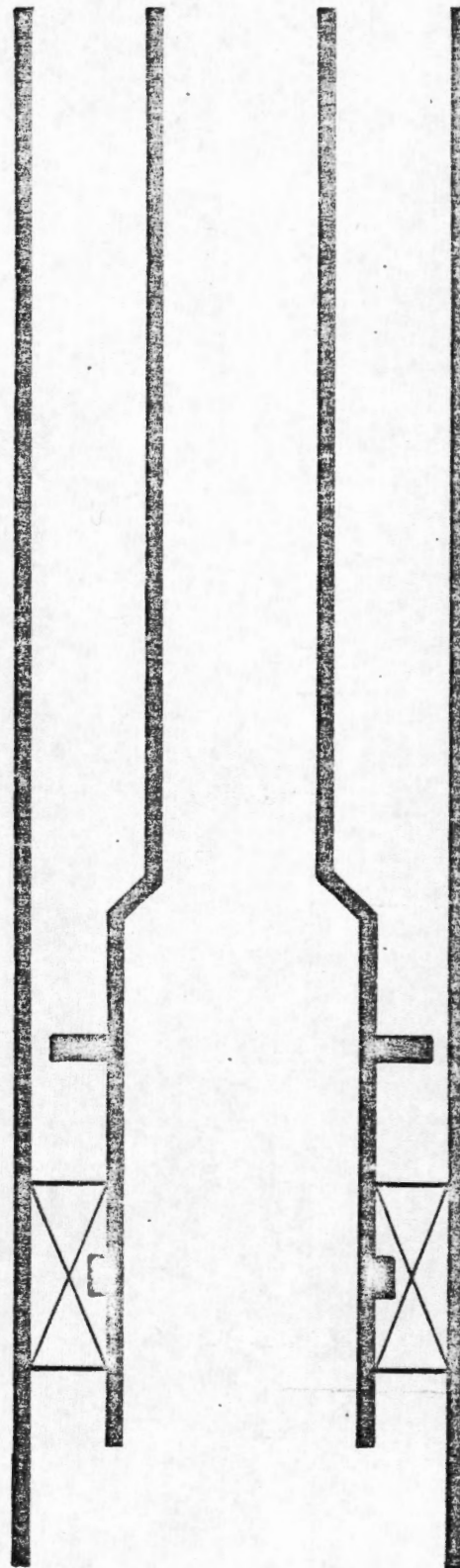


FIG. 5.-APAREJO CON MOVIMIENTO RESTRINGIDO.

$$AL_1 = \frac{3599 \times 12 \times 20000}{30 \times 10^6 \times 1.81} = 15.90''$$

El cambio de longitud por efecto de flambéo se calcula considerando el peso dejado sobre el empacador como la fuerza ficticia  $F_f$ , así aplicando las ecuaciones 14 y 15 para las secciones 2, 1 respectivamente se tiene:

$$AL_{21} = \frac{1.652 \times 20000^2}{8 \times 30 \times 10^6 \times 1.61 \times .463} \left[ \frac{2500 \times .463 \times 12}{20000} \left( 2 - \frac{2500 \times .463 \times 12}{20000} \right) \right]$$

$$AL_{21} = 5.5''$$

$$AL_{22} = \frac{2.982 \times 20000^2}{8 \times 30 \times 10^6 \times 1.61 \times .463}$$

$$AL_{22} = 19.85''$$

El cambio total debido al peso dejado sobre el empacador es:

$$AL_5 = AL_1 + AL_{21} + AL_{22} = 15.90 + 5.5 + 19.85$$

$$AL_5 = 41.25''$$

En estas condiciones al presentarse los efectos de presión y temperatura el acortamiento será:

$$AL_6 = -196.25 + 41.25$$

$$AL_6 = -155''$$

De tal manera que en estas condiciones la longitud mínima de sellos debe ser de 155 pulgadas.

Consideraciones cuando la sarta está anclada en el emperador. (ver fig. 6)

En este caso no se generan movimientos del aparejo porque éste se encuentra anclado en su extremo superior e inferior, lo que originan los cambios de presión y temperatura son esfuerzos adicionales en la sarta.

Hasta este momento sólo hemos contemplado la fuerza aplicada  $F$ , la fuerza real  $F_r$  y la fuerza ficticia  $F_f$ , la presente situación requiere considerar la fuerza empacador - tubería  $F_p$  la cual mantiene fijos los sellos al empacador. De tal manera que al nivel del empacador se crea una nueva fuerza real llamada  $F_r^*$  la cual se estima con la ecuación siguiente:

$$F_r^* = F_r + F_p - (22)$$

Haciendo el mismo razonamiento para la nueva fuerza ficticia se tiene que:

$$F_f^* = F_f + F_p \text{ — (23)}$$

Por analogía podemos escribir la ecuación 24  $\Delta L F = \Delta L f + \Delta L p - (24)$

A continuación se presenta un método gráfico para calcular la fuerza en el empacador,  $F_p$  el cual es aplicable para sertas sencillas y combinadas.

En un sistema coordenado asignar a las abscisas positivas fuerzas de compresión y a las negativas fuerza de tensión, en los ordenados positivos.

Alargamientos y en los ordenados negativos acortamientos de tubería. En el 2º cuadrante la gráfica es construida asignando valores arbitrarios de  $F$ , y aplicando para cada sección la ecuación 1, la deformación total es la suma algebraica de los cambios de longitud parciales. En este caso los efectos de flambeo están ausentes y por tanto la deformación es una función lineal de la fuerza aplicada  $F$ . El cuarto cuadrante es una función cuadrática de fuerza contra cambios de longitud en donde están contemplados los efectos de compresión y flambeo, para construir esta sección se requiere el procedimiento siguiente:

En forma arbitraria dar una fuerza  $F$ , tomando en cuenta las siguientes conside

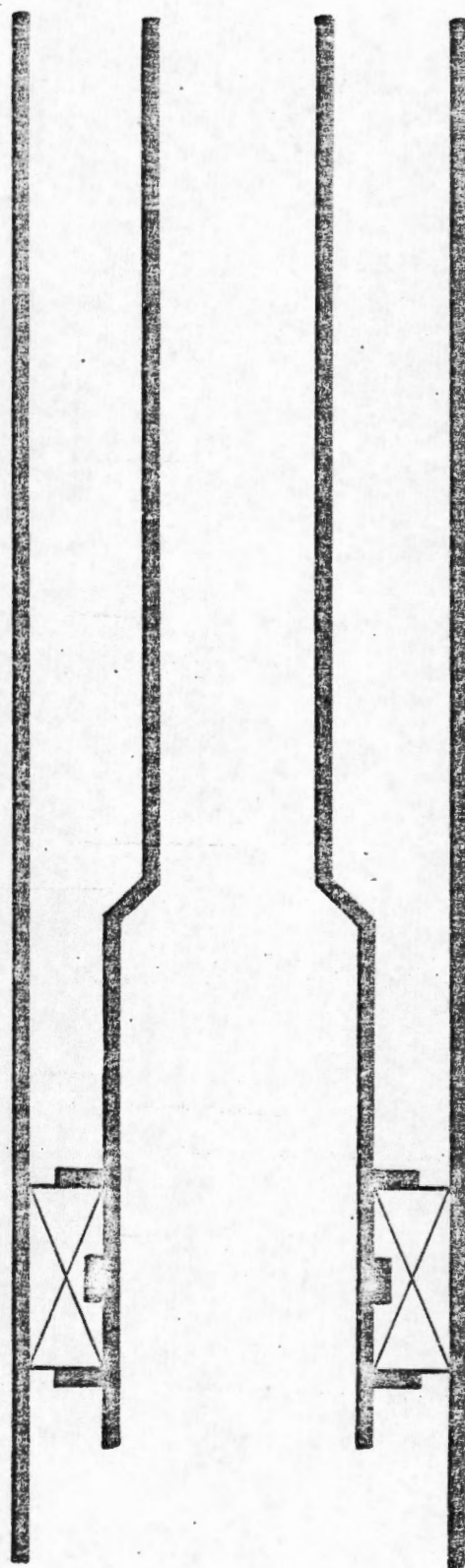


FIG. 6.- TUBERIA ANCLADA EN EL EMPACADOR.



aciones: CUANDO el punto neutro ,n, está en la sección 1, la ecuación 1 se aplica para todas las secciones y la ecuación 3 se aplica solamente a la sección 1, los valores son algebraicamente sumados para cada fuerza y graficados. Cuando el punto neutro,n, cae en la sección 2, con la ecuación 1 y la fuerza ,F, considerada se calculan las deformaciones de cada sección, la ecuación 3 a la sección 2, de nuevo estos valores son sumados algebraicamente y graficados, así sucesivamente hasta completar la construcción de la gráfica. Enseguida la fuerza ficticia Ff, se fija graficamente (ver fig. 7 ) y se localiza el punto A;

El cambio de longitud total ,AL, es extendido verticalmente desde el punto A, hasta el punto B, la fuerza en el empacador Fp está representada por la distancia entre el punto B y C, ya obtenida la fuerza en el empacador Fp se calcula la nueva fuerza Ff\* con la ecuación (23) y la nueva fuerza real Fr\* con la ecuación (22). En este momento es importante calcular la fuerza en el calgador de la T.P., Ff. Se estima restando de la fuerza real en el empaque el peso total de la sarta como se muestra en la ecuación siguiente:

$$Ff = Fa* - \sum_{i=1}^N L_i W_i \quad - (25)$$

Con lo anterior quedan cubiertos en lo general la mayoría de los casos en que un aparejo puede quedar en relación al empacador.

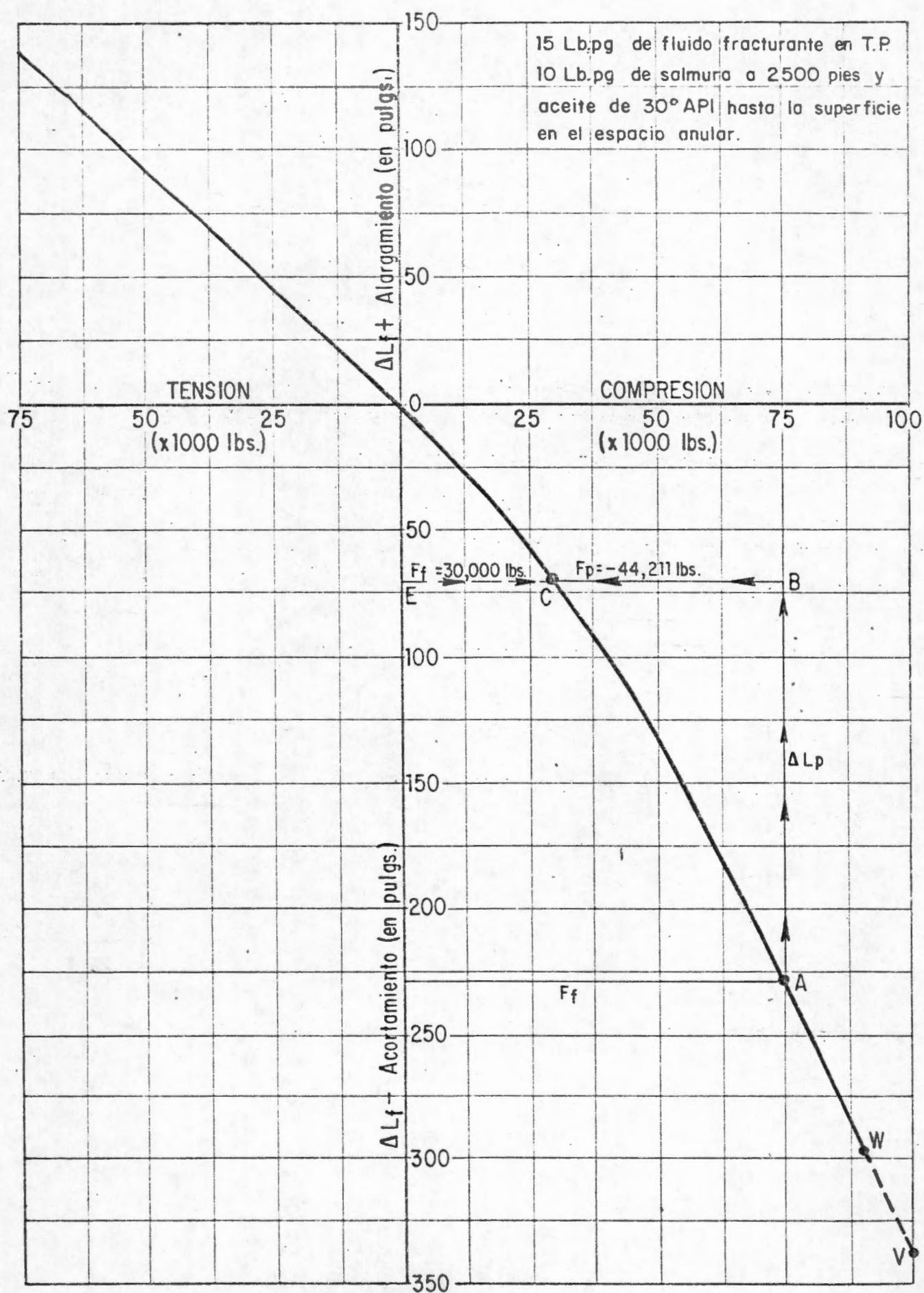


FIG 7—GRAFICA DE CAMBIO DE LONGITUD CONTRA ESFUERZO.

# REPARACIÓN DE POZOS

Autor: Ing. Rafael Viñas Rodríguez.

# T E M A R I O

## REPARACION DE POZOS III

### 1. PLANEACION DE LAS REPARACIONES.

- 1.1 Introducción
- 1.2 Interpretación de registros de presión
  - 1.2.1 Teoría básica
  - 1.2.2 Pruebas de decremento
  - 1.2.3 Curvas de incremento
- 1.3 Registros de producción

### 2. CARACTERIZACION DE FLUIDOS E HIDRAULICA

- 2.1 Reología de fluidos
  - 2.1.1 Fluidos y modelos reológicos
  - 2.1.2 Regímenes de flujo
- 2.2 Cálculo hidráulico
  - 2.2.1 Simulador de circulación de fluidos
- 2.3 Cálculo de la profundidad máxima de operación,

### 3. FACTORES QUE AFECTAN LA VELOCIDAD DE PENETRACION

- 3.1 Optimización de la hidráulica
  - 3.1.1 Máxima potencia
  - 3.1.2 Máximo impacto
- 3.2 Tipo de barrena
- 3.3 Tipo de formación
- 3.4 Peso sobre la barrena
- 3.5 Velocidad de rotación
- 3.6 Efectos de las propiedades del lodo sobre la velocidad de penetración
  - a) Viscosidad plástica
  - b) Porcentaje de sólidos
  - c) Porcentaje de aceite
  - d) Densidad
- 3.7 Eficiencia del personal y equipo
- 3.8 Presión diferencial



#### 4. DISEÑO DE SARTAS DE TRABAJO

- 4.1 Identificación
- 4.2 Clasificación
- 4.3 Esfuerzos
- 4.4 Procedimiento de diseño
  - 4.4.1 Método analítico
  - 4.4.2 Método gráfico
- 4.5 Costos
- 4.6 Conclusiones

#### 5. DISEÑO DE APAREJOS DE PRODUCCION

- 5.1 Efecto de los cambios de presión y temperatura sobre la tubería de producción
- 5.2 Aparejos sencillos
- 5.3 Aparejos combinados
- 5.4 Libre movimiento de los sellos en el empacador
- 5.5 Movimiento parcial de la unidad de sellos
- 5.6 Movimiento nulo de la unidad selladora

#### 6. OPERACIONES ESPECIALES EN REPARACION DE POZOS

- 6.1 Cementación a presión
- 6.2 Reparación de pozos
- 6.3 Operaciones con línea y tubería concéntrica
- 6.4 Seguridad en operaciones de reparación y terminación de pozos
  - 6.4.1 Fluidos
  - 6.4.2 Prevención de reventores
  - 6.4.3 Uso de "barreras"
- 6.5 Métodos de inducción
- 6.6 Pérdidas de circulación

## CAPITULO I

## 1.1

## PLANEACION DE LAS REPARACIONES.

## 1.11 OBJETIVOS DE LAS REPARACIONES.

Es mantener en óptimas condiciones de producción los pozos de un campo determinado.

## 1.12 TIPOS DE REPARACION.

## 1.121 Reparaciones mayores.

Definidas como aquellas en las que durante el proceso de ejecución intervienen aspectos del yacimiento.

Se pueden dividir en:

- a) Reparaciones mayores de explotación.
- b) Reparaciones mayores de inyección de agua
- c) Reparaciones mayores de inyección de vapor
- d) Profundizaciones

## 1.122 REPARACIONES MENORES.

Conversiones a Sistemas artificiales de producción.

Reparaciones de los aparejos de los Sistemas artificiales de Producción.

- Suprimir fugas
- Taponamientos
- Sondeos
- Estimulaciones
- Registros
- Etc.

## 1.13 RAZONES POR LAS QUE SE EFECTUA UNA REPARACION.

## 1.131 Intervención en pozos con problemas.

- a) Eliminar producción indeseable de agua o gas
- b) Reparar fallas mecánicas etc.

## 1.132 INTERVENCION EN POZOS SIN PROBLEMAS

- a) Buscar producción adicional mediante estimulaciones
- b) Ampliar o reducir el intervalo productor
- c) Evaluar zonas potencialmente productoras
- d) Acondicionar un pozo para dar servicio a otros pozos
- e) Controlar en forma dinámica la producción de aceite agua y gas en yacimientos estratificados.

## 1.14 ANALISIS DE PROBLEMAS DE POZOS.

El estudio a problemas de pozos en forma individual debe hacerse sobre la base de que el problema compete exclusivamente al pozo y no es un problema del yacimiento.

Un estudio donde se conjuguen la información geológica, estructural del yacimiento y la del pozo en cuestión nos llevará a las siguientes recomendaciones.

- a) Efectuar una reparación
- b) Continuar con las condiciones actuales de producción
- c) Buscar por algún medio, mantener la presión
- d) Programar métodos artificiales de producción
- e) Abandonar el pozo

Se debe intentar, de ser posible dar solución a un problema, sin hacer uso de un equipo convencional de reparación de pozos.

Los problemas que comúnmente presentan los pozos se pueden desglosar en cuatro conceptos:

- a) Baja producción
- b) Producción de agua
- c) Excesiva producción de gas en pozos de aceite
- d) Fallas mecánicas.

#### 1.15 POZOS CON BAJA PRODUCCION.

Un pozo que tiene condiciones de baja producción puede estar afectado por alguna de las siguientes causas.

##### 1.151 FORMACION CON DAÑO

El daño se define como la alteración negativa de las propiedades de flujo de los conductos porosos en la vecindad del pozo ó en las perforaciones de la T. R.

Todos los pozos en mayor o menor grado tienen daño, el cual se ha causado durante la perforación, revestimiento, terminación etc. y puede variar desde una pequeña pérdida de la permeabilidad hasta el bloqueo total de la zona productora.

##### 1.152 MECANISMO DE DAÑO

- a) Reducción de la permeabilidad absoluta  
se debe al taponamiento de los conductos porosos por sólidos, emulsiones ó por el hinchamiento de arcillas incompatibles con fluidos que han entrado a la formación.
- b) Reducción de la permeabilidad relativa (alteración de la relación fluido móvil estático)  
se da por el incremento de Sw. cerca de la pared del pozo, como resultado de una alta pérdida de filtrado ó por conificación ó digitación de agua de la propia formación, se puede deber también por una inversión de mojabilidad.
- c) Alteración de la viscosidad de los fluidos del yacimiento.

##### 1.153 OPERACIONES DURANTE LOS CUALES SE PUEDE CAUSAR DAÑO.

- a) Durante la perforación
- b) Cuando se mete tubería a un pozo
- c) cuando se estimula
- d) durante una reparación
- e) En la operación de disparos de la T.R.
- f) Durante la fase de producción.



1.154. ¿ Como se evalua el daño?

Puede ser indicado por la historia de producción de un pozo y cuantificado en forma más o menos precisa mediante pruebas de incremento o decremento de presión.

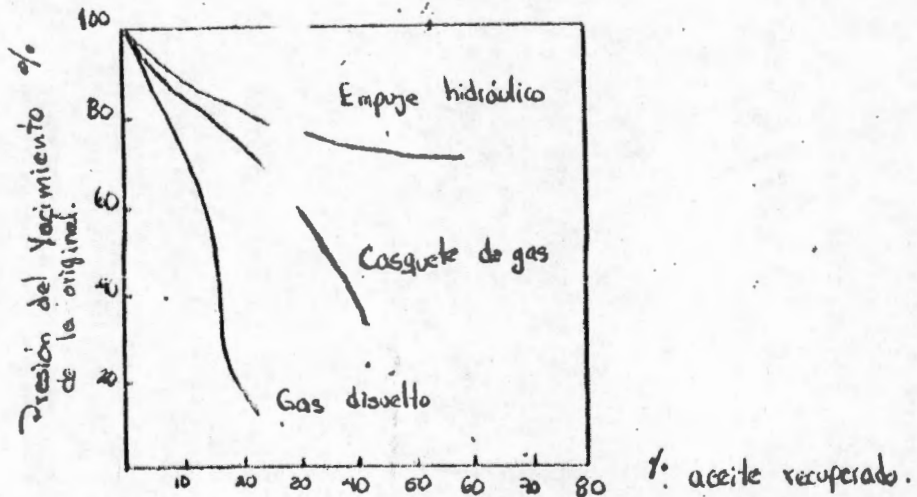
Se debe tener cuidado en no confundir una formación con daño a una de baja presión o de baja permeabilidad.

Las estimulaciones de limpieza estan generalmente diseñadas para eliminar el daño y restablecer las condiciones naturales de la formación.

1.155 FORMACIONES CON BAJA PERMEABILIDAD.

Esta condición puede ser característica de todo un yacimiento o de una sección, si se dispone de información geológica y estructural del yacimiento, y no se puede probar con exactitud la baja permeabilidad, deberán efectuarse pruebas de producción y de presión conjuntamente con algún registro de producción que asegure la total aportación de la zona disparada. El único eficiente para incrementar la producción en este tipo de formaciones es mediante el fracturamiento hidráulico.

1.156 BAJA PRESION DEL YACIMIENTO.



En algún momento de la vida de explotación de un pozo este problema se presentará. La forma de resolver este problema es con algún sistema artificial de producción.

1.16. EXCESO DE PRODUCCION DE AGUA EN POZOS DE ACEITE Y DE GAS.

El problema de presencia de agua se puede tener por tres causas.

- Invasión de agua por conificación o interdigitación debido a estratos de diferente permeabilidad.
- Fuentes externas debido a roturas de T.R. o canalizaciones de la cementación primaria.

Si la información de los registros de producción indican flujo de agua por detrás de la T.R. o de alguna parte rota de ésta, la anomalía puede ser corregida con una intervención con equipo obturando las zonas de aportación de agua mediante cementaciones apresión.

1.161 INTERDIGITACION DE AGUA EN FORMACIONES ESTRATIFICADAS.

La herramienta mas útil para detectar situaciones de esta índole son los registros de producción ( Fluómetros, Gradiomanómetros, registros de temperatura y de ruido, rayos gama, TDP, etc.)



Si se tiene tubería de revestimiento, la solución será cementar las zonas productoras de agua efectuando cementaciones forzadas. Si se tienen condiciones de agujero descubierto será necesario cementar una tubería de extensión (LINER).

La conificación de agua se presenta en yacimientos, con una permeabilidad vertical grande. El procedimiento que recomiendan los expertos es obturar el intervalo abierto y abrir la parte mas alta posible, ó cerrar el pozo un cierto tiempo mientras el cono cede y luego explotar el pozo a ritmos de producción bajos.

#### 1.17 EXCESO DE PRODUCCION DE GAS EN POZOS DE ACEITE.

Si se detecta que el gas es producto de una cementación deficiente, corrigiendo ésta, el problema se elimina, si no es el caso, esta condición puede manejarse considerando las siguientes alternativas:

- a) Si el incremento de gas se debe al abatimiento de la presión en yacimientos que producen por efecto del gas disuelto, no hay nada que hacer ya que este es un comportamiento normal en estos casos.
- b) Si el yacimiento tiene casquete de gas lo recomendable es que no se produzca gas de esta zona, ya que si se provocara el encogimiento del casquete, el aceite invadiría la zona de casquete y parte de este aceite se volvería irrecuperable.
- c) Si el problema es conificación de gas lo recomendable es abrir a producción la zona mas baja posible y producir a gastos reducidos.

#### 1.171 TAPONAMIENTO DEL APAREJO DE PRODUCCION, DISPAROS O VECINDAD DEL POZO.

Cuando se observe que en forma anormal se abate la producción en un pozo sin tenerse abatimiento de la presión, lo primero que se recomienda hacer es verificar que el aparejo de producción este libre de obstrucciones (Como incrustaciones, parafinas, residuos de pistolas, colapsos de tuberías, etc.)

Si este es el caso un registro de presión junto con alguno de producción, sería recomendable para evaluar los factores de pseudo daño entre los disparos y la vecindad de agujeros. Generalmente las causas por los que se genera daño durante la vida productiva de un pozo son:

- a) En pozos de alta productividad, en donde los fluidos debido a la alta velocidad que alcanzan en la vecindad del agujero arrastran finos que en forma paulatina van taponando la vecindad. Dependiendo de la litología de que se trate una estimulación a la matriz resolverá el problema.
- b) En pozo que producen aceites pesados los cuales por efecto de la baja presión se tienen depositaciones de materiales orgánicos como asfaltenos. Haciendo pruebas de laboratorio con estos aceites, se puede llegar a seleccionar algún solvente con el cual se estimule en forma periódica ya que por la naturaleza del problema éste se continuará presentando.
- c) En pozos donde se tiene problemas de incrustaciones debido a los cambios de temperatura y presión. La depositación mas común es el carbonato de calcio en formaciones calcáreas y el sulfato de bario en formaciones de arenisca.

Estimulaciones con Hcl generalmente resuelven el problema del  $\text{CaCO}_3$ .

El sulfato de bario por ser insoluble debe ser eliminado mecánicamente, en este caso se tiene la ventaja de que la disolución del compuesto es casi siempre en las instalaciones de recuperación separación facilitando su eliminación.

#### 1.18 FALLAS MECANICAS

Son muy disimiles las fallas mecánicas que pueden causar pérdida de producción, entre otras se pueden nombrar las siguientes:

- a) Fallas en la cementación primaria
- b) Comunicación de empacadores, roturas de tuberías de producción y revestimiento.
- c) Fallas en las instalaciones superficiales.
- d) Fallas debidos a los diferentes dispositivos de los Sistemas artificiales de producción.

Determinada de alguna manera la posible falla, si se requiere la presencia de un equipo de reparación se debe analizar si se puede efectuar, aprovechando el equipo, a un otro trabajo en el pozo.

Las fallas de la cementación primaria según expertos se ocasiona cuando en las estimulaciones la matriz se alcanzan presiones superiores a la de fractura.

El registro de temperatura junto con el análisis del agua de los diferentes cuerpos atravesados es útil para detectar roturas de la tubería de revestimiento.

#### 1.19 INFORMACION REQUERIDA PARA EL ANÁLISIS DE PROBLEMAS DE POZOS.

##### 1.191 FORMACIONES PROBABLES PRODUCTORAS ATRAVESADAS POR EL POZO.

- a) Formaciones abiertas a producción en algún pozo del campo, ( Posición estructural, producción acumulativa, reserva, reserva permanente etc.)
- b) Zonas adicionales con posibilidad productoras que no han sido probadas en pozos del campo, pero de los cuales se dispone de evaluación petro física y de saturación de fluidos.

##### 1.192 HISTORIA DEL POZO.

- a) Tipo y propiedades del fluido de perforación utilizados, antecedentes de pérdidas de circulación, brotes etc. Fluidos utilizados en la terminación o reparación.

##### 1.193. CEMENTACION PRIMARIA.

- a) ¿Estaba el lodo en buenas condiciones durante la operación?
- b) ¿Se usó frente limpiador y fluidos espaciadores?
- c) Anotar si el trabajo se efectuo en una o dos etapas y si en algún momento se tuvo perdida de circulación o algún otro problema.
- d) la T.R. fué girada y/o reciprocada durante la operación.

##### 1.194 CONDICIONES DEL INTERVALO ABIERTO A PRODUCCION.

- a) Fecha de finalización del trabajo.
- b) Datos de las pruebas de producción.

- c) Tipo tamaño y densidad de pistolas usadas para perforar la T.R.
- d) Dirección de la presión diferencial en el momento del disparo.
- e) Detallar las estimulaciones efectuadas incluyendo resultados.

1.195 ESTADO MECANICO DEL POZO.

1.196 HISTORIA DEL POZO.

- a) Pruebas de producción efectuadas.
- b) Registro de análisis de los fluidos como aceite, agua o gas.

1.197 PRESION DEL YACIMIENTO.

- a) Anotar todos los registros de presión tomadas durante la vida de explotación del intervalo abierto a producción. Si hubo cambios bruscos de presión a la par con cambios en la producción, anótelos como importantes.
- b) Compare la presión del pozo con la media del resto del yacimiento.

Si se determina efectuar un cambio de intervalo, anote la posición estructural así como la profundidad de los niveles gas, aceite y gas y agua. Analice el comportamiento de esta formación en los pozos vecinos.

¿ En que etapa de explotación está este yacimiento, aun hay reserva explotable?

Si se dispone de datos de predicción del comportamiento como gráficas de  $N_p$  contra  $P$ , estime la presión actual del yacimiento.

¿ En que forma responde este cuerpo a las estimulaciones?

Anote la permeabilidad porosidad,  $SW$  y características litológicas y minera lógicas de la roca.

CONCLUSION:

El éxito en la detección y tratamiento a problemas en pozos depende grandemente del conocimiento que se tenga de los diferentes conceptos, anotados anteriormente.



## 1.2 Interpretación de registros de presión.

Los registros de presión pueden ser divididos en dos grupos:

a) Registros independientes del tiempo.

En este caso no se registra la variación de la presión con respecto del Tiempo (registros de presión fondo fluyendo o cerrado).

b) Registros dependientes del Tiempo (pruebas transitorias de presión).

Consisten en medir la presión a partir que se efectúa un cambio en el gasto.

Que información se puede tener?

a) Permeabilidad de la formación, K.

b) Condiciones de producción del pozo (factor de daño), "S".

c) Presión promedio del pozo, P.

d) Porosidad  $\phi$ .

e) Dimensión del yacimiento.

f) Heterogeneidades del yacimiento.

## 1.21 Teoría básica.

Las ecuaciones que describen el flujo de fluidos en un medio poroso se obtienen combinando cinco leyes fundamentales:

a) Ecuación de continuidad.

b) Ecuación de conservación de energía.

c) Ecuación de conservación de momento.

d) Ecuación de movimiento (ley de Darcy).

e) Ecuación de estado.

La ecuación, b, se desprecia porque el flujo se supone isotérmico en la formación.

La ecuación de momento no se toma en cuenta por su intrasendencia en el proceso.

Para flujo radial la ecuación de continuidad es:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r S u_r) = \frac{\partial}{\partial r} (\phi S) \quad \dots (1)$$

Ecuación de transporte (Darcy) es:

$$\frac{q}{A} = - \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \quad \dots (2)$$



La ecuación de estado para líquidos en condiciones isotérmicas es:

$$\rho = \rho_0 e^{C(p-p_0)} \quad \dots (3)$$

donde:  $\rho$  = densidad

$C$  = compresibilidad

$p_0$  = presión en el punto de saturación

sustituyendo 3 y 2 en (1) se tiene

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\phi \mu C_t}{K} \frac{\partial p}{\partial t} \quad \dots (4)$$

La ecuación 4 es la ecuación de difusión para flujo de líquidos en un medio poroso la cual tiene implícitas las siguientes consideraciones:

- El medio es isotrópico y homogéneo,
- El Espesor de la formación es constante,
- A partir de cierta distancia desde el pozo los gradientes de presión  $\partial p / \partial r$  son pequeños y se desprecian,
- La viscosidad se considera constante,
- Se suponen despreciables los efectos gravitacionales.
- La compresibilidad total,  $C_t = C_f + C_{roca}$  es constante.

Flujo de gas:

En este caso sólo varía la ecuación de estado, la cual está dada por la ecuación de los gases reales,

$$\rho = \frac{p M}{Z R T} \quad \dots (5)$$

La ecuación de difusión para gases queda expresada según la correlación (2.6).

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\rho}{\mu z} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\phi \mu C_t}{K} \frac{\partial p}{\partial t} \quad \dots 6$$

utilizando el concepto de Pseudo presión o potencial de gas real la ecuación 2.6 queda:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial m(p)}{\partial r} \right) = \frac{\phi \mu C_t}{K} \frac{\partial m(p)}{\partial t} \quad \dots 7$$

En esta ecuación la variación de la presión respecto del radio no se desprecia y la viscosidad del gas será función de la presión.

El potencial de gas real está dado por:

$$m(p) = 2 \int_{p_m}^p \frac{p dp}{\mu z} \quad [psi^2/e.p] \quad \dots 8$$

cuando se conoce el Pseudo potencial, reducido  $m(p)_r$  la ecuación 2.8 se reduce a:

$$m(p) = \frac{2 p_{rc}^2 (m(p)_r)}{\mu_i} \quad \dots 9$$

## 1.2.2 Pruebas de Decremento.

Usando el método de solución de línea fuente (m.d.h) resolvieron la ecuación diferencial (4). para pruebas de decremento y utilizando unidades del sistema inglés práctico se tiene.

$$P_{wf} = P_i - \frac{162.6 q B_o \mu_o}{K h} \left[ \log \left( \frac{K t}{\phi \mu_o C_t r_w^2} \right) - 3.2275 + 0.875 S \right]$$

$q$  = gasto bls/día

$\mu_o$  = viscosidad en c.p

$C_t$  = compresibilidad total en  $\text{psi}^{-1}$

$\phi$  = porosidad en fracción

$h$  = altura en pies

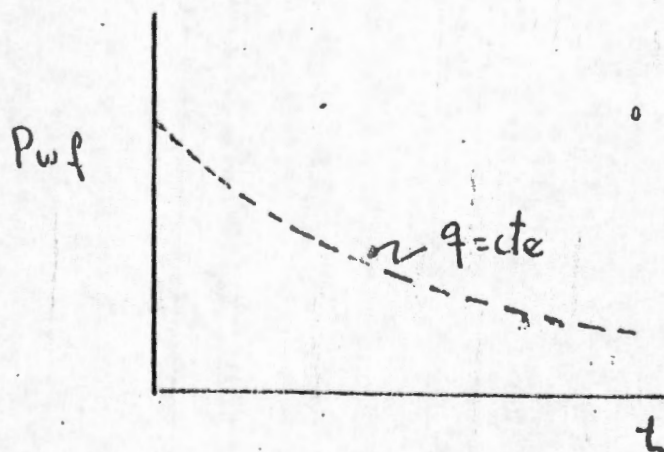
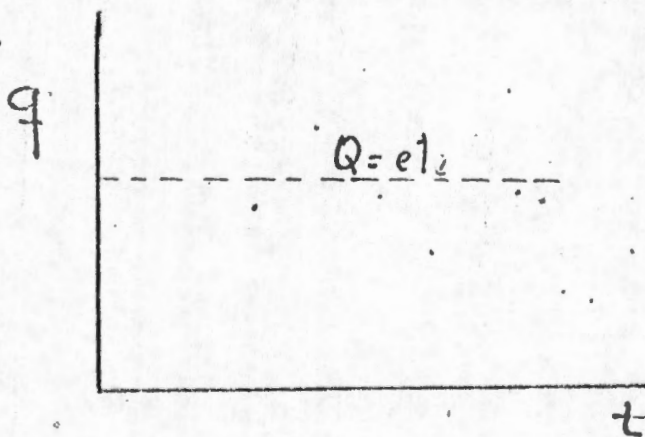
$t$  = tiempo de producción en horas

$r_w$  = radio del pozo en [pie]

$B_o$  = factor de volumen

$P_{wf}$  = presión de fondo fluyendo psi

$P_i$  = presión de fondo estática al inicio de la prueba. Psi



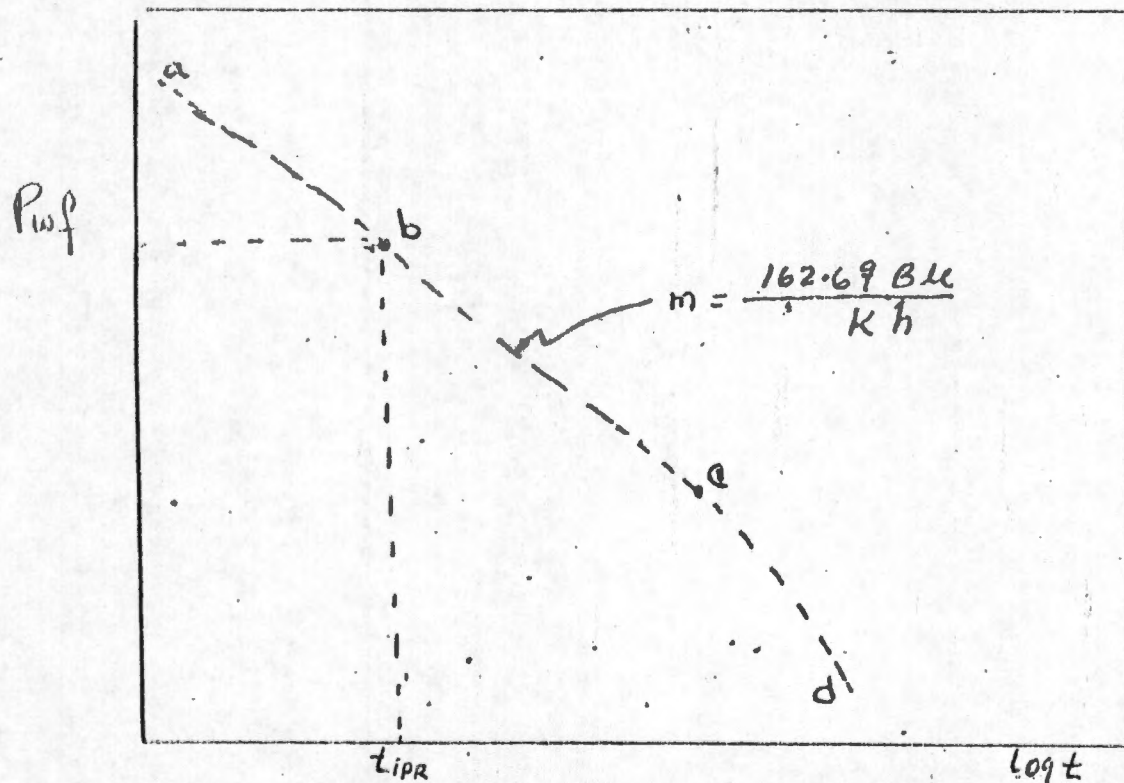
La ecuación (10) es una ecuación de la forma  $Y = mx + b$ .

317

$$X = \left[ \log \left( \frac{kt}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) \right] ; m = \frac{162.6 q B \mu_o}{K h} \quad \text{--- 11}$$

--- 12

NOTA: En la ecuación (10) da solución a la ecuación de difusión considerando un yacimiento infinito, durante el período transitorio - o sea que no se han sentido los efectos de frontera.



- a-b - datos para tiempos cortos (generalmente almacenamiento)
- b-c - porción recta de la curva de presión
- c-d - datos bajo la influencia de efectos de frontera y/o interferencia.

Solución;

- a) Graficar en papel semi-logarítmico la presión contra el tiempo de flujo.
- b) De la porción recta estimar la pendiente y la permeabilidad.
- c) Estimar la presión de fondo fluyendo a tiempo de flujo de una hora de la sección recta o de su extrapolación.
- d) Estimar el factor de daño con la siguiente expresión

$$S = 1.15 \left[ \frac{P_i - P_{1hr}}{m} - \log \left( \frac{K}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) + 3.2275 \right] \quad \text{--- 13}$$

NOTA: Una prueba de decremento o incremento debe tener una duración mínima de 10 hrs. después de que se haya alcanzado la porción recta semi-logarítmica (un ciclo).

$$m = \frac{P_{wf}(t_1) - P_{wf}(10t_1)}{\log 10t_1 - \log t_1} = \left| P_{wf}(t_1) - P_{wf}(10t_1) \right|$$

Ejemplo se llevó una prueba de decremento en un pozo productor de aceite bajo saturado se tienen los datos siguientes:

$$q_o = 20 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$\mu_o = 0.4 \text{ C.P. (laboratorio)}$$

$$B_o = 1.3 \text{ (PVT)}$$

$$\phi = 0.2 \text{ (registros)}$$

$$h = 9.0 \text{ m, (registro)}$$

$$C_t = 8.75 \times 10^{-5} \text{ psi}^{-1} \text{ (Correlaciones)}$$

$$v_w = 4.25'' \text{ (calibrador)}$$

| t (horas) | Pwf (psi) | T (hrs) | Pwf (psi) |
|-----------|-----------|---------|-----------|
| 0         | 2000      | 70      | 1747      |
| .1        | 1996      | 80      | 1742.5    |
| .2        | 1992      | 90      | 1740      |
| .3        | 1988      | 100     | 1738      |
| .4        | 1985      | 200     | 1721      |
| .5        | 1981      | 300     | 1709      |
| .75       | 1973      | 400     | 1696      |
| 1         | 1965      | 500     | 1683      |
| 2         | 1935      | 600     | 1672      |
| 3         | 1910      | 700     | 1660      |
| 5         | 1870      | 800     | 1648      |
| 7         | 1850      | 900     | 1637      |
| 10        | 1820      | 1000    | 1625      |
| 20        | 1780      | 1100    | 1611      |
| 40        | 1754      | 1200    | 1606      |
| 50        | 1753      | 1300    | 1588      |
| 55        | 1751.5    | 1400    | 1577      |
| 60        | 1750      | 1700    | 1543      |

Si se han alcanzado condiciones de flujo semiestacionario la siguiente ecuación nos representará la mecánica de flujo en el medio poroso. La ecuación está en el Sistema inglés práctico.



$$P_{wf} = P_i - \frac{116989t}{V_p C_t} - \frac{141.2984}{kh} \left\{ \ln r_{eD} - 3/4 + S \right\} \quad \text{--- 14}$$

### 1.2.3 Curvas de Incremento.

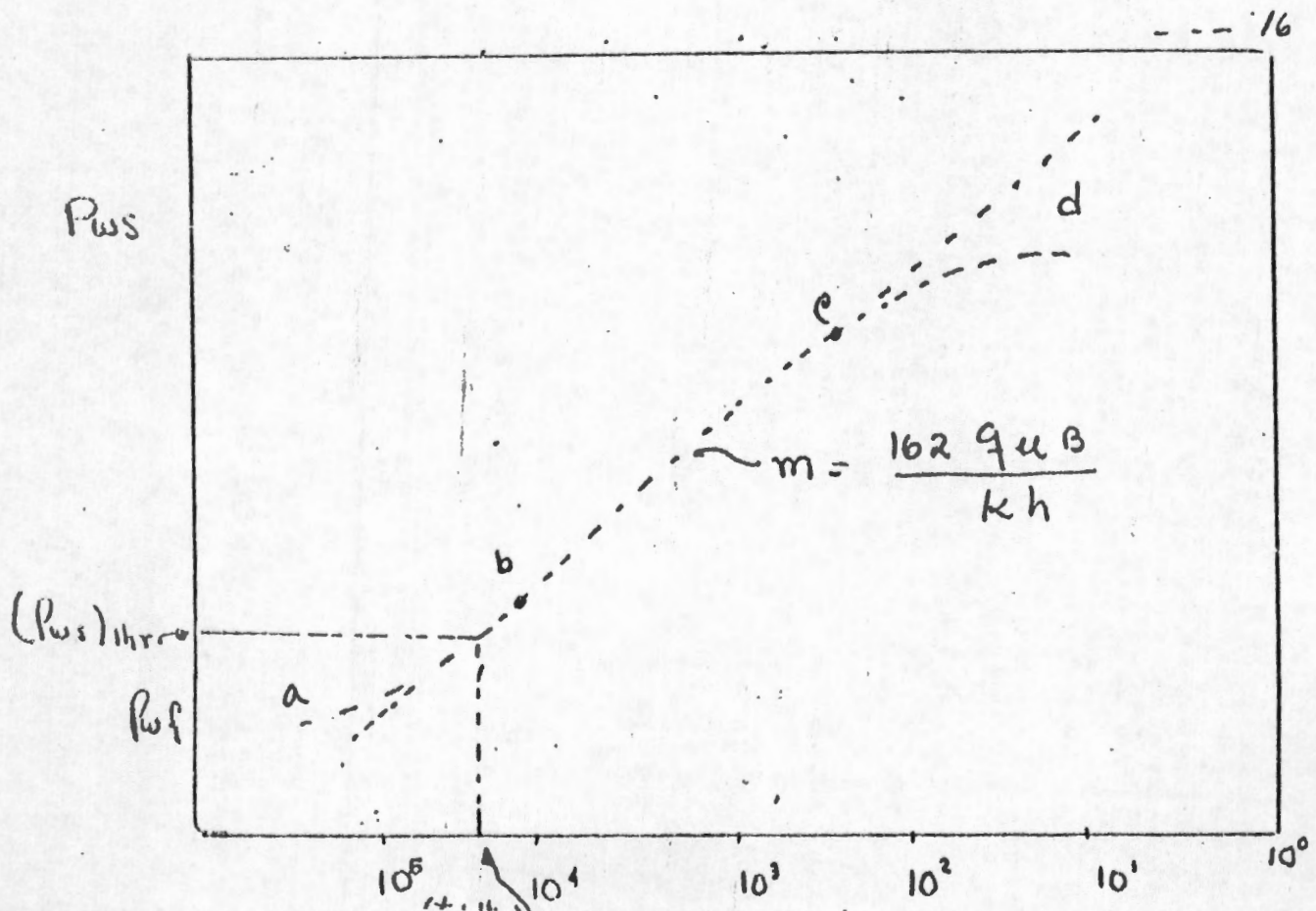
Para el análisis de pruebas de incremento Theis y Horner dieron la siguiente solución a la ecuación de difusión.

$$P_{ws} = P_i - \frac{1629B4}{kh} \log \left( \frac{t + \Delta t}{\Delta t} \right) \quad \text{--- 15}$$

Como puede verse la ecuación (15) puede tener solución en forma gráfica ya que es de la forma  $Y = mx + b$

Analizando la ecuación (15) a tiempos cortos, sin que se hayan sentido los efectos de frontera puede ser estimado el factor total de daño.

$$S = 1.15 \left[ \frac{P_{iHor} - P_{wf}(t=0)}{m} - \log \left( \frac{K}{\phi \mu C_t r_w^2} \right) + 3.2275 \right]$$



Análisis de pruebas de decremento en pozos de gas en condiciones de flujo transitorio.

Para estas condiciones Al. Hussain y Ramey desarrollaron la siguiente ecuación.

$$m(p_{wf}) = m(p_i) - 1627 \cdot 138 \frac{q_{gec} T}{kh} \left[ \log \left( \frac{kt}{\phi \mu (c_t)_i r_w^2} \right) \right]$$

$$q = m \text{ Pu}^3/\text{dia} \quad T = [^{\circ}\text{R}] \quad m(\text{Psi}^2/\text{e.p.})$$

$$T_{ees} = 520^{\circ}\text{R.}$$

Para solucionar la ecuación (17) se sigue el siguiente procedimiento:

1. Se construye una gráfica de potencial de gas real, MCP), contra la presión P, para el gas del pozo en cuestión cubriendo desde una presión de abandono hasta la presión estática original, utilizando la tabla 2.2.
2. Graficar el logaritmo del tiempo *contra*  $m(p)$
3. Calcular la pendiente de la sección recta y estimar la permeabilidad de la formación.
4. De la sección recta o de su extrapolación obtener  $m(p)$  1 hora.
5. Estimar el factor total de daño total con la ecuación 18.

$$S = 1.15 \left[ \frac{m(p_i) - m(p_{hr})}{m} - \log \left( \frac{k}{\phi \mu (c_t)_i r_w^2} \right) + 3.2275 \right]$$

----- 18

Calculos del potencial de gas real de los hidrocarburos gaseosos del campo Lampazos.

Datos:

$$\begin{aligned} S.G. &= 0.555 \\ T_y &= 648.6^{\circ} \text{ R} \\ P_i &= 4267 \text{ Psi} \\ P_m &= 336 \text{ Psi} \end{aligned}$$

| PSEUDO-REDUCED PRESSURE | VALUES OF $\psi_r = \int_0^{p_r} \frac{p_r dp_r}{(\frac{\mu}{\mu_1})Z}$ FOR PSEUDO-REDUCED TEMPERATURE $T_r$ OF |         |         |        |         |         |         |         |         |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                         | $p_r$                                                                                                           | 1.05    | 1.15    | 1.30   | 1.50    | 1.75    | 2.00    | 2.50    | 3.00    |
| 0.10                    | 0.0051                                                                                                          | 0.0051  | 0.0051  | 0.0050 | 0.0050  | 0.0050  | 0.0050  | 0.0050  | 0.0050  |
| 0.20                    | 0.0208                                                                                                          | 0.0206  | 0.0204  | 0.0202 | 0.0201  | 0.0201  | 0.0200  | 0.0200  | 0.0200  |
| 0.30                    | 0.0475                                                                                                          | 0.0467  | 0.0461  | 0.0456 | 0.0453  | 0.0452  | 0.0451  | 0.0450  | 0.0450  |
| 0.40                    | 0.0856                                                                                                          | 0.0839  | 0.0824  | 0.0813 | 0.0807  | 0.0803  | 0.0801  | 0.0800  | 0.0800  |
| 0.50                    | 0.1355                                                                                                          | 0.1322  | 0.1293  | 0.1272 | 0.1261  | 0.1254  | 0.1250  | 0.1249  | 0.1249  |
| 0.60                    | 0.1980                                                                                                          | 0.1921  | 0.1869  | 0.1833 | 0.1814  | 0.1803  | 0.1798  | 0.1797  | 0.1797  |
| 0.70                    | 0.2733                                                                                                          | 0.2637  | 0.2556  | 0.2498 | 0.2468  | 0.2452  | 0.2445  | 0.2443  | 0.2443  |
| 0.80                    | 0.3620                                                                                                          | 0.3474  | 0.3355  | 0.3266 | 0.3222  | 0.3198  | 0.3189  | 0.3187  | 0.3187  |
| 0.90                    | 0.4638                                                                                                          | 0.4437  | 0.4262  | 0.4134 | 0.4073  | 0.4039  | 0.4030  | 0.4029  | 0.4029  |
| 1.00                    | 0.5780                                                                                                          | 0.5529  | 0.5276  | 0.5095 | 0.5019  | 0.4974  | 0.4968  | 0.4967  | 0.4967  |
| 1.10                    | 0.7053                                                                                                          | 0.6746  | 0.6400  | 0.6154 | 0.6059  | 0.6003  | 0.6004  | 0.6003  | 0.6003  |
| 1.20                    | 0.8525                                                                                                          | 0.8083  | 0.7638  | 0.7314 | 0.7192  | 0.7131  | 0.7136  | 0.7134  | 0.7134  |
| 1.30                    | 1.0318                                                                                                          | 0.9539  | 0.8983  | 0.8574 | 0.8416  | 0.8356  | 0.8362  | 0.8360  | 0.8360  |
| 1.40                    | 1.2392                                                                                                          | 1.1114  | 1.0431  | 0.9930 | 0.9732  | 0.9676  | 0.9681  | 0.9680  | 0.9680  |
| 1.50                    | 1.4482                                                                                                          | 1.2807  | 1.1978  | 1.138  | 1.1142  | 1.1091  | 1.1091  | 1.1095  | 1.1095  |
| 1.60                    | 1.6468                                                                                                          | 1.4616  | 1.3620  | 1.292  | 1.2645  | 1.2599  | 1.2592  | 1.2602  | 1.2602  |
| 1.70                    | 1.8359                                                                                                          | 1.6516  | 1.5356  | 1.45   | 1.4240  | 1.4199  | 1.4183  | 1.4203  | 1.4203  |
| 1.80                    | 2.0176                                                                                                          | 1.8476  | 1.7182  | 1.624  | 1.5923  | 1.5887  | 1.5862  | 1.5895  | 1.5895  |
| 1.90                    | 2.1926                                                                                                          | 2.0472  | 1.9090  | 1.808  | 1.7695  | 1.7663  | 1.7632  | 1.7679  | 1.7679  |
| 2.00                    | 2.3619                                                                                                          | 2.2476  | 2.1068  | 1.9982 | 1.9553  | 1.9526  | 1.9492  | 1.9554  | 1.9554  |
| 2.10                    | 2.5272                                                                                                          | 2.4499  | 2.3109  | 2.195  | 2.1495  | 2.1472  | 2.1442  | 2.1519  | 2.1519  |
| 2.20                    | 2.6899                                                                                                          | 2.6546  | 2.5206  | 2.399  | 2.3519  | 2.3499  | 2.3479  | 2.3575  | 2.3575  |
| 2.30                    | 2.8500                                                                                                          | 2.8603  | 2.7354  | 2.6    | 2.5623  | 2.5605  | 2.5602  | 2.5721  | 2.5721  |
| 2.40                    | 3.0074                                                                                                          | 3.0658  | 2.9549  | 2.8    | 2.7806  | 2.7788  | 2.7811  | 2.7956  | 2.7956  |
| 2.50                    | 3.1622                                                                                                          | 3.2701  | 3.1786  | 3.0    | 3.0067  | 3.0048  | 3.0105  | 3.0280  | 3.0280  |
| 2.60                    | 3.3143                                                                                                          | 3.4726  | 3.4060  | 3.1    | 3.2403  | 3.2383  | 3.2482  | 3.2691  | 3.2691  |
| 2.70                    | 3.4638                                                                                                          | 3.6727  | 3.6367  | 3.2    | 3.4813  | 3.4792  | 3.4942  | 3.5191  | 3.5191  |
| 2.80                    | 3.6108                                                                                                          | 3.8701  | 3.8700  | 3.3    | 3.7297  | 3.7272  | 3.7483  | 3.7776  | 3.7776  |
| 2.90                    | 3.7553                                                                                                          | 4.0646  | 4.1056  | 3.4    | 3.9851  | 3.9824  | 4.0106  | 4.0449  | 4.0449  |
| 3.00                    | 3.8974                                                                                                          | 4.2560  | 4.3429  | 3.5    | 4.2474  | 4.2444  | 4.2809  | 4.3206  | 4.3206  |
| 3.25                    | 4.2456                                                                                                          | 4.7260  | 4.9417  | 3.6    | 4.9299  | 4.9296  | 4.9903  | 5.0465  | 5.0465  |
| 3.50                    | 4.5859                                                                                                          | 5.1857  | 5.5444  | 3.7    | 5.6466  | 5.6563  | 5.7459  | 5.8235  | 5.8235  |
| 3.75                    | 4.9183                                                                                                          | 5.6338  | 6.1461  | 3.8    | 6.3944  | 6.4224  | 6.5462  | 6.6503  | 6.6503  |
| 4.00                    | 5.2430                                                                                                          | 6.0700  | 6.7434  | 3.9    | 7.1705  | 7.2259  | 7.3894  | 7.5257  | 7.5257  |
| 4.25                    | 5.5622                                                                                                          | 6.4973  | 7.3356  | 4.0    | 7.9713  | 8.0629  | 8.2745  | 8.4484  | 8.4484  |
| 4.50                    | 5.8776                                                                                                          | 6.9181  | 7.9228  | 4.1    | 8.7933  | 8.9296  | 9.2004  | 9.4168  | 9.4168  |
| 4.75                    | 6.1892                                                                                                          | 7.3324  | 8.5032  | 4.2    | 9.6339  | 9.8239  | 10.1654 | 10.4297 | 10.4297 |
| 5.00                    | 6.4970                                                                                                          | 7.7399  | 9.0758  | 4.3    | 10.4907 | 10.7437 | 11.1682 | 11.4859 | 11.4859 |
| 5.25                    | 6.8011                                                                                                          | 8.1406  | 9.6400  | 4.4    | 11.3616 | 11.6870 | 12.2073 | 12.5841 | 12.5841 |
| 5.50                    | 7.1014                                                                                                          | 8.5345  | 10.1951 | 4.5    | 12.2446 | 12.6520 | 13.2811 | 13.7232 | 13.7232 |
| 5.75                    | 7.3980                                                                                                          | 8.9218  | 10.7409 | 4.6    | 13.1379 | 13.6368 | 14.3883 | 14.9020 | 14.9020 |
| 6.00                    | 7.6909                                                                                                          | 9.3025  | 11.2773 | 4.7    | 14.0397 | 14.6399 | 15.5274 | 16.1193 | 16.1193 |
| 6.25                    | 7.9809                                                                                                          | 9.6780  | 11.8066 | 4.8    | 14.9488 | 15.6588 | 16.6956 | 17.3731 | 17.3731 |
| 6.50                    | 8.2688                                                                                                          | 10.0495 | 12.3311 | 4.9    | 15.8643 | 16.6915 | 17.8901 | 18.6617 | 18.6617 |
| 6.75                    | 8.5546                                                                                                          | 10.4170 | 12.8504 | 5.0    | 16.7846 | 17.7366 | 19.1096 | 19.9841 | 19.9841 |
| 7.00                    | 8.8383                                                                                                          | 10.7805 | 13.3644 | 5.1    | 17.7087 | 18.7927 | 20.3527 | 21.3390 | 21.3390 |
| 7.25                    | 9.1198                                                                                                          | 11.1400 | 13.8730 | 5.2    | 18.6356 | 19.8589 | 21.6184 | 22.7253 | 22.7253 |
| 7.50                    | 9.3992                                                                                                          | 11.4956 | 14.3760 | 5.3    | 19.5644 | 20.9337 | 22.9053 | 24.1421 | 24.1421 |
| 7.75                    | 9.6764                                                                                                          | 11.8473 | 14.8735 | 5.4    | 20.4942 | 22.0163 | 24.2124 | 25.5882 | 25.5882 |
| 8.00                    | 9.9516                                                                                                          | 12.1951 | 15.3655 | 5.5    | 21.4242 | 23.1057 | 25.5386 | 27.0627 | 27.0627 |
| 8.25                    | 10.2250                                                                                                         | 12.5399 | 15.8527 | 5.6    | 22.3551 | 24.2007 | 26.8821 | 28.5650 | 28.5650 |
| 8.50                    | 10.4971                                                                                                         | 12.8826 | 16.3358 | 5.7    | 23.2874 | 25.3004 | 28.2415 | 30.0944 | 30.0944 |
| 8.75                    | 10.7678                                                                                                         | 13.2231 | 16.8150 | 5.8    | 24.2205 | 26.4040 | 29.6156 | 31.6502 | 31.6502 |
| 9.00                    | 11.0371                                                                                                         | 13.5614 | 17.2901 | 5.9    | 25.1539 | 27.5107 | 31.0037 | 33.2314 | 33.2314 |
| 9.25                    | 11.3051                                                                                                         | 13.8976 | 17.7612 | 6.0    | 26.0869 | 28.6200 | 32.4048 | 34.8371 | 34.8371 |
| 9.50                    | 11.5718                                                                                                         | 14.2315 | 18.2283 | 6.1    | 27.0192 | 29.7311 | 33.8182 | 36.4666 | 36.4666 |
| 9.75                    | 11.8370                                                                                                         | 14.5632 | 18.6914 | 6.2    | 27.9502 | 30.8437 | 35.2431 | 38.1191 | 38.1191 |
| 10.00                   | 12.1009                                                                                                         | 14.8928 | 19.1505 | 6.3    | 28.8797 | 31.9570 | 36.6786 | 39.7937 | 39.7937 |
| 10.50                   | 12.6258                                                                                                         | 15.5473 | 20.0604 | 6.4    | 29.8052 | 33.1873 | 39.5759 | 43.1956 | 43.1956 |
| 11.00                   | 13.1476                                                                                                         | 16.1969 | 20.9615 | 6.5    | 30.7265 | 34.4352 | 42.5019 | 46.6559 | 46.6559 |
| 11.50                   | 13.6662                                                                                                         | 16.8412 | 21.8537 | 6.6    | 31.6435 | 35.6873 | 45.4518 | 50.1691 | 50.1691 |
| 12.00                   | 14.1816                                                                                                         | 17.4804 | 22.7367 | 6.7    | 32.5565 | 36.9404 | 48.4215 | 53.7299 | 53.7299 |
| 12.50                   | 14.6937                                                                                                         | 18.1145 | 23.6105 | 6.8    | 33.4655 | 38.1935 | 51.4073 | 57.3337 | 57.3337 |
| 13.00                   | 15.2026                                                                                                         | 18.7435 | 24.4750 | 6.9    | 34.3705 | 39.4466 | 54.4059 | 60.9761 | 60.9761 |
| 13.50                   | 15.7081                                                                                                         | 19.3673 | 25.3303 | 7.0    | 35.2715 | 40.6997 | 57.4142 | 64.6533 | 64.6533 |
| 14.00                   | 16.2102                                                                                                         | 19.9859 | 26.1763 | 7.1    | 36.1685 | 41.9528 | 60.4295 | 68.3614 | 68.3614 |
| 14.50                   | 16.7087                                                                                                         | 20.5993 | 27.0132 | 7.2    | 37.0615 | 43.2059 | 63.4494 | 72.0971 | 72.0971 |
| 15.00                   | 17.2039                                                                                                         | 21.2076 | 27.8409 | 7.3    | 37.9505 | 44.4590 | 66.4718 | 75.8571 | 75.8571 |

TABLE 2-2. REDUCED PSEUDO-PRESSURE INTEGRAL ( $\psi_r$ ) AS A FUNCTION OF  $T$  AND  $p$ .



| P <sub>pr</sub> | m (P) r<br>T <sub>pr</sub> = 1.75 | m (p) r<br>T <sub>pr</sub> = 2.0 | m (p) r<br>T <sub>pr</sub> = 1.88 | P (Psi) | m(p) (Psi <sup>2</sup> /cp) | m (r) x 10 <sup>8</sup> |
|-----------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---------|-----------------------------|-------------------------|
| 0               | 0                                 | 0                                | 0                                 | 0       | -                           |                         |
| 0.5             | 0.1261                            | 0.1254                           | 0.1257                            | 336.75  | 8.91 x 10 <sup>6</sup>      | 0.0891                  |
| 1.0             | 0.5019                            | 0.4974                           | 0.4995                            | 673.50  | 3.54 x 10 <sup>7</sup>      | .354                    |
| 1.5             | 1.1142                            | 1.1091                           | 1.1115                            | 1010.25 | 7.87 x 10 <sup>7</sup>      | .787                    |
| 2.0             | 1.9553                            | 1.9526                           | 1.9539                            | 1347.00 | 13.84 x 10 <sup>7</sup>     | 1.384                   |
| 2.5             | 3.0067                            | 3.0048                           | 3.0057                            | 1683.75 | 2.13 x 10 <sup>8</sup>      | 2.13                    |
| 3.0             | 4.2474                            | 4.2444                           | 4.2458                            | 2020.50 | 3.00 x 10 <sup>8</sup>      | 3.00                    |
| 3.5             | 5.6466                            | 5.6563                           | 5.6516                            | 2357.25 | 4.00 x 10 <sup>8</sup>      | 4.00                    |
| 4.0             | 7.1705                            | 7.2259                           | 7.1993                            | 2694.00 | 5.10 x 10 <sup>8</sup>      | 5.1                     |
| 4.5             | 8.7933                            | 8.9296                           | 8.8642                            | 3030.75 | 6.28 x 10 <sup>8</sup>      | 6.28                    |
| 5.0             | 10.4907                           | 10.7437                          | 10.6224                           | 3367.50 | 7.52 x 10 <sup>8</sup>      | 7.52                    |
| 5.5             | 12.2446                           | 12.6526                          | 12.4564                           | 3704.25 | 8.82 x 10 <sup>8</sup>      | 8.82                    |
| 6.0             | 14.0397                           | 14.6399                          | 14.3518                           | 4041.00 | 10.17 x 10 <sup>8</sup>     | 10.170                  |
| 6.5             | 15.8643                           | 16.6915                          | 16.2944                           | 4377.75 | 11.54 x 10 <sup>8</sup>     | 11.540                  |

$$P_{pc} = 708.75 - 57.5 \text{ (S.G.)} = 673.5 \text{ Psi}$$

$$T_{pc} = 169 + 314 \text{ (S.G.)} = 345^{\circ}\text{R}$$

$$\mu_g = .0128 \text{ CoP} \quad 1 \text{ aTm} \cdot \text{YTy}$$

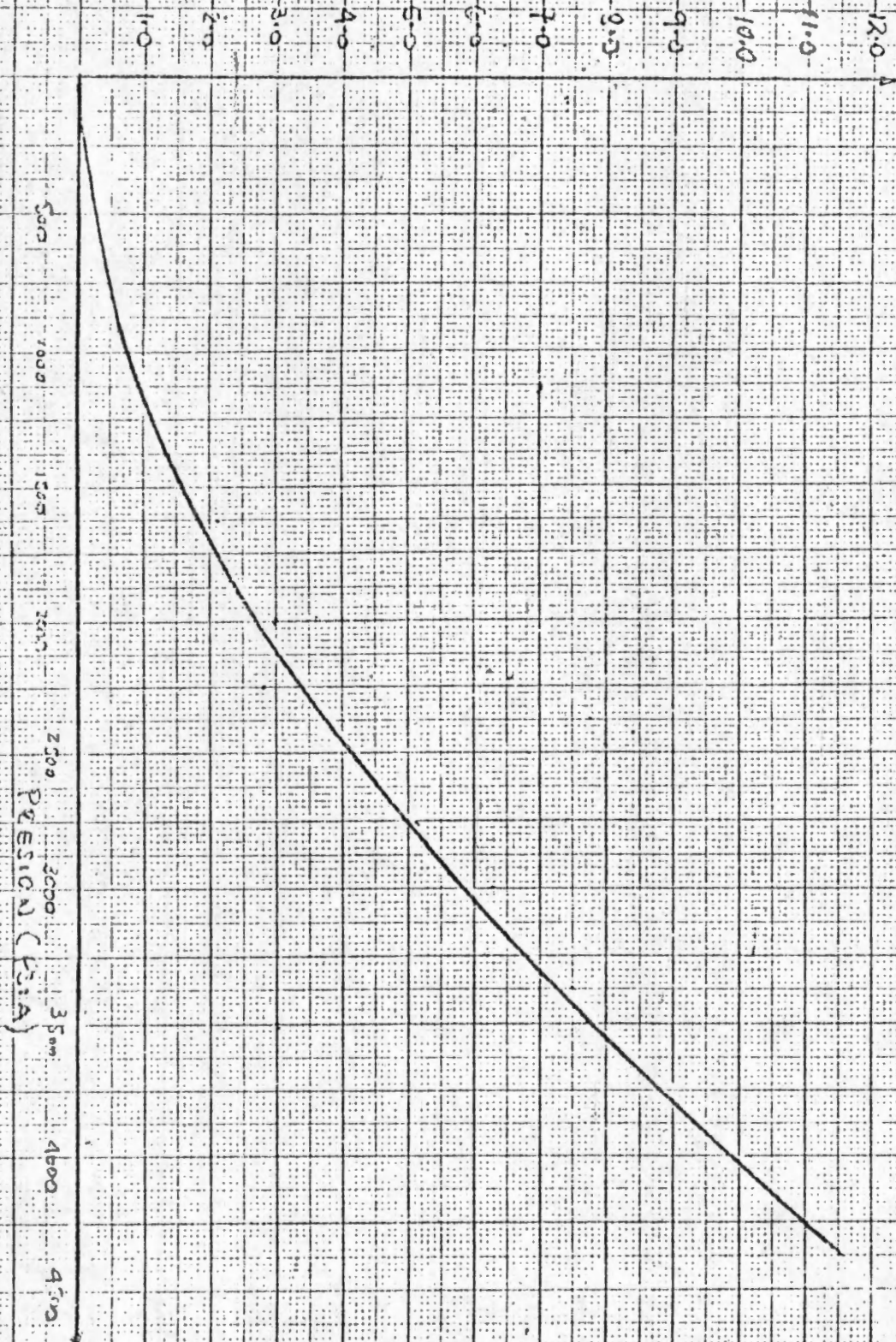
$$\frac{\Delta T_{pr}}{\Delta m(p)_r} = \frac{1.88 - 1.75}{x}$$

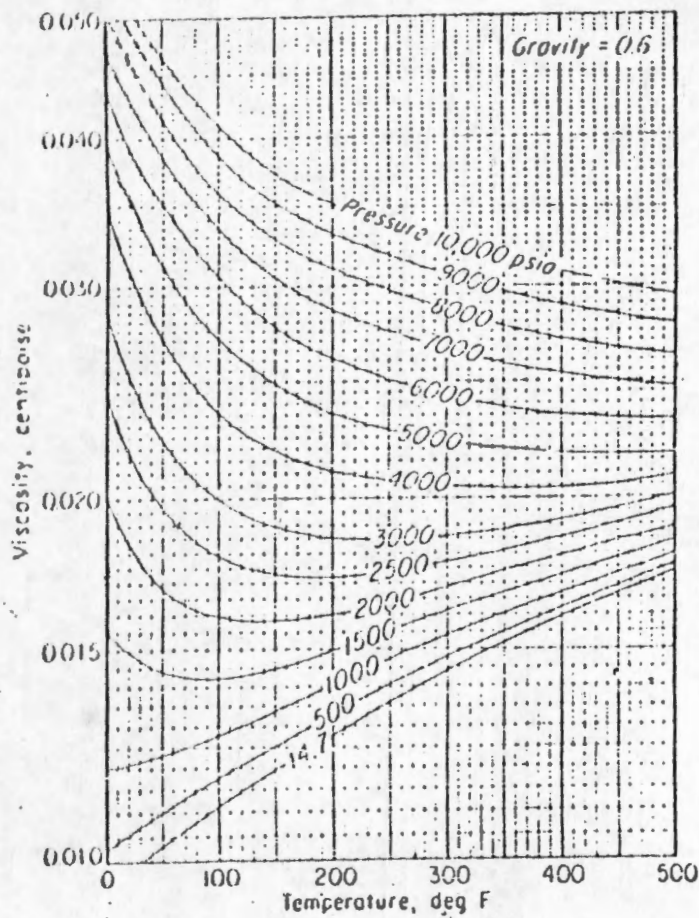
$$m(p) = \frac{2 P_c^2 m(p)_r}{\mu_g}$$

$$m(p)_r @ T_{pr}=1.75 - x = m(p)_r @ 1.88$$

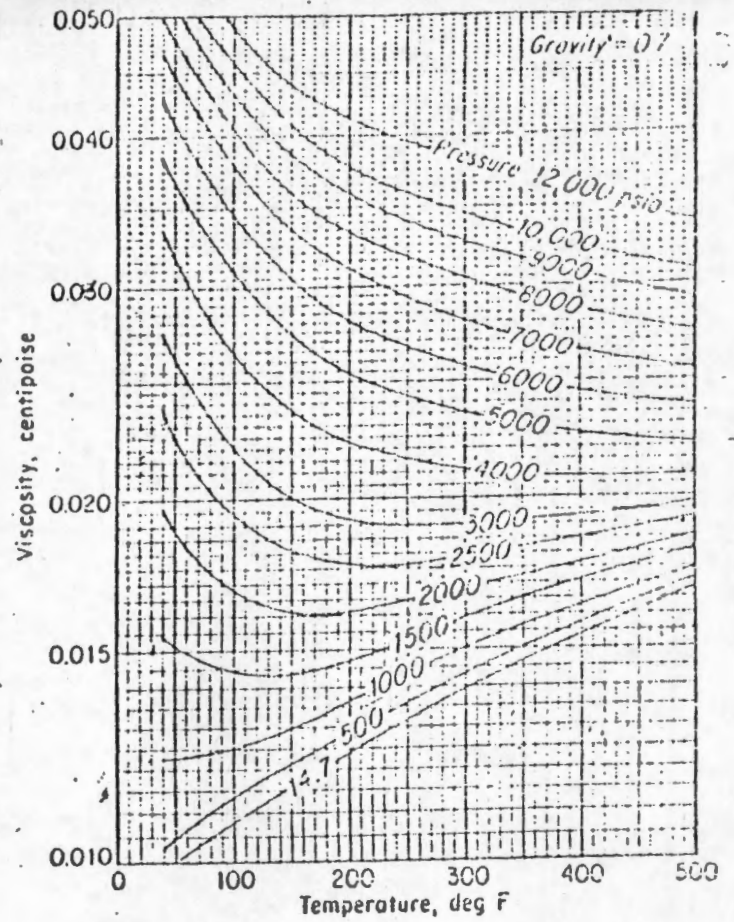


$$m(p) \times 10^8 \left( \frac{h^2}{eV} \right)$$

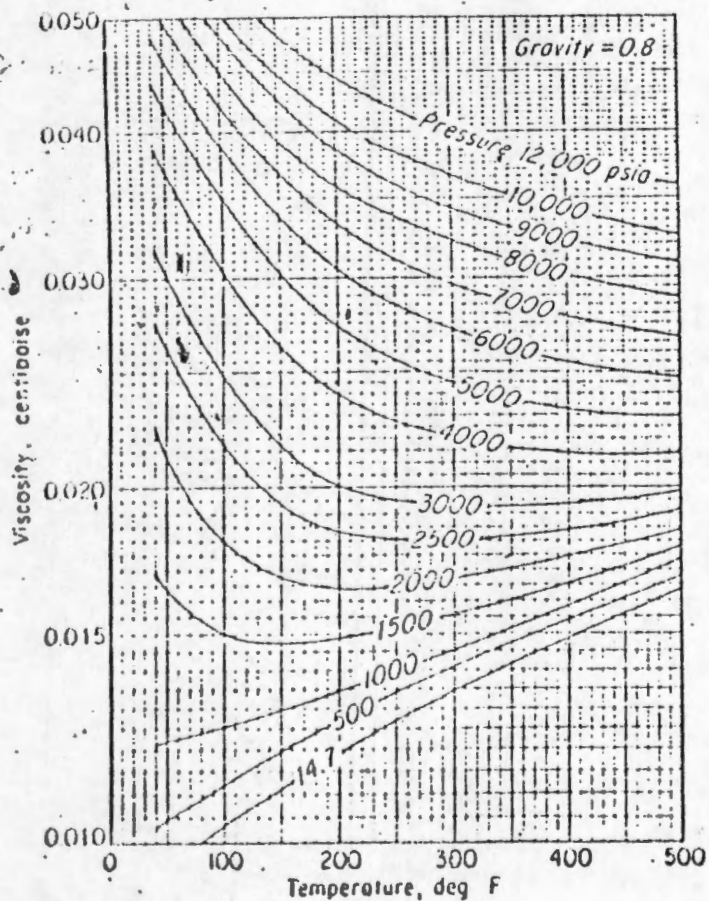




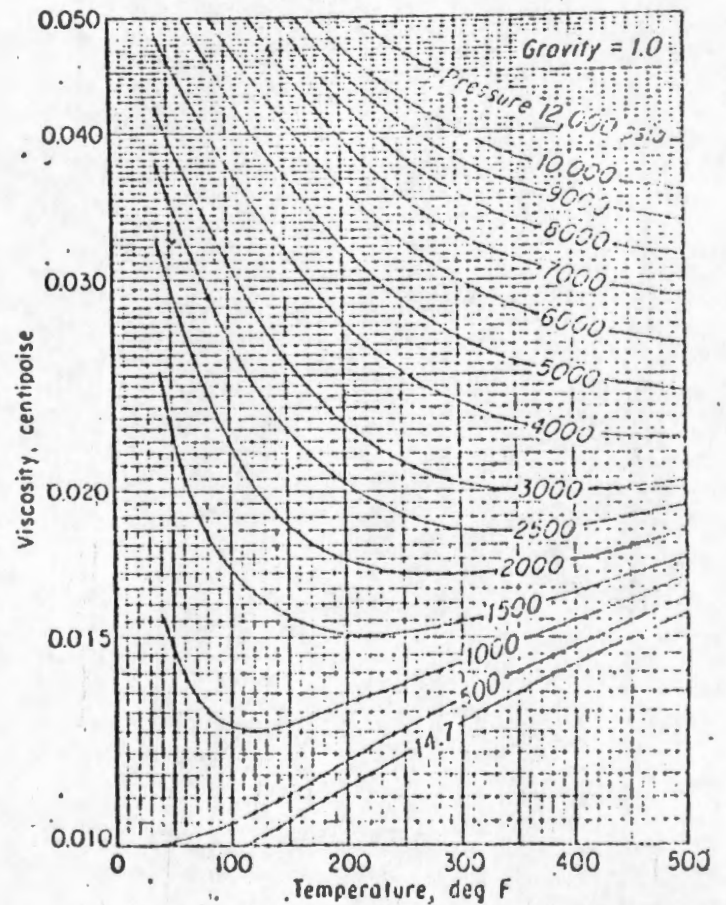
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4-107. Viscosity of natural gases. (a) 0.6 gravity. (b) 0.7 gravity. (c) 0.8 gravity. (d) 1.0 gravity. (2-42.)



- a) Se calcula la temperatura y la presión en el punto crítico - -  
( $T_c$ ,  $P_c$ ).
- b) Se estiman la temperatura y la presión Pseudo reducidas ( $P_{pr}$ ,  $T_{pr}$ ).
- c) A condiciones de  $T_{pr} = e_{T_c}$  estimar el potencial de gas real utilizando la solución dada del potencial Pseudo reducido en la tabla 2.2 y la ecuación siguiente:

$$m(p) = \frac{2 P_{pc}^2 (m(p)_r)}{\mu_g}$$

$\mu_g @ 1at_m \text{ y } T_y [e.p.]$

Se construye la siguiente tabla: (ANEXA).

Ejemplo

En el pozo Reynosa No. 222 (FM-10) se efectuó una prueba de decremento a fin de investigar el porqué de la baja producción, se obtuvo la siguiente información:

| Pwf (Psi) | t (hrs) |
|-----------|---------|
| 9114.98   | 0.0     |
| 5364.76   | 0.25    |
| 4668.96   | 0.50    |
| 4153.35   | 0.75    |
| 3879.44   | 1.00    |
| 3269.55   | 1.50    |
| 3004.72   | 2.00    |
| 2637.67   | 3.00    |
| 2503.46   | 4.00    |
| 2387.02   | 5.00    |
| 2350.10   | 6.00    |
| 2314.60   | 7.00    |
| 2289.75   | 8.00    |
| 2253.54   | 9.00    |
| 2249.78   | 10.00   |
| 2298.98   | 14.00   |
| 2298.98   | 18.00   |
| 2274.13   | 22.00   |
| 2198.16   | 25.00   |
| 2198.16   | 26.00   |
| 2203.84   | 27.00   |
| 2203.84   | 28.00   |

#### DATOS

S.G. = 0.729  
 Ct = .0001767 psi<sup>-1</sup>  
 Qg = 763 MPCD  
 $\mu_g$  = 0.035 c.p. (Ty)  
 T = 249°F = 709°R

$$\begin{aligned}\phi &= 0.15 \\ B_g &= 0.0037 \\ Y_w &= 0.5 \text{ pie} \\ P_{wf} &= 2200 \text{ psi} \\ h &= 5 \text{ pies}\end{aligned}$$

127

Estimar la permeabilidad y el factor de daño y dar una explicación de la baja producción.

| TIEMPO (hrs) | Pwf (Psi) | m (p)              |
|--------------|-----------|--------------------|
| 0.0          | 9114.98   | $8.8 \times 10^8$  |
| 0.25         | 5364.76   | $4.3 \times 10^8$  |
| 0.50         | 4668.96   | $3.5 \times 10^8$  |
| 0.75         | 4153.35   | $2.9 \times 10^8$  |
| 1.00         | 3879.44   | $2.7 \times 10^8$  |
| 1.50         | 3269.55   | $2.05 \times 10^8$ |
| 2.00         | 3004.72   | $1.75 \times 10^8$ |
| 3.00         | 2637.67   | $1.40 \times 10^8$ |
| 4.00         | 2503.46   | $1.30 \times 10^8$ |
| 5.00         | 2387.02   | $1.20 \times 10^8$ |
| 6.00         | 2350.10   | $1.18 \times 10^8$ |
| 7.00         | 2314.60   | $1.14 \times 10^8$ |
| 8.00         | 2289.75   | $1.10 \times 10^8$ |
| 9.00         | 2253.54   | $1.08 \times 10^8$ |
| 10.00        | 2249.28   | $1.08 \times 10^8$ |
| 14.00        | 2298.98   | $1.10 \times 10^8$ |
| 18.00        | 2298.98   | $1.10 \times 10^8$ |
| 22.00        | 2274.13   | $1.08 \times 10^8$ |
| 25.00        | 2198.16   | $1.00 \times 10^8$ |
| 26.00        | 2198.16   | $1.00 \times 10^8$ |
| 27.00        | 2203.84   | $1.00 \times 10^8$ |
| 28.00        | 2203.84   | $1.00 \times 10^8$ |

Análisis de pruebas de incremento de presión en pozos de gas.

La ecuación de interpretación para pruebas de incremento por medio del método de Theis-Horner es :

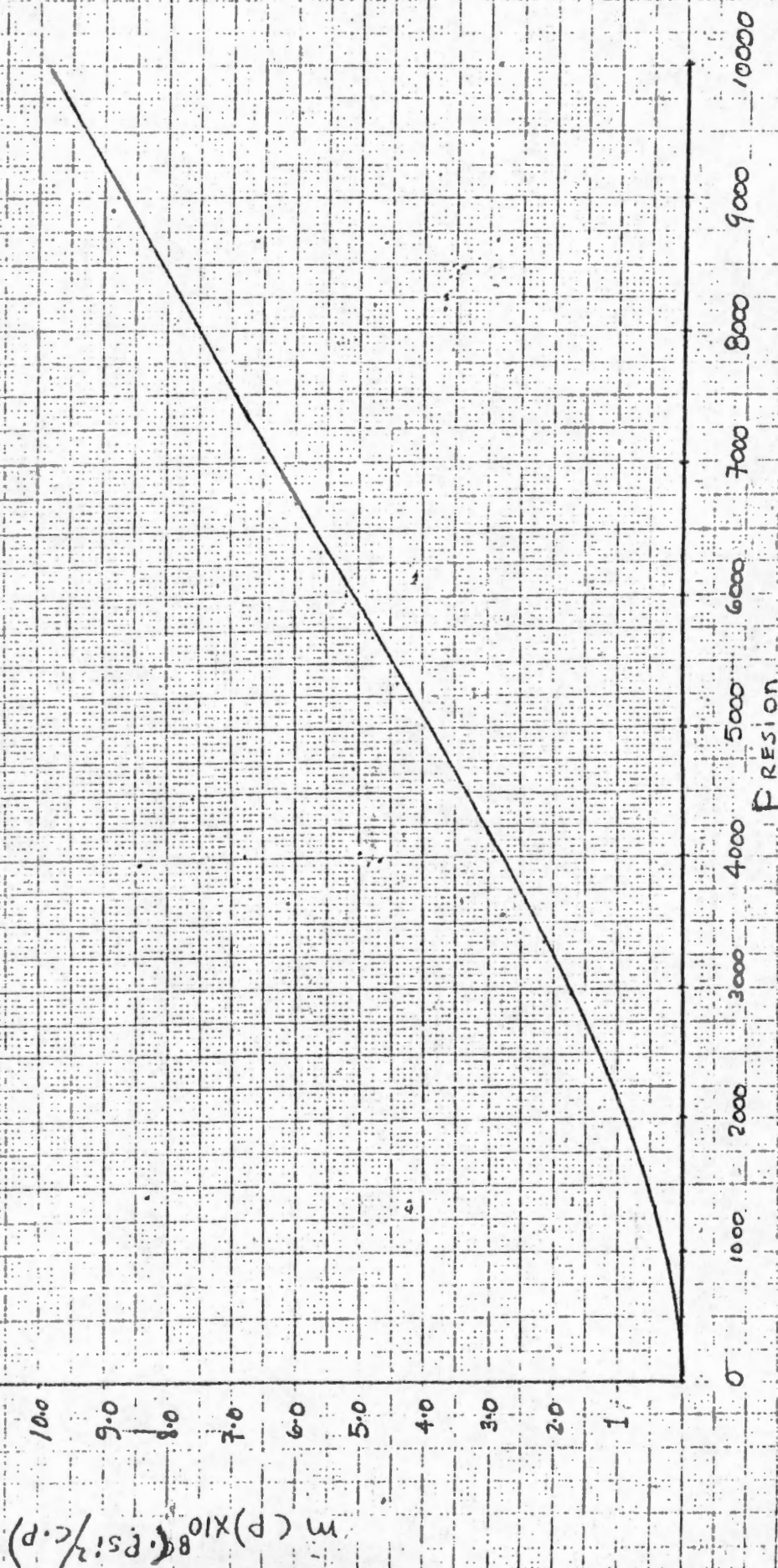
$$m(P_{ws}) = m(P_i) - \frac{1637.128 q_{gef} T}{K h} \log \left( \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \right)$$

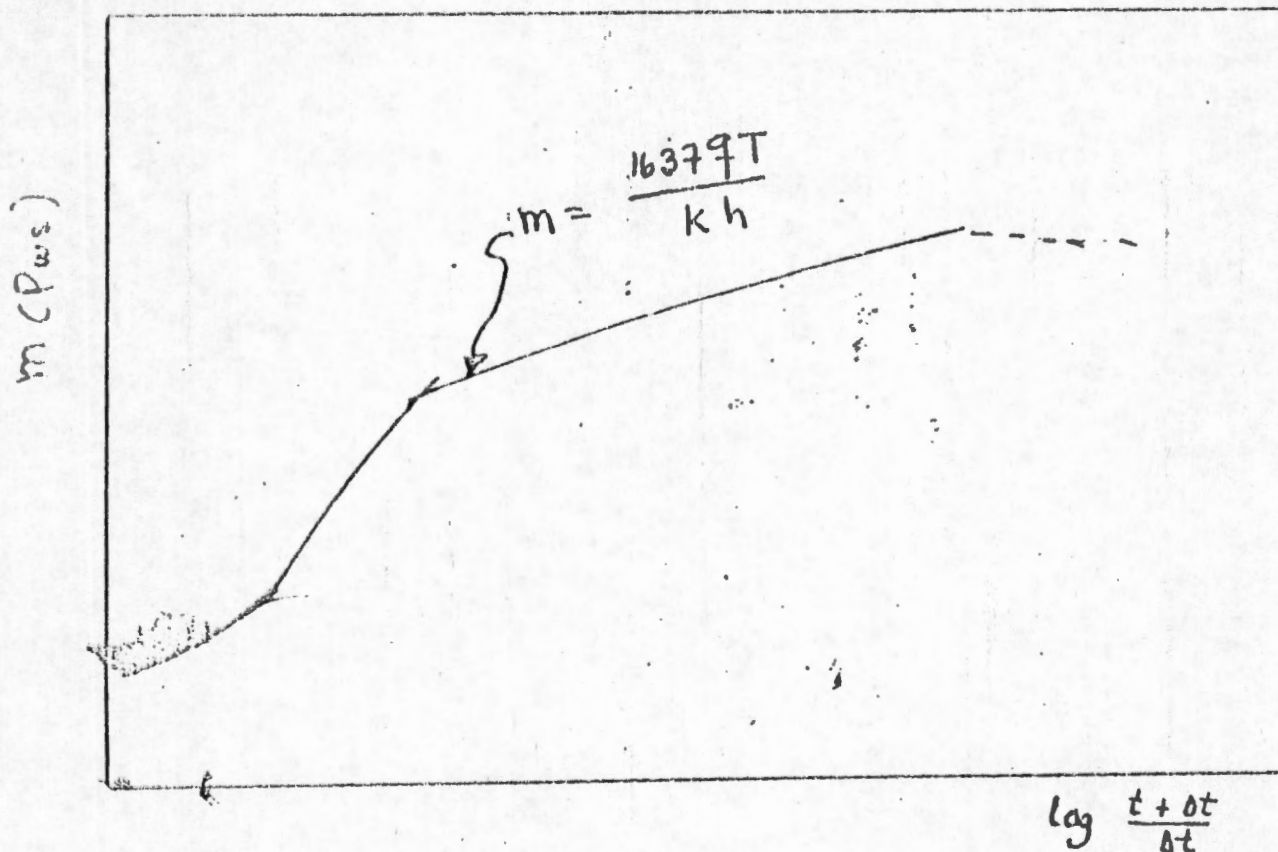
$$S = 1.1513 \left[ \frac{m(P_{hi}) - m(P_{wf})_{\Delta t=0}}{m} - \log \frac{K}{\phi(\mu c)_i r_w^2} + 3.2275 \right]$$



Pozo Reynosa 222  
Yacimiento (O-30)

Variación del potencial del gas real con la presión





Correlación de Lee y González para calcular la viscosidad del gas:

$$\mu_g = k \cdot 10^{-4} Q [X P^Y] \quad (\text{c.p.})$$

$$k = \frac{(9.4 + 0.02 M) T^{1.5}}{209 + 19M + T}$$

$$; \quad X = 3.5 + \frac{986}{T} + 0.01M$$

$$Y = 2.4 - 0.2 X$$

$$; \quad T = [^{\circ}R]$$

$$P = [ \text{psi/cc} ]$$

La densidad,  $\rho$ , debe estar expresada a las condiciones de presión y temperatura, conocida la densidad relativa se puede estimar con la siguiente expresión:

$$\rho_g(P, T) = 0.433 \rho_g \frac{P}{Z T} ; \quad \begin{aligned} P &= [ \text{psia} ] \\ Z &= \text{Factor de desviación} \\ T &= [^{\circ}R] \end{aligned}$$

Factor de volumen del gas:

$$B_g = z \frac{T}{520} \frac{14.7}{\frac{P_{ws} + P_{wf}}{2}}$$

P - psia

T - °R



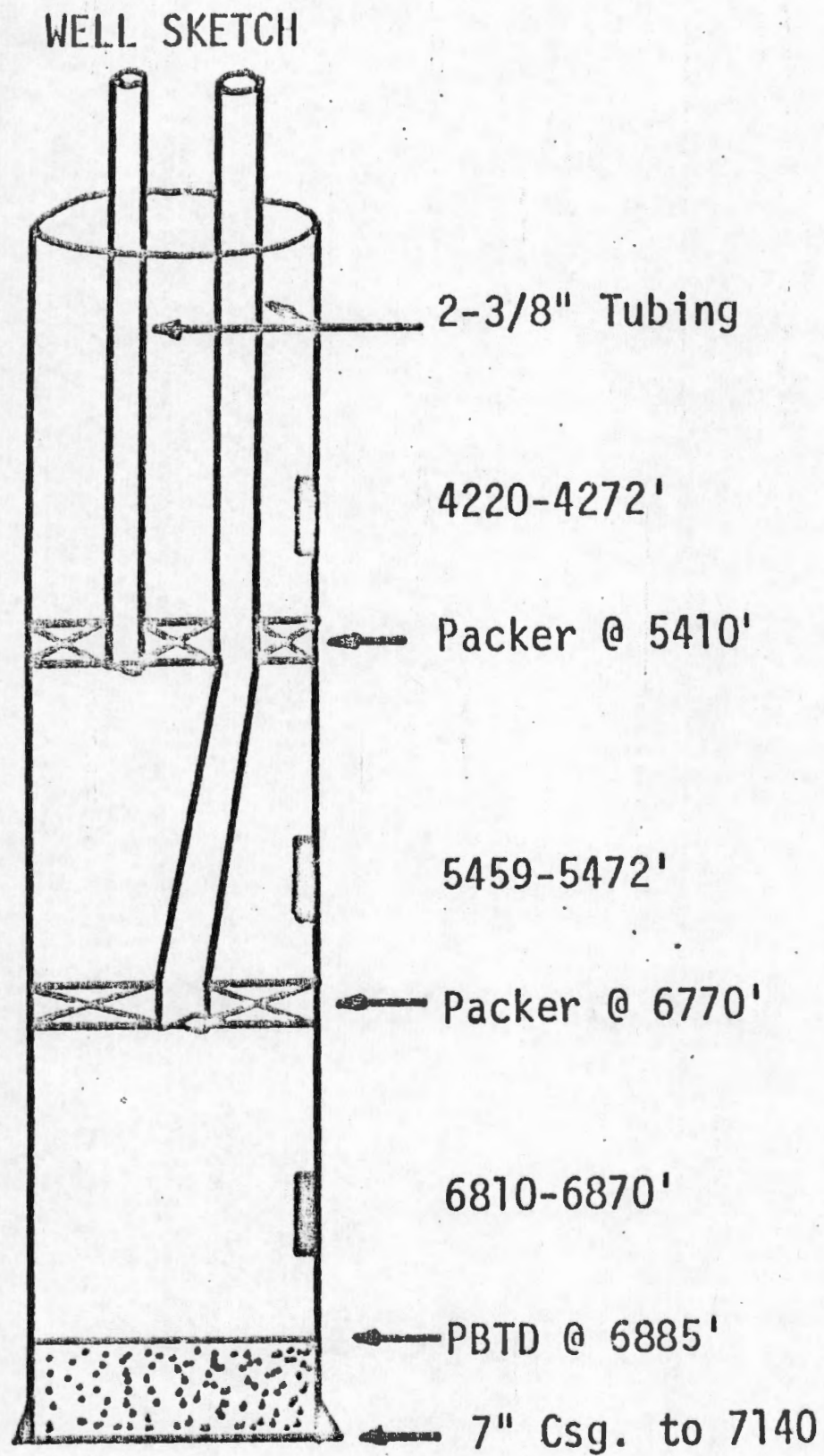


FIGURE 13



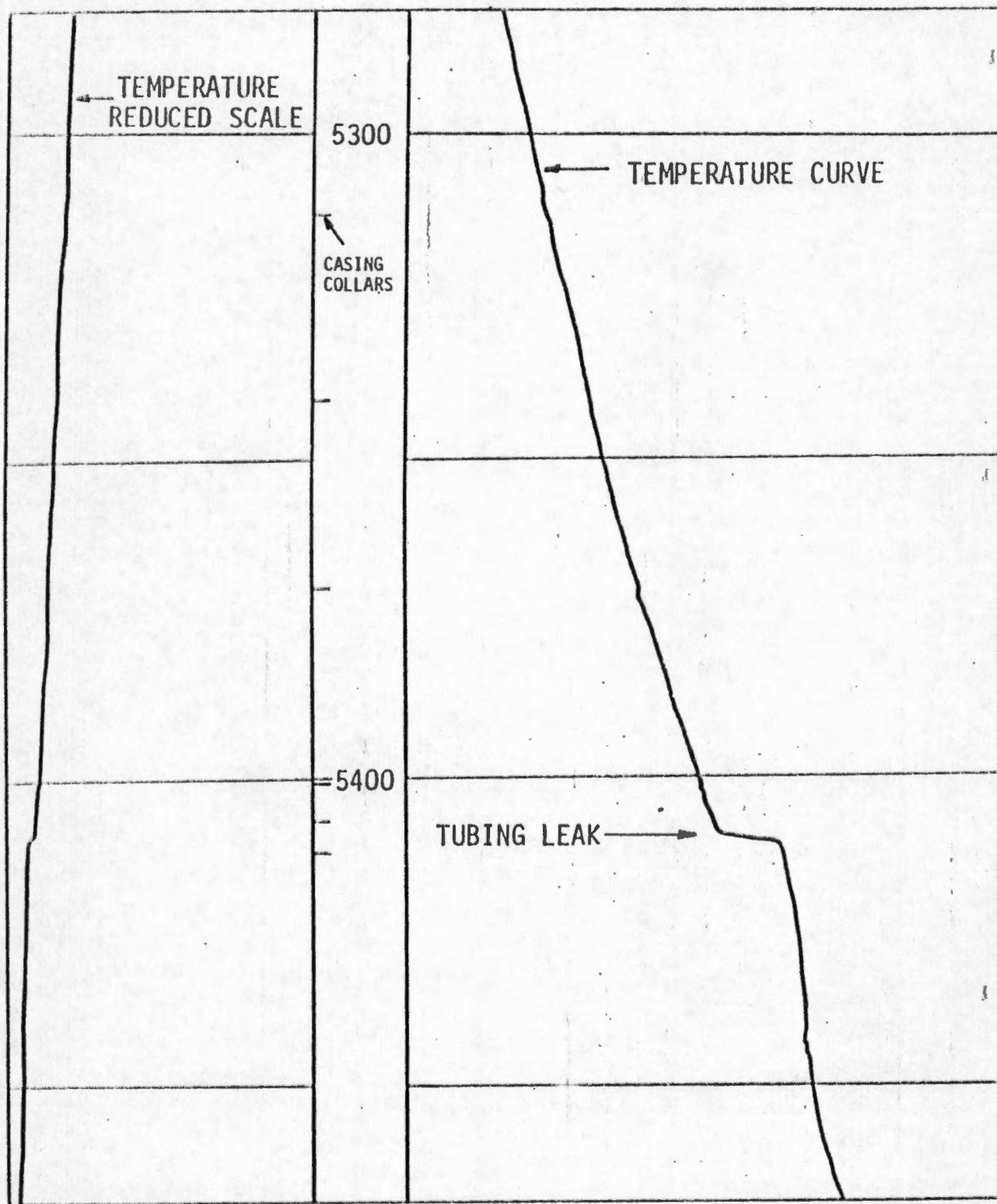


FIGURE 14  
TEMPERATURE SURVEY

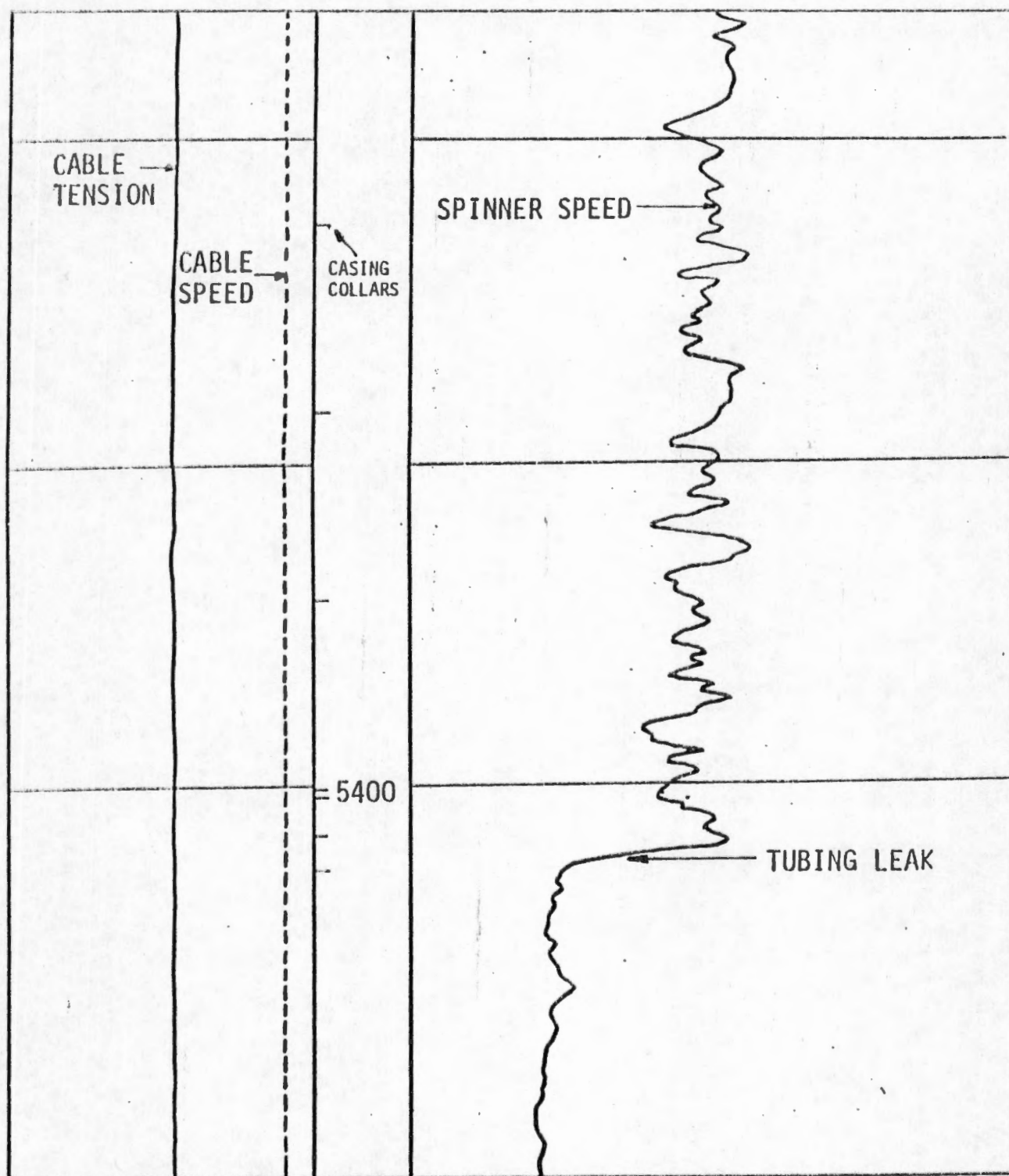


FIGURE 15  
CONTINUOUS FLOWMETER

## EJEMPLO 2

### ANTECEDENTES

En la fig. 16 se muestra el diagrama de la terminación de un pozo en una area nueva. De la interpretación de los registros eléctricos se determinó que el intervalo de 9942 - 9958 era potencial productor de gas. Abajo de 7248 om hay varios desarrollos arenosos que eléctricamente se muestran invadidos. El pzo fue disparado en el intervalo 9945 - 9957 om. Fluyendo gas y agua salada.

### OBJETIVO

Investigar si el agua proviene de las arenas invadidas debido a una falla en la cementación o si proviene del propio intervalo disparado por existir una alta saturación de agua.

### OPERACION

Se bombearon 1500 GAL de agua tratada entre otros aditivos con material radioactivo, desplazándola totalmente fuera de los disparos, enseguida se tomó un registro de rayos - gama como el que se muestra en la fig. 17.

### INTERPRETACION

Comparando los registros de rayos gama se puede comprobar la comunicación del intervalo disparado con los acuíferos inferiores.

# WELL SKETCH

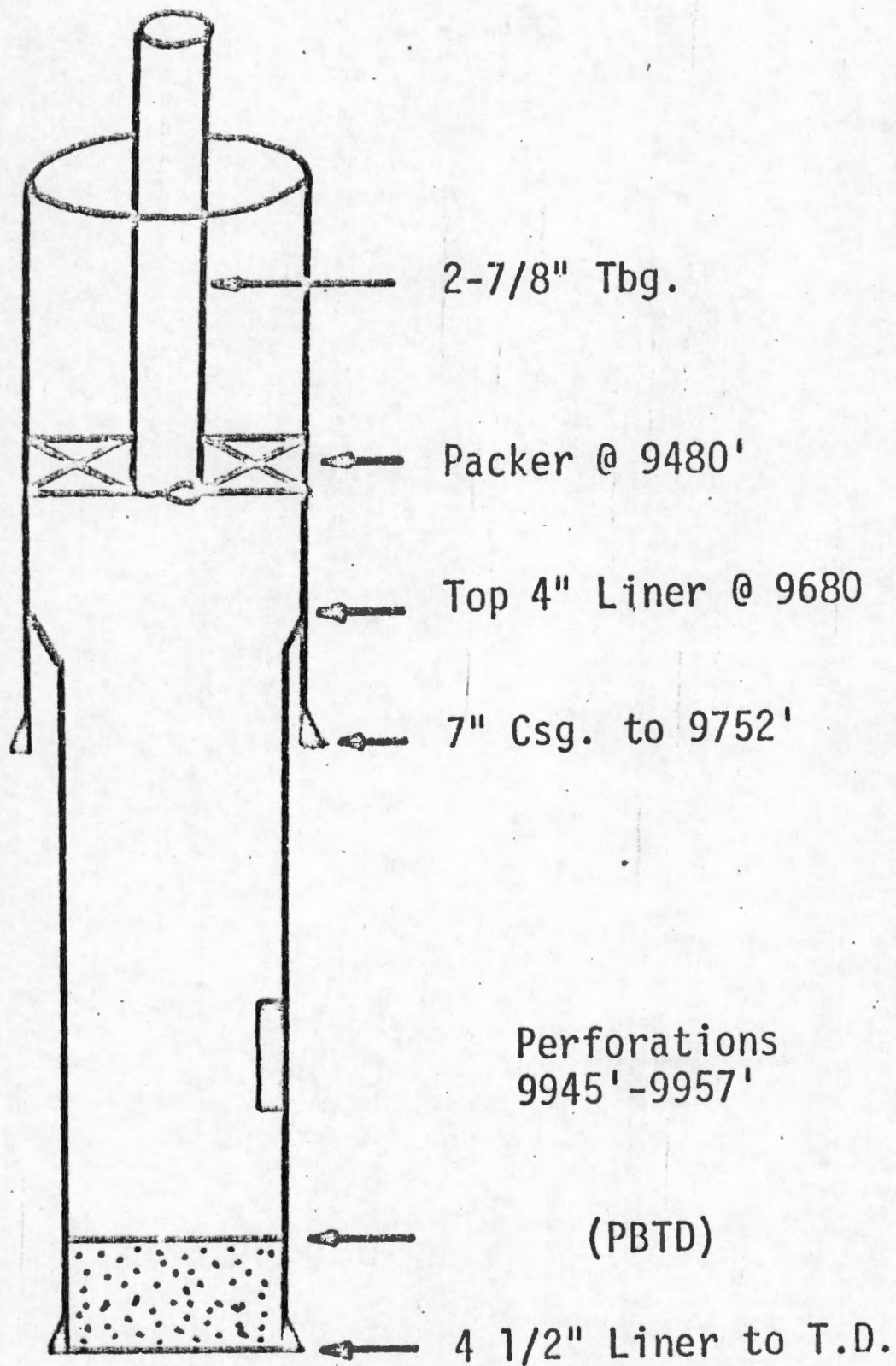


FIGURE 16



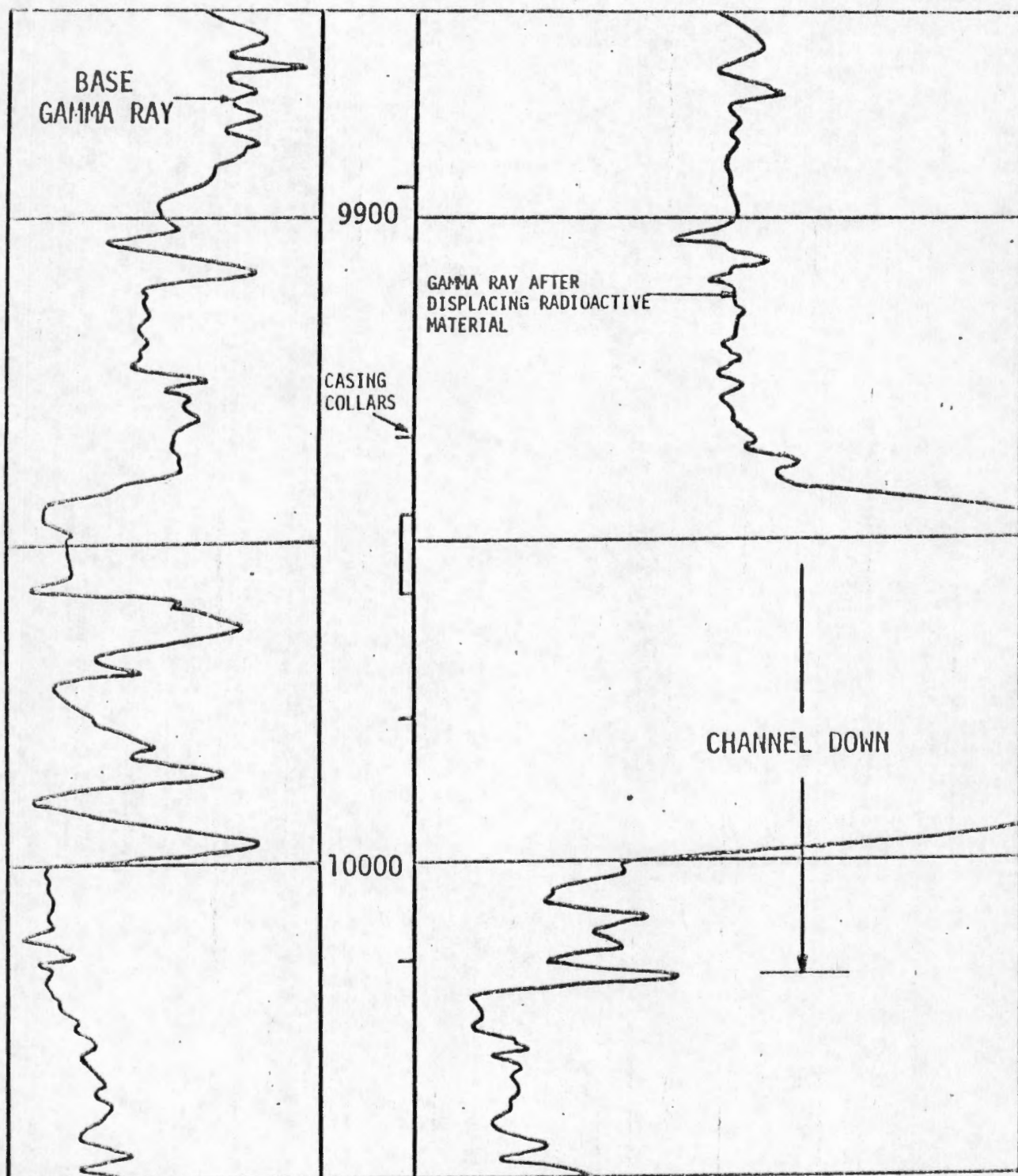


FIGURE 17  
GAMMA RAY LOG

### EJEMPLO 3

#### ANTECEDENTES

En la figura 18 se muestra el diagrama de un pozo que se acondicionó para inyectar agua, tanto por la tubería de producción como la de revestimiento. Por el espacio anular se lograban inyectar 375 bl/día y por la T.P. 310 bl/día.

#### OBJETIVO

Obtener un perfil de inyección.

#### OPERACION

Se tomaron registros de temperatura y trazador radioactivo.

#### INTERPRETACION

El trazador inmediatamente abajo del empaque detecta solo el gasto inyectado por T.P., sin embargo de 4950 - 4975 el trazador indica un gasto igual a la suma de lo inyectado por ambas ramas, lo anterior indica que el agua bombeada por la T.R. no se entra al intervalo 4902 - 4907 y se canaliza hacia abajo regresando a la T.T. a través de las perforaciones de 4943 - 4950 om., finalmente el agua deja la T.R. por el intervalo 4975 - 5001 om. para continuar canalizándose hasta 5015 om. (ver fig. 19).

# WELL SKETCH

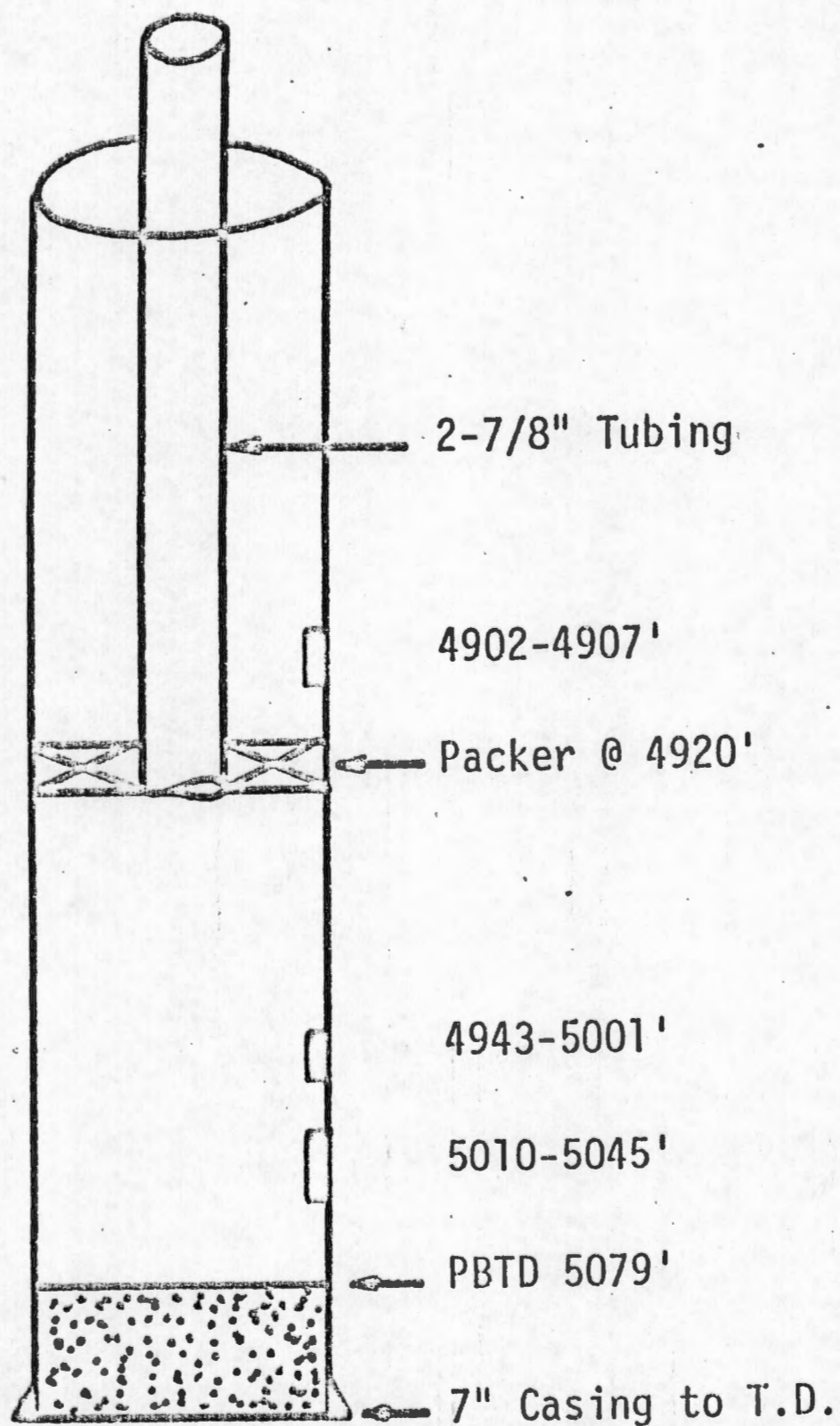


FIGURE 18

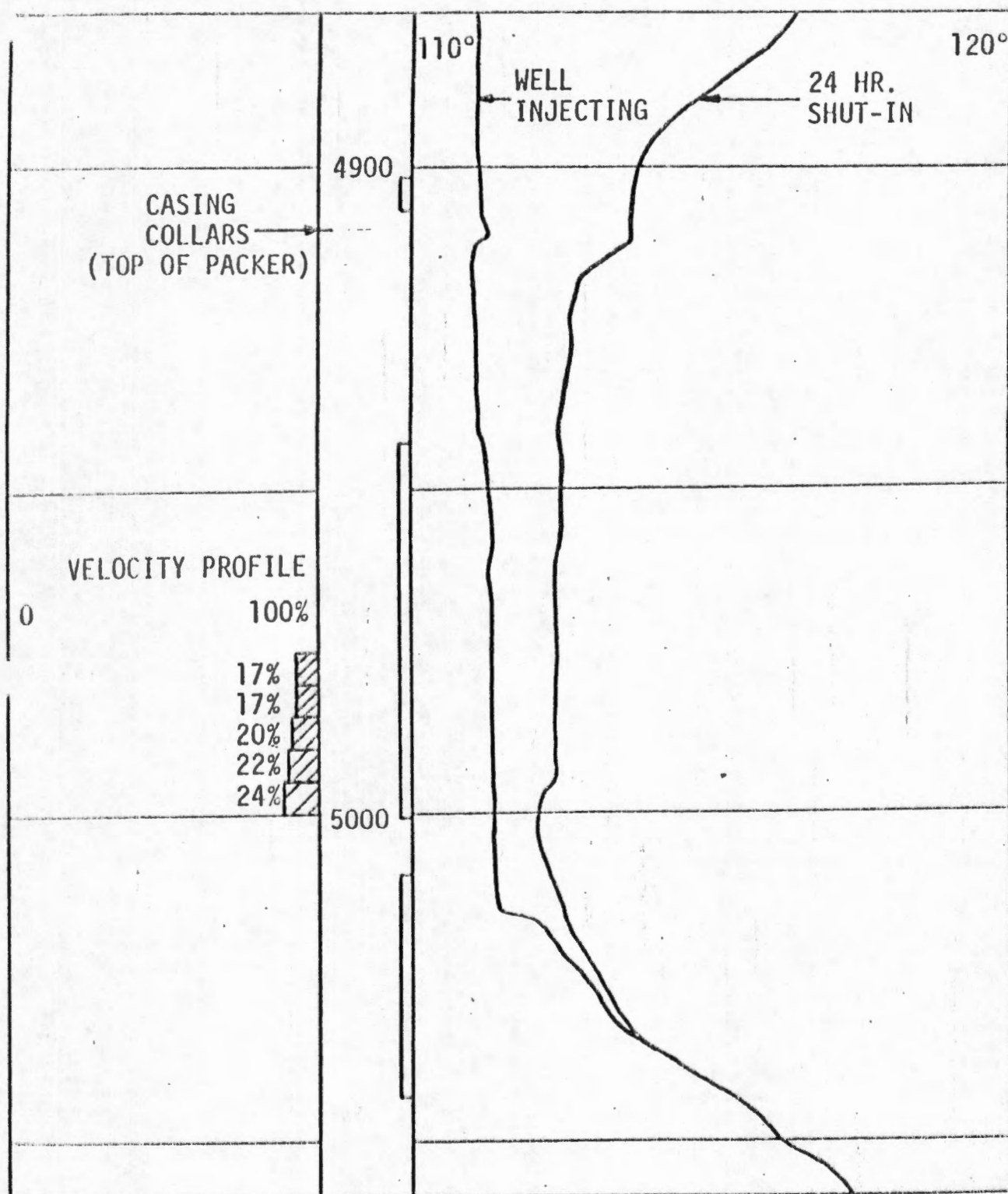


FIGURE 19  
TEMPERATURE SURVEY-VELOCITY PROFILE



## Ejemplo : 1.

Se efectuó una prueba de decremento de presión, a continuación se anotan los datos del pozo y de la prueba

$$h = 130 \text{ pies}$$

$$Bo = 1.14$$

$$rw = .25 \text{ pies}$$

$$\mu_o = 3.93 \text{ c.P.}$$

$$q_o = 348 \text{ bls/día}$$

$$C_t = 8.74 \times 10^{-6} \text{ (Psia)}^{-1}$$

$$Pi = 1154 \text{ psig}$$

$$\phi = .20$$

| t (hrs) | Pwf (Psig) | Pws-Pwf | t(hrs) | Pwf (Psig) | Pws-Pwf |
|---------|------------|---------|--------|------------|---------|
| .01     | 1144       | 10      | 1.0    | 960        | 194     |
| .02     | 1134       | 20      | 2.0    | 949        | 205     |
| .03     | 1124       | 30      | 4.0    | 940        | 214     |
| .04     | 1114       | 40      | 6.0    | 936        | 218     |
| .05     | 1104       | 50      | 10.0   | 932        | 222     |
| .08     | 1074       | 80      | 20.0   | 925        | 229     |
| .10     | 1054       | 100     | 30.0   | 921        | 233     |
| .20     | 998        | 177     | 40.0   | 918        | 236     |
| .4      | 977        | 177     |        |            |         |

## 1. Calcular :

- la constante de almacenamiento
- la permeabilidad  $K_o$
- el factor de daño  $S$

## 2. Estimar :

- el periodo en el que predominan los efectos de almacenamiento.
- el periodo en el que el comportamiento de la presión es afectado por el almacenamiento.
- el tiempo a partir del cual ya son despreciables los efectos de almacenamiento.

## Solución :

- de la gráfica log-log de la figura EJ-1 se ve que la pendiente unitaria se presenta hasta un  $t = .1 \text{ hrs}$ , teniéndose a este tiempo una diferencial de presión,  $p = 100 \text{ psi}$  de tal manera que la constante de almacenamiento, es:

$$\frac{o \text{ Bo } t}{24 \text{ P}} = \frac{348 + 1.14 + .1}{24 + 100} = .0165 \frac{\text{bls}}{\text{psi}}$$

- b) De la gráfica de la figura Ej.1.2 se puede observar que la pendiente de la curva en la región de flujo transitorio es de -22 psi/ciclo y la presión a una hora de flujo 956 psiG, así, aplicando las ecuaciones correspondientes se tiene que :

$$K_o = - \frac{162 \text{ o Bo Mo}}{mh} = \frac{162.6 \times 348 \times 1.14 \times 3.93}{22 \times 130}$$

$$K_o = 89 \text{ md}$$

$$\begin{aligned} c) \quad S &= 1.1513 \frac{(P_{wf})_{hr} - P_i}{m} - \log \frac{K}{\phi u t Y_w^2} + 3.2275 \\ &= 1.1513 \left( \frac{968 - 1154}{(-22)} \right) - \log \left[ \frac{89}{.2 \times 3.93 \times 8.74 \times 10^{-6} \times .25^2} \right] + 3.2275 \end{aligned}$$

$$S = 4.6$$

2. a) El tiempo en el que termina el predominio de los efectos de almacenamiento es, aproximadamente de 10 hrs según se observa en la gráfica log-log.
- b) De la gráfica semilog se deduce que el período es afectado por almacenamiento. Termina a un tiempo de flujo de 2 horas aproximadamente.
- c) Gráficamente se puede ver de la Fig.Ej.1.2 que el efecto de almacenamiento termina a las dos horas aproximadamente, analíticamente este tiempo se puede estimar con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} t &= (2000 + 12000 S) \text{ C}/(Kh/u) \\ &= \frac{(200000 + 12000 \times 4.6) \times .0165}{89 \times 130/3.93} \\ t &= 1.43 \text{ hrs} \end{aligned}$$

Ejemplo: 2

A continuación se anotan los datos de incremento de presión de un pozo pro

ductor de aceite bajo saturado, antes del cierre se tenía una producción estabilizada de 4900 bls/día, el tiempo de producción previo al cierre - fue de 310 hrs.

Prof. = 10 476 pies  
 $r_w$  = .354 pies  
 $t$  =  $22.6 \times 10^{-6}$  psia<sup>-1</sup>  
 $q_o$  = 4900 bls/día  
 $h$  = 482 pies  
 (Pfw)  $t = 0$  = 2761 psig

$M_o$  = .2 C.P.  
 $\phi$  = .09  
 $B_o$  = 1.55  
 $t_p$  = 310 hrs  
 $\bar{P}_i$  = 3342 psig

| t<br>(hrs) | $t_p + t$<br>(hrs) | $\frac{t_p + t}{t}$ | Pws<br>(Psig) | Pws - Pwf<br>(Psig) |
|------------|--------------------|---------------------|---------------|---------------------|
| 0.0        |                    |                     | 2761          | -                   |
| .10        | 310.10             | 3101                | 3057          | 296                 |
| .21        | 310.21             | 1477                | 3153          | 392                 |
| .31        | 310.31             | 1001                | 3234          | 473                 |
| .52        | 310.52             | 597                 | 3249          | 488                 |
| .63        | 310.63             | 493                 | 3256          | 495                 |
| .73        | 310.73             | 426                 | 3260          | 499                 |
| .84        | 310.84             | 370                 | 3263          | 502                 |
| .94        | 310.94             | 331                 | 3266          | 505                 |
| 1.05       | 311.05             | 296                 | 3267          | 506                 |
| 1.15       | 311.15             | 271                 | 3268          | 507                 |
| 1.36       | 311.36             | 229                 | 3271          | 510                 |
| 1.68       | 311.68             | 189                 | 3276          | 513                 |
| 1.99       | 311.99             | 157                 | 3276          | 515                 |
| 2.51       | 312.51             | 125                 | 3280          | 519                 |
| 3.04       | 313.04             | 103                 | 3283          | 522                 |
| 3.46       | 313.46             | 90.6                | 3286          | 525                 |
| 4.08       | 314.08             | 77.0                | 3289          | 528                 |
| 5.03       | 315.03             | 62.6                | 3293          | 532                 |
| 5.97       | 315.97             | 52.9                | 3297          | 536                 |
| 6.07       | 316.07             | 52.1                | 3297          | 536                 |
| 7.01       | 317.01             | 45.2                | 3300          | 539                 |

|       |        |      |      |     |
|-------|--------|------|------|-----|
| 8.06  | 318.06 | 39.5 | 3303 | 542 |
| 9.00  | 319.00 | 35.4 | 3305 | 544 |
| 10.05 | 320.05 | 31.8 | 3306 | 545 |
| 13.09 | 323.09 | 24.7 | 3310 | 549 |
| 16.02 | 326.02 | 20.4 | 3313 | 552 |
| 20.00 | 330.00 | 16.5 | 3317 | 556 |
| 26.07 | 336.07 | 12.9 | 3320 | 559 |
| 31.03 | 341.03 | 11.0 | 3322 | 561 |
| 34.98 | 344.98 | 9.9  | 3323 | 562 |
| 37.54 | 347.54 | 9.3  | 3323 | 562 |

1. Calcular

- la permeabilidad de la formación  $K_o$
- el factor de daño,  $S$
- la caída de presión correspondiente al daño.

2. Determinar la eficiencia de flujo la cual se define como el cociente del índice de productividad real al índice de productividad ideal.

3. Solución

- 1.a) de la gráfica de la figura EJ2-1 la pendiente,  $m$ , es de 40 psig/ciclo, de tal manera que la permeabilidad es:

$$K = \frac{162.6 \cdot q \cdot B \cdot \mu}{mh} = \frac{162.6 \times 4900 \times 1.55 \times .2}{40 \times 482} = 12.8 \text{ md}$$

$$b) \quad S = 1.1513 \frac{P_{ihr} - (P_{wf})_{t=0}}{m} - \log \frac{k}{t} + 3.2275$$

$$= 1.1513 \frac{3266 - 2761}{1} - \log \frac{12.8}{.09 \times .20 \times 22.6 \times 10^{-6} \times .354^2} + 3.227$$

$$S = 8.22$$



c) la caída de presión causada por el daño se puede estimar con la expresión siguiente :

$$P_s = \frac{141.2 \cdot q_{0.1} \cdot S}{K_h} = \frac{141.2 \cdot 4900 \cdot 1.55 \cdot .2}{12.8 \cdot 482} \cdot 8.22$$

$$P_s = 286 \text{ psi}$$

2. La eficiencia de flujo se define como la relación de los índices de productividad real e ideal.

$$E_f = \frac{J_{\text{real}}}{J_{\text{ideal}}} = \frac{\bar{P} - (P_{wf})_{t=0} - \Delta P_s}{\bar{P} - (P_{wf})_{t=0}}$$

$$= \frac{3342 - 2761 - 300}{3342 - 2761} = .48$$

la gráfica de la fig. EJ2-2 no muestra pendiente unitaria por lo que se concluye que los efectos de almacenamiento son insignificantes.

Ejemplo 3: en un pozo productor de gas se efectuó una prueba de incremento, se dispone de la siguiente información :

|                                   |                                 |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| h = 101.7 pies                    | T = 94.8°C                      |
| g = 5.450 mm pu <sup>3</sup> /dfa | S.G. = .567                     |
| Bg = .00596                       | Ø = .045                        |
| Z = .922                          | c t = .000245 psi <sup>-1</sup> |
| tp = 13063 hrs                    | r w = .3542 pies                |
| u g = .0178 c.P.                  |                                 |

| t (hrs) | $\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}$ | m(p) x 10 <sup>-6</sup> | t     | $\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}$ | m(p) x 10 <sup>-6</sup> |
|---------|-----------------------------------|-------------------------|-------|-----------------------------------|-------------------------|
| 0       | -                                 | 102.19                  | 7.25  | 1803                              | 433.83                  |
| .087    | 150150                            | 127.26                  | 7.75  | 1686                              | 455.03                  |
| .250    | 52253                             | 147.50                  | 8.75  | 1494                              | 463.71                  |
| .420    | 31103                             | 165.82                  | 9.25  | 1413                              | 474.32                  |
| .580    | 22253                             | 178.35                  | 10.75 | 1275                              | 491.67                  |
| .750    | 17418                             | 192.81                  | 10.75 | 1216                              | 499.38                  |
| .920    | 14200                             | 204.38                  | 11.25 | 1162                              | 506.13                  |
| 1.080   | 12096                             | 217.88                  | 11.75 | 1113                              | 509.99                  |
| 1.250   | 10451                             | 225.59                  | 12.25 | 1067                              | 515.71                  |

| $t$   | $\frac{t_p + \Delta p}{\Delta p}$ | $m(p) \times 10^6$ | $t$   | $\frac{t + \Delta t}{\Delta t}$ | $m(p) \times 10^6$ |
|-------|-----------------------------------|--------------------|-------|---------------------------------|--------------------|
| 1.420 | 9200                              | 236.19             | 12.75 | 1025                            | 525.41             |
| 1.750 | 7466                              | 252.58             | 13.25 | 987                             | 530.23             |
| 2.250 | 5807                              | 279.58             | 13.75 | 951                             | 537.94             |
| 2.75  | 4751                              | 299.82             | 14.25 | 918                             | 541.80             |
| 3.25  | 4020                              | 318.14             | 14.75 | 887                             | 545.66             |
| 3.75  | 3484                              | 339.35             | 15.25 | 858                             | 551.44             |
| 4.25  | 3075                              | 356.70             | 15.75 | 830                             | 554.33             |
| 4.75  | 2751                              | 369.23             | 16.25 | 805                             | 559.15             |
| 5.25  | 2489                              | 388.51             | 16.75 | 781                             | 564.94             |
| 5.75  | 2273                              | 400.88             | 17.25 | 758                             | 568.79             |
| 6.25  | 2091                              | 406.83             | 17.75 | 737                             | 572.65             |
| 6.75  | 1936                              | 425.15             | 18.25 | 717                             | 578.43             |
| 19.25 | 680                               | 595.79             | 73.25 | 179                             | 698.94             |
| 20.25 | 646                               | 599.64             | 76.25 | 172                             | 701.83             |
| 21.25 | 616                               | 608.32             | 82.25 | 160                             | 703.76             |
| 22.25 | 588                               | 615.07             | 85.25 | 154                             | 703.76             |
| 23.25 | 563                               | 618.92             | 88.25 | 149                             | 703.76             |
| 24.25 | 540                               | 622.78             | 93.25 | 141                             | 708.58             |
| 25.25 | 518                               | 626.64             |       |                                 |                    |
| 26.25 | 499                               | 631.46             |       |                                 |                    |
| 27.25 | 480                               | 636.28             |       |                                 |                    |
| 28.25 | 463                               | 640.13             |       |                                 |                    |
| 29.25 | 448                               | 644.95             |       |                                 |                    |
| 30.25 | 433                               | 647.85             |       |                                 |                    |
| 31.25 | 419                               | 649.77             |       |                                 |                    |
| 32.25 | 406                               | 653.63             |       |                                 |                    |
| 33.25 | 394                               | 655.56             |       |                                 |                    |
| 34.25 | 382                               | 658.45             |       |                                 |                    |
| 33.25 | 373                               | 660.33             |       |                                 |                    |
| 37.25 | 352                               | 665.20             |       |                                 |                    |
| 39.25 | 334                               | 674.24             |       |                                 |                    |
| 41.25 | 318                               | 676.77             |       |                                 |                    |
| 43.25 | 303                               | 679.66             |       |                                 |                    |
| 45.25 | 290                               | 680.62             |       |                                 |                    |
| 47.25 | 277                               | 683.52             |       |                                 |                    |
| 49.25 | 266                               | 686.41             |       |                                 |                    |
| 52.25 | 251                               | 688.34             |       |                                 |                    |

utilizando el concepto de potencial de gas real, determinar

- la permeabilidad de la formación
- el factor de daño
- la caída de presión correspondiente al factor de daño total

de la gráfica de la fig. EJ3-1 la pendiente,  $m$ , de la sección recta es :  $70.08 \times 10^6$  (psia<sup>2</sup>/ciclo) por tanto la permeabilidad será:

$$K = \frac{1.632 \times 10^6 q_{est}}{hm} = \frac{1.632 \times 10^6 * 5.45 * 662.64}{70.08 * 10^6 * 101.7}$$

$$K = .83 \text{ md}$$

el factor de daño se puede estimar con la expresión siguiente

$$S = 1.1513 \frac{570.47 - 102.19}{70} - \log \frac{.83}{.45 * .0178 * 2645 \times 10^{-4} * (.3542)^2} + 3.23$$

$$S = 3.39$$

El potencial real correspondiente al daño es:

$$\begin{aligned} m(P)s &= .869 \text{ ms} = .869 * 70 \times 10^6 * 3.39 \\ &= 206 \times 10^6 \text{ (Psi}^2\text{/C.P.)} \end{aligned}$$

- 2. CARACTERIZACION DE FLUIDOS E HIDRAULICA
  - 2.1 REOLOGIA DE FLUIDOS
    - 2.11 FLUIDOS Y MODELOS REOLOGICOS
    - 2.12 REGIMENES DE FLUJO
  - 2.2 CALCULO HIDRAULICO
    - 2.21 SIMULADOR DE CIRCULACION DE FLUIDOS  
( PROGRAMOTECA )
  - 2.3 DESARROLLO DE METODOS PRACTICOS PARA EL CONTROL  
DE LA HIDRAULICA DURANTE LA REPARACION DE LOS  
POZOS



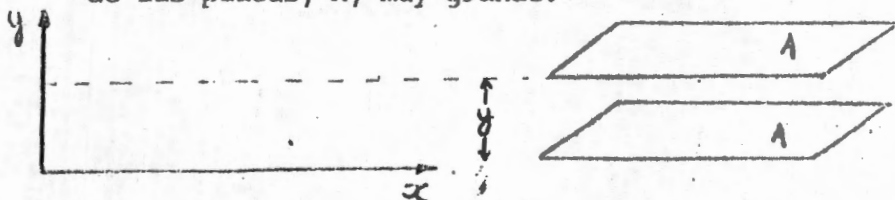
## 2.1 REOLOGIA DE FLUIDOS.

**DEFINICION.** Según J.R. VAN WAZER la Reología es la Ciencia que estudia la deformación y el flujo de materia.

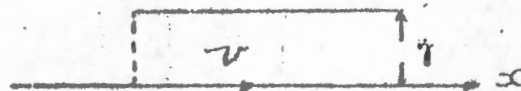
**FLUIDO.** Es aquella sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo, esta sustancia no tiende a recuperar su posición original al suspender el estado de esfuerzo aplicado.

### VISCOSIDAD DE UN FLUIDO.

Considerese un fluido contenido entre 2 placas paralelas separadas por una distancia muy pequeña, y siendo el área de las placas,  $A$ , muy grande.



- a) A un tiempo  $t < 0$  el sistema está en equilibrio
- b) A un tiempo  $t = 0$  se imprime una velocidad  $V = \text{cte}$  a la placa inferior.

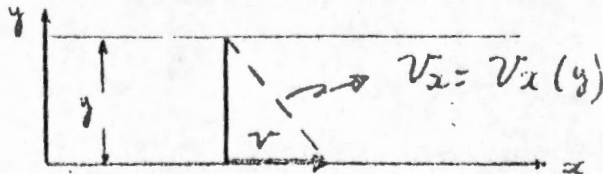


- c) A tiempos pequeños tendremos la siguiente distribución de velocidades.



De acuerdo al diagrama a tiempos cortos la velocidad es función de la distancia entre las placas,  $y$ , y del tiempo,  $t$ .

- d) A tiempos largos se tendrá una distribución uniforme de velocidades.



En condiciones de régimen permanente o sea a tiempos grandes el perfil de velocidades sólo es función de la distancia entre las placas,  $y$ .

Para mantener el perfil de velocidades estable es necesario aplicar una fuerza,  $F$ , por unidad de área,  $A$ , tal que:

$$\frac{F}{A} = -\mu \frac{V}{y} \quad (1)$$

donde:

F= Fuerza necesaria para mantener el perfil estable.

A= Area de las placas.

V= Velocidad aplicada a la placa inferior.

Y= Distancia que separa las placas.

$\mu$ = Constante de proporcionalidad, la viscosidad dinámica del fluido en este caso.

Si la distancia de nuestro sistema se vuelve infinitesimal o sea muy pequeño entonces.

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dv_x}{dy} \quad (2)$$

La ecuación (2) es llamada la ecuación general de la Viscosidad de NEWTON donde:

$\tau_{yx}$  - es el esfuerzo cortante aplicado al fluido -  
El 2º Subíndice de  $\tau$  representa la dirección del flujo (x), Y, el primer Subíndice representa la dirección en la que la cantidad de movimiento se transfiere (y).

#### UNIDADES DE LA VISCOSIDAD.

##### a) SISTEMA Cgs.

De acuerdo con la ecuación 2 si:

$$V_x = \text{cm/seg.}$$

$$Y = \text{cm.}$$

$$\tau_{yx} = \frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2} = \frac{\text{grm-cm}}{\text{seg}^2 \cdot \text{cm}^2}$$

$$\mu = \frac{\tau_{yx} \cdot y}{\frac{dv_x}{dy}} = \frac{\frac{\text{dinas/cm}^2}{\text{cm/seg}}}{\frac{1}{\text{cm}}} = \frac{\text{grm.} \cdot \frac{\text{cm.}}{\text{seg.}^2} \cdot \frac{1}{\text{cm.}^2}}{\frac{1}{\text{seg.}}}$$

$$\mu = \frac{\text{grm.}}{\text{cm-sec.}} = \text{Poise}$$

Como el Poise es muy grande en su lugar se utiliza el Centipoise.

$$1 \text{ c.p.} = 10^{-2} \text{ Poise.}$$

En el sistema Inglés la Viscosidad  $\mu$  se expresa en:

$$\mu = \frac{\text{lbm}}{\text{pie-sec.}}$$

Si el esfuerzo de corte  $\tau_{yx}$  se expresa en unidades de fuerza entre Area entonces la ecuación (2).

Se debe expresar como sigue:

$$\tau_{yx} = -\frac{\mu}{gc} \frac{dv_x}{dy} \quad (3)$$

donde:

$g_c$  = Constante de transformación de unidades.

$$g_c = \frac{M \cdot L}{F \cdot t^2}$$

En el sistema Ingles  $g_c = 32.2 \frac{\text{lbm} \cdot \text{pie}}{\text{lbf} \cdot \text{seg}^2}$

En el sistema c.g.s.  $g_c = 981 \frac{\text{gm} \cdot \text{cm.}}{\text{grf} \cdot \text{seg.}^2}$

En el sistema MKS  $g_c = 9.81 \frac{\text{Kgm} \cdot \text{m.}}{\text{Kgf} \cdot \text{seg.}^2}$

Otra forma de expresar la Viscosidad es la Viscosidad Cinemática,  $\nu$ , definida como la relación de la Viscosidad dinámica entre la densidad absoluta.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

UNIDADES:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\frac{\text{gm.}}{\text{cm.} \cdot \text{seg.}}}{\frac{\text{gm.}}{\text{cm.}^3}} = \frac{\text{cm.}^2}{\text{seg.}} = \text{STOKE}$$

Como el STOKE es muy grande se utiliza el Centistoke.

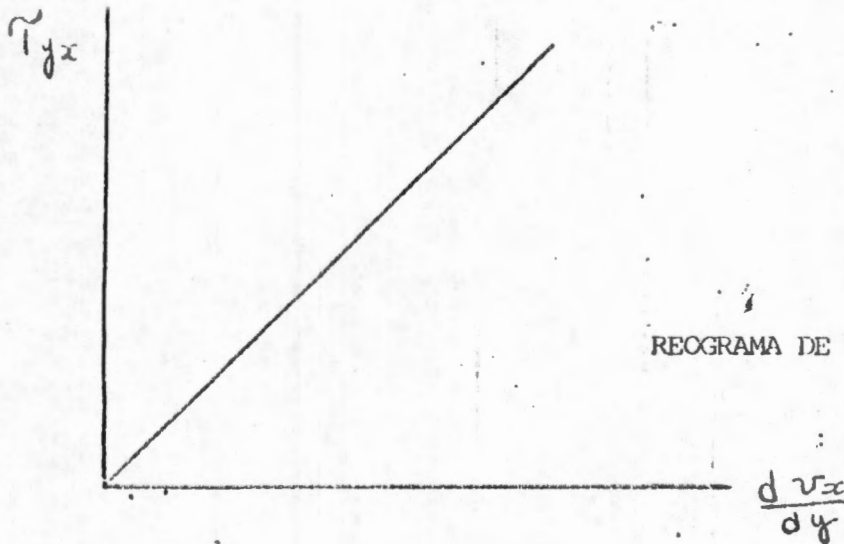
$$1 \text{ C.S.} = 10^{-2} \text{ STOKE.}$$

## 2.11 FLUIDOS Y MODELOS REOLOGICOS.

NEWTONIANOS: Son aquellos fluidos cuyo comportamiento obedece a la ecuación de la viscosidad de Newton (EC. 2) (o sea que el esfuerzo de corte es proporcional a la velocidad de corte.)

FLUIDOS.

NO NEWTONIANOS: Son aquellos fluidos que no pueden describirse con la ecuación 2.



FLUIDOS NO NEWTONIANOS.

Estos fluidos exhiben un comportamiento complejo en forma tal que la relación de esfuerzo cortante a la velocidad de corte no es constante, y en ocasiones no es tampoco unívoca ya que puede ser también función del tiempo.

CLASIFICACION DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS.

- a) Fluidos no newtonianos independientes del tiempo.
- b) Fluidos no newtonianos dependientes del tiempo.
- c) Fluidos viscoelásticos.

a) FLUIDOS NO NEWTONIANOS INDEPENDIENTES DEL TIEMPO.

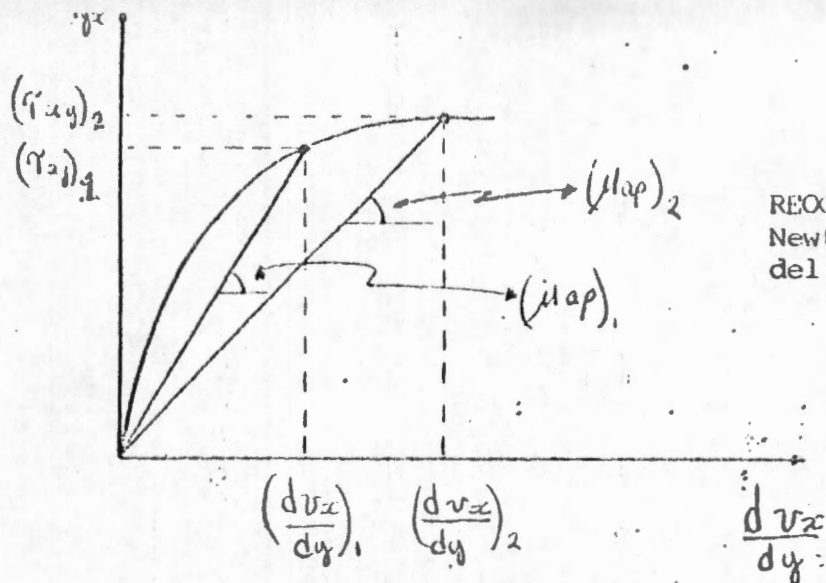
Su característica fundamental es la de exhibir una Viscosidad aparente que es función del estado de deformación (es decir, de la magnitud del esfuerzo aplicado), pero no depende de la historia de deformación o del tiempo que dicha deformación dure. Como la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte no es de proporcionalidad constante se debe definir una "Viscosidad aparente" tal que para cada par de valores

$$\left( \tau_{xy}, \frac{dv_x}{dy} \right)$$

(Ver figura inferior) se tiene:

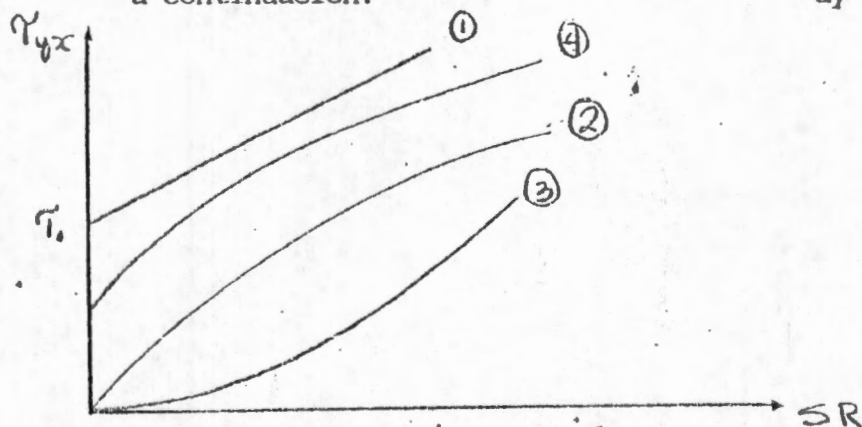
$$\mu_{ap} = \frac{\tau_{xy}}{\frac{dv_x}{dy}} \quad (5)$$





REOGRAMA de un fluido no Newtoniano independiente del tiempo.

Una clasificación de los fluidos no-newtonianos independientes del tiempo puede hacerse con base en un diagrama de esfuerzo - de corte,  $\tau_{xy}$ , contra velocidad de corte,  $\frac{dv_x}{dy}$ , como se muestra a continuación.



$$\frac{dv_x}{dy} = SR$$

- 1.- Fluidos plásticos de Bingham.
- 2.- Fluidos pseudoplásticos.
- 3.- Fluidos dilatantes.
- 4.- Fluidos pseudoplásticos con punto de cedencia.

#### FLUIDOS PLASTICOS DE BINGHAM.

En estos fluidos es necesario alcanzar un esfuerzo cortante mínimo por debajo del cual no existe flujo. A  $\tau_0$  se le denota el esfuerzo o punto de cedencia y es característico de cada fluido. La ecuación constitutiva para este tipo de fluidos es:

$$\tau_{yx} = \tau_0 + \mu \frac{dv_x}{dy} \quad (6)$$

#### FLUIDOS PSEUDOPLASTICOS.

La característica principal de estos fluidos es que su viscosidad aparente disminuye con incrementos en la velocidad de corte, SR.

La ecuación mas sencilla que representa estos fluidos es la. Siguiente:

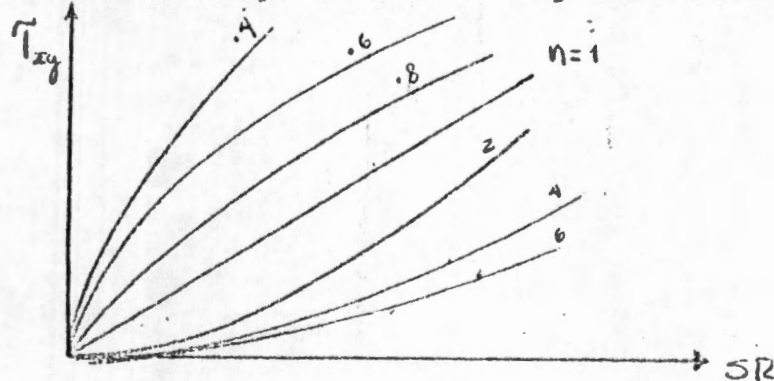
$$\tau_{yx} = - K \left( \frac{dv_x}{dy} \right)^n \quad (7)$$

La ecuación (7) se llama ecuación de ley de potencias o de - OSTWALD de Waele. Generalmente todas las soluciones poliméricas caen dentro de estos fluidos.

Parámetro de la ec.7

K = Índice de consistencia c.p.  $\text{seg}^{n-1}$  nos da idea de que - tan viscoso es un fluido.

N = Índice de comportamiento de flujo (adimensional).



Puede verse de la figura anterior que se  $N=1$  si Tiene el comportamiento newtoniano.

Si  $N < 1$  se tiene comportamiento pseudoplástico.

si  $N > 1$  se tiene un fluido Dilatante.

MODELOS REOLOGICOS PARA LOS FLUIDOS PSEUDOPLASTICOS.

LOS MODELOS PARA ESTE TIPO DE FLUIDOS SE DIVIDEN EN DOS:

1.-Modelos de 2 Parámetros

2.-Modelos de mas de 2 parametros

De los modelos de dos parámetros el mas sencillo y mas utilizado es el ya mencionado modelo de ley de potencias.

$$\tau_{yx} = - K (SR)^n \quad (7)$$

Esta es una ecuación empírica donde es necesario ajustar los parámetros K y N utilizando los datos de laboratorio disponibles.

La viscosidad aparente,  $\mu_{ap}$ , por definición es :

$$\mu_{ap} = \frac{\tau_{xy}}{SR}$$

Sust. el valor de  $\tau_{xy}$  se tiene que

$$\mu_{ap} = - K (SR)^{n-1} \quad (8)$$

Modelos de mas de dos parámetros.

MODELO DE ELLIS.

Su ecuación característica es la siguiente:

$$SR = \left( \frac{1}{\mu_0} \tau_{yx} + c (\tau_{yx})^\alpha \right) \quad (9)$$

De la ecuación 9 se puede ver que si,  $c = 0$

Se tendrá la ley de newton de la Viscosidad.

Cuando  $\mu_0$  es muy grande el primer término es la ecuación (9) es muy pequeño y puede despreciarse en comparación con el 2º miembro y por tanto el modelo de ELLIS se convierte en el modelo de la ley de potencias.

En el modelo de ELLIS los parámetros de ajuste Son:  $\mu_0, \alpha, c$ .

#### MODELO DE SISCO.

La ecuación característica de este modelo es:

$$\tau_{yx} = \frac{a SR}{\textcircled{1}} + \frac{b SR^c}{\textcircled{2}} \quad (10)$$

1.- Parte newtoniana.

2.- Parte no-newtoniana.

Esta ecuación se basa en la hipótesis de que los esfuerzos originales por los conceptos newtonianos y no newtoniano son aditivos. Los parámetros de ajuste serán:  $a, b, c$ .  
La viscosidad aparente en este caso es:

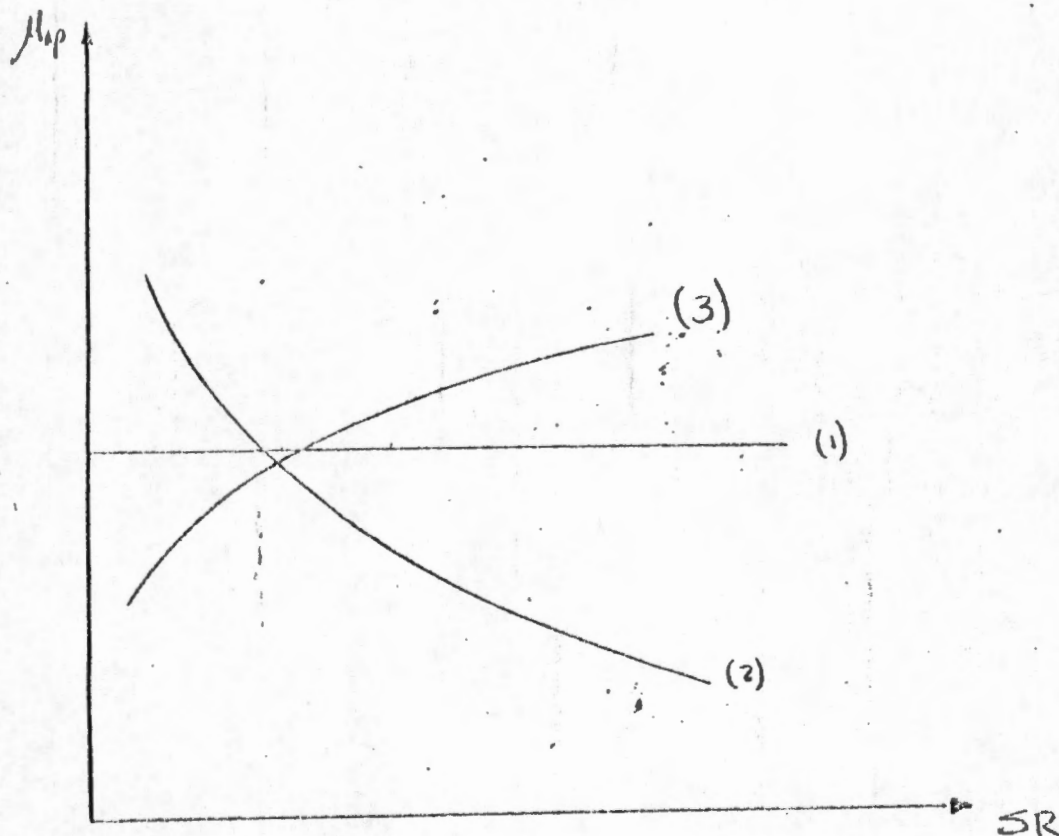
$$\begin{aligned} \mu_{ap} &= \frac{\tau_{yx}}{SR} = \frac{a (SR) + b(SR)^c}{SR} \\ \mu_{ap} &= (b SR^{c-1} + a) \end{aligned} \quad (11)$$

#### FLUIDOS DILATANTES.

Este tipo de comportamiento es raro, se caracteriza por un incremento en la viscosidad aparente al aumentar la velocidad de corte.

Ejemplo de este tipo de fluidos son algunas emulsiones tanto de aceite en agua como de agua en aceite.

Un resumen de los fluidos no newtonianos independientes del tiempo se da en la figura siguiente:



- 1.- Fluidos Newtonianos y plástico de Bingham.
- 2.- Fluidos Pseudoplásticos ya sea con punto de cedencia o sin el.
- 3.- Fluidos dilatantes o dilatantes con punto de cedencia.

#### FLUIDOS NO NEWTONIANOS DEPENDIENTES DEL TIEMPO.

En este tipo de fluidos el comportamiento es una función multivaluada de la velocidad de corte ya que su magnitud en un momento dado dependerá tanto de la historia de deformación como también de la magnitud del esfuerzo cortante.

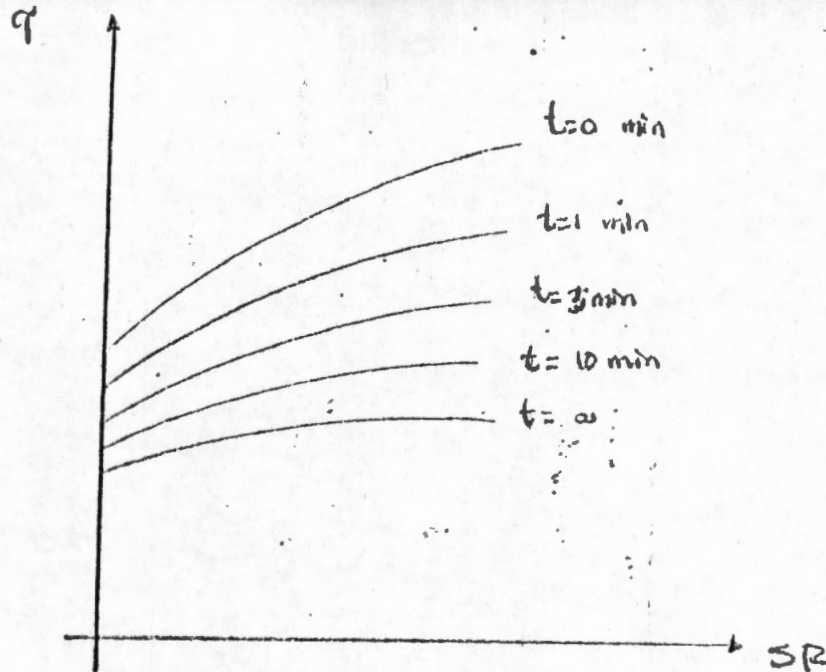
De este tipo de fluido existen dos clasificaciones:

- a) Fluidos Tixotrópicos.
- b) Reopécticos.

#### FLUIDOS TIXOTROPICOS.

De los fluidos no newtonianos dependientes del tiempo los mas abundantes son los Tixotrópicos. Su característica principal es de que su viscosidad aparente disminuye con el incremento en velocidad de corte o bien con el transcurso del tiempo, aun cuando la velocidad de corte se mantenga constante, se ha reportado este comportamiento en algunos crudos, por ejemplo; en el yacimiento ALGYO (HUNGRIA) y en los aceites del campo PAMBINA (EE.UU). Este comportamiento se atribuye a la presencia de componentes asfaltenos o parafínicos.



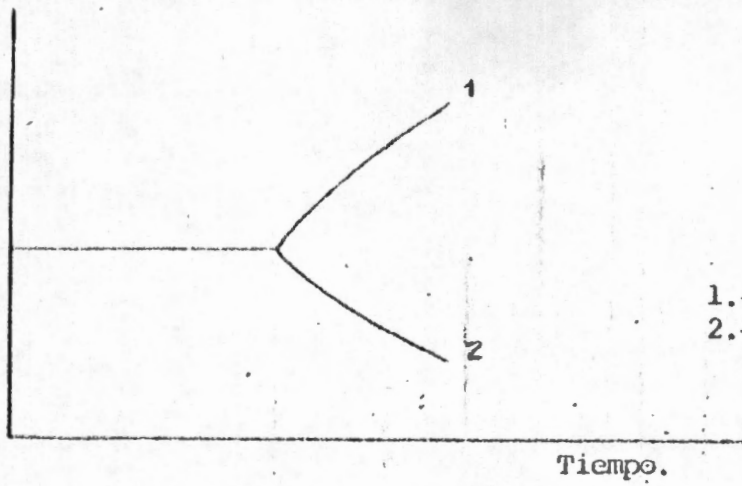


Reograma de un fluido  
TIXOTROPICO.

#### FLUIDOS REOPECTICOS.

Estos fluidos exhiben incremento en su  $\mu_{ap}$ . ya sea con incrementos en, SR, o bien con incrementos del tiempo cuando,  $SR = cte$ . su ocurrencia en la naturaleza son menos comunes. - ejm. Suspensiones de yeso en agua.

En la siguiente figura se resume el comportamiento de los fluidos no newtonianos dependientes del tiempo.



- 1.- Fluidos reopéticos.
- 2.- Fluidos Tixotrópicos.

De estos fluidos se puede mencionar además que una vez suspendida la deformación, el material tiende a recuperar su viscosidad aparente original después de cierto tiempo.

## EJEMPLOS DE CARACTERIZACION DE FLUIDOS

(1)

Un fluido bentonítico exhibe un comportamiento que corresponde a un plástico de Bingham. ( Un viscosímetro rotacional Fann 50 ) A partir de los datos registrados determine el punto de cadencia  $\tau_0$  y la viscosidad del fluido.

| $\tau$ (lbf/100 pm <sup>2</sup> ) | $\left(\frac{dv}{dy}\right)$ Seg-1 |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| 137 (146.17)                      | 850                                |
| 118 (1259.90)                     | 680                                |
| 98 (104.56)                       | 511                                |
| 80 (85.36)                        | 340                                |
| 60 (64.02)                        | 167                                |

1.- Se grafica  $\tau$  contra  $\left(\frac{dv}{dy}\right)$

2.- Se obtiene la pendiente (la viscosidad)

$$m = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{\text{lbf}/100 \text{ pm}^2}{\frac{\text{seg}}{100 \text{ pm}^2}}$$

3.- Extrapolando la recta a  $\frac{dv}{dy} = 0$  se obtiene el punto de cadencia  $\tau_0$ .

(2)

Una suspensión arcillosa exhibe un comportamiento que corresponde a un plástico de Bingham en un viscosímetro capilar. A partir de los datos anotados a continuación determine el punto de cadencia  $\tau_0$  y la viscosidad del fluido ( $\mu$ ).

| $Q$ (cm <sup>3</sup> /seg)<br>$\times 10^{-6}$ | $\tau_w$ (dinas/cm <sup>2</sup> )<br>$\times 10^{-3}$ | $\frac{dv}{dy} = \frac{4Q}{\tau R^3}$ (seg-1) $\times 10^{-2}$ |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 16.1                                           | 110.0                                                 | 1.77                                                           |
| 32.3                                           | 120.0                                                 | 3.55                                                           |
| 78.5                                           | 150.0                                                 | 8.63                                                           |
| 116.0                                          | 170.0                                                 | 12.75                                                          |
| 159.0                                          | 175.0                                                 | 17.48                                                          |
| 215.0                                          | 210.0                                                 | 23.64                                                          |

Esfuerzo de corte  $\text{dinas/cm}^2 \times 10^3$

0.5

1.0

1.5

2.0

2.5

3.0

$\mu_p = \frac{1.7}{0.22} = 7.73$

$\mu_s = \frac{1.7}{0.22} = 7.73$

$\mu_s = \frac{1.7}{0.22} = 7.73$

$\mu_s = \frac{1.7}{0.22} = 7.73$

$\mu_s = \frac{1.7}{0.22} = 7.73$

$\mu_s = \frac{1.7}{0.22} = 7.73$

$\mu_s = \frac{1.7}{0.22} = 7.73$

GRÁFICA 7-2

Velocidad de corte  $\text{seg}^{-1} \times 10^{-2}$

0

2

4

6

8

10

12

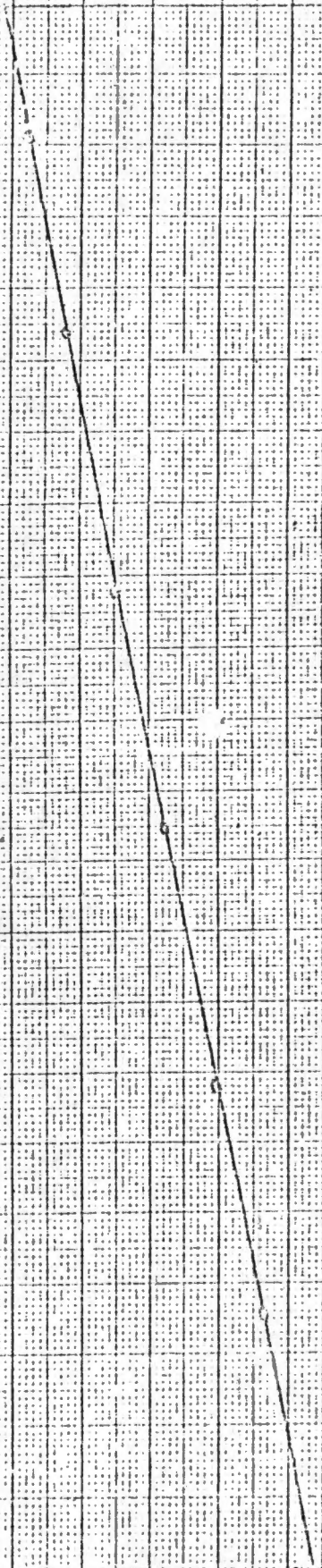
14

16

18

20

22





Una emulsión directa usada como fluido de reparación de pozos en el distrito de Poza Rica, dió los siguientes datos al evaluarse en un viscosímetro de rotación continua.

| $\omega$ (rpm) | lecturas |
|----------------|----------|
| 600            | 200      |
| 500            | 195      |
| 400            | 182      |
| 300            | 165      |
| 200            | 138      |
| 100            | 99       |
| 6              | 22       |
| 3              | 15       |

Nota:  $\frac{dv}{dy} = 1.7 \omega ; \frac{\text{lb}_f}{100\text{pm}^2} = 1.067 \times \text{lecturas} - \text{fann}$

a) ¿A que modelo reológico responde este fluido?

b) Calcule los valores característicos según el tipo de fluido que resulte ser.

NOTA: Resolver por ecuaciones simultaneas.

$$K = \left( \frac{\text{lb}_f}{100 \text{ pm}^2} \text{ seg}^n \right)$$

En el flujo monofásico sólo se presentan 2 patrones de flujo laminar o turbulento.

- a. En flujo laminar el movimiento es paralelo a las paredes del conducto, las partículas se mueven en línea recta o curvando ligeramente. En flujo laminar la fuerza para mover el fluido se incrementa al incrementar se la velocidad y viscosidad.
- b. En flujo turbulento el fluido se desplaza moviendo en forma atropellada y creando remolinos, las partículas se mueven sin una tendencia y en forma caótica.

El fluido tiende a ser turbulento cuando el flujo es rápido o cuando el fluido tiene baja viscosidad.

En flujo turbulento la fuerza requerida para mover el fluido se incrementa linealmente con la densidad y como el cuadrado de la velocidad de flujo.

- c. Velocidad de transición. A medida que la velocidad en flujo laminar es incrementada, el flujo, en un punto en forma repentina cambiará a turbulento, si la velocidad disminuye, el flujo cambiara a su carácter de laminar, la velocidad. Donde se presenta el cambio de régimen de flujo se llama Velocidad de Transición, la cual es gobernada por la influencia de las fuerzas viscosas y las fuerzas de inercia. En flujo laminar dominan las fuerzas viscosas, mientras que en turbulento las fuerzas de inercia son más importantes. El cambio entre laminar y turbulento ocurre porque las fuerzas de inercia varían como el cuadrado de la velocidad, mientras que las fuerzas viscosas varían solamente en forma lineal.

con la velocidad de flujo.

La relación de fuerzas de inercia a las fuerzas viscosas es lo que se llama número de Reynolds; el cual, si las unidades son consistentes, está definido como:

$$NRe = \frac{DV\rho}{\mu} \quad 2.1$$

Donde:  $D$  = Diámetro de la tubería.

$V$  = Velocidad de flujo.

$\rho$  = Densidad del fluido.

$\mu$  = Viscosidad del fluido.

## 2.2 Cálculo Hidráulico

### 2.2.1 Simulador de Circulación de Fluidos (Ver Programoteca).

## CONTENIDO

|                                                       | PAG. |
|-------------------------------------------------------|------|
| INTRODUCCION                                          | 1    |
| DESARROLLO DEL SIMULADOR DE LA CIRCULACION DE UN POZO | 3    |
| VALIDACION DEL SIMULADOR MEDIANTE PRUEBAS DE CAMPO    | 6    |
| DESARROLLO DE PROCEDIMIENTOS PRACTICOS                | 9    |
| Cálculo de la profundidad máxima de circulación       | 9    |
| Determinación de la presión requerida para circular   | 14   |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES                        | 17   |
| REFERENCIAS                                           | 18   |
| NOMENCLATURA                                          | 19   |
| TABLAS Y FIGURAS                                      | 20   |



**Desarrollo de Métodos Prácticos para el  
control de la Hidráulica durante la  
Reparación de los Pozos.**

## INTRODUCCION

En las operaciones que se realizan para la reparación y terminación de pozos petroleros, es esencial conocer precisamente las condiciones de circulación. No solamente para operar eficientemente, sino para prevenir -- problemas mecánicos, tales como el atrapamiento, desprendimiento o rotura de la sarta de trabajo, los cuales generalmente conducen a largas y costosas operaciones de pesca. Esta necesidad se ha agudizado en algunos pozos perforados recientemente a profundidades mayores de 6000 m. en la Zona Sureste, en los cuales se han instalado tuberías cortas de diámetro -- reducido ( 4 1/2" ) y gran longitud ( 3000 m. ). Tales condiciones desfavorables incrementan el riesgo de que se presenten problemas y cuando estos ocurren, los magnifican. La operación en estos pozos se debe hacer -- con pleno conocimiento de causa, estableciendo cuidadosamente las condiciones de circulación y observando cualquier cambio en las mismas para -- diagnosticar alguna condición problemática.

Para lograr lo anterior, ésto es, un control efectivo de la circulación -- se debe disponer al menos de lo siguiente: (a) un fluido de circulación -- adecuado; (b) un método práctico razonablemente exacto, para predecir las caídas de presión en el sistema; (c) una sarta de trabajo apropiada; y -- (d) conocimiento de las limitaciones del equipo. En tanto no se satisfagan estos requisitos, no se puede llevar a cabo el control y mucho menos -- optimizar las condiciones hidráulicas.

En este trabajo se describen las acciones que se han llevado a cabo en el -- área de Reparación y Terminación de Pozos a fin de satisfacer los puntos -- (b) y (d) mencionados anteriormente. Las actividades en los puntos (a) -- y (c) se reportan en otros trabajos. (1), (2)\*

Como base del desarrollo de los procedimientos prácticos se presenta ---

---

Referencias al final.

un simulador de la circulación en el pozo, el cual se validó mediante--  
pruebas de campo en pozos con diferentes fluidos.

Los procedimientos de análisis que se presentan nos permiten determinar  
la profundidad máxima de operación desde el punto de vista hidráulico,--  
así como la presión de circulación esperada a otras profundidades. Para  
facilitar su aplicación en el campo, estos procedimientos se presentan -  
en forma gráfica.

## DESARROLLO DEL SIMULADOR DE LA CIRCULACION EN UN POZO

Para la predicción rápida y precisa de las caídas de presión en el sistema de circulación, es necesario disponer de un programa de cómputo que contenga los diferentes modelos reológicos de los fluidos de circulación. Aún cuando existe una gran cantidad de estos programas (3), (4), ninguno de ellos satisface todas las características deseables de un programa de este tipo. Estas son:

- (a) Exacto. Los modelos reológicos deben tener la facilidad de ajustarse para reproducir los resultados de campo.
- (b) Flexible. Esto es, que maneje circulación directa o inversa para cualquier tipo de sarta y estado mecánico del pozo.
- (c) Fácil de usar. De preferencia interactivo, requiriendo solamente de datos de campo para su operación.
- (d) Completo. Debe incluir la bomba de lodos con su comportamiento real; manejar las pérdidas de presión en el molino o barrena; y calcular tiempos de circulación y velocidad de asentamiento de los recortes.
- (e) Fácil de interpretar. Los resultados deben ser autoexplicables y resumidos o detallados de acuerdo a las necesidades.

Con estas características en mente, se desarrolló un programa de cómputo conversacional el cual ya se está aplicando en las diferentes áreas de trabajo. (5) El programa maneja fluidos Newtonianos o no-Newtonianos y de éstos últimos los que siguen el comportamiento de Plásticos Bingham o pseudo plástico. Hasta ahora, con una excepción, hemos encontrado que nuestros fluidos siguen el comportamiento de alguno de estos modelos. El procedimiento para el cálculo de la pérdida de presión en la barrena o en el molino y de la velocidad de asentamiento de los recortes, se tomaron de la referencia (6) y se validaron con datos del mismo libro.

La información necesaria para correr el programa se introduce en forma interactiva y se valida parcialmente. En la Fig. 1 se muestra esta



información, la cual consiste de lo siguiente:

- (a) Estado mecánico del pozo (datos 2 a 4).
- (b) Características de la barrena o molino (dato 5).
- (c) Características del fluido y la tubería (datos 6 y 7).
- (d) Bomba de lodos y eficiencia volumétrica de la misma (dato 8).
- (e) Condiciones de flujo (dato 9).

Las características de la bomba están contenidas internamente en el programa y sólo se selecciona el modelo de la misma. Esta información, es el resultado de una serie de pruebas de campo realizadas para cada modelo de las bombas disponibles en Reparación de Pozos. En estas pruebas se midieron las eficiencias mecánica y volumétrica y la potencia máxima.

Respecto a las condiciones de flujo, se selecciona el tipo de circulación, la contrapresión y los gastos a analizar.

Antes de proceder al cálculo se tiene la opción de desplegar la información y/o cambiar algún dato o todos ellos. Asimismo al finalizar algún cálculo se presenta la misma opción, de manera que se pueden analizar fácilmente y rápidamente diferentes alternativas de circulación en un pozo.

Los resultados se presentan en dos grupos. En el primero se despliegan las características geométricas del pozo, indicando para cada sección, los diámetros de las tuberías, áreas de flujo y capacidades. El segundo agrupamiento de resultados se muestra en la Fig. 2. Básicamente consiste de:

- (a) Presiones de fondo y superficie.
- (b) Tiempos de circulación y atraso\*.
- (c) Caída de presión en el molino o barrena.
- (d) Potencia usada por la bomba, diámetros del pistón y número de embolados por minuto.
- (e) Pérdidas de presión, por fricción e hidrostática, en cada sección de tubería.

---

El tiempo de atraso es el tiempo necesario para que los recorten alcancen la superficie.

Algunos de estos datos se despliegan por excepción. El tiempo de atraso sólo se muestra si se tiene barrena o molino. Los resultados en (e) se omiten cuando se pide una impresión resumida en su lugar se despliegan las velocidades mínimas, tanto en la tubería como en el espacio anular. También se señala cuando la bomba no tiene potencia suficiente -- para entregar el gasto a la presión de circulación.

Este programa se implantó y se encuentra funcionando como parte de la Programoteca de Reparación y Terminación de Pozos y puede ser accésado a través de cualquier terminal del sistema INFONET.

La validación del programa en cuanto a las ecuaciones usadas para predecir la caída de presión en la tubería, espacio anular y barrena, se realizó mediante una comparación con los resultados publicados en la referencia 6. Estos fueron prácticamente los mismos.

## VALIDACION DEL SIMULADOR MEDIANTE PRUEBAS DE CAMPO

Una vez que se tuvo el programa funcionando y validado en cuanto a las ecuaciones de los modelos de flujo, se procedió a la validación con resultados de pruebas de campo. Este proceso consiste en realizar pruebas de circulación en pozos con los fluidos comunmente usados, en las cuales se registra la presión, tanto en el fondo como en la superficie, correspondiente a diferentes ritmos de circulación. Simultáneamente se determinan las propiedades reológicas del fluido. Mediante una comparación de las caídas de presión medidas, con las calculadas por el simulador, es posible, en la mayoría de los casos, determinar el modelo reológico del fluido y el valor de los parámetros de ajuste.

Al realizar esta validación, el simulador puede usarse, con un alto grado de confianza, para predecir las caídas de presión bajo otras condiciones de circulación.

Las pruebas hidráulicas para la validación del simulador, se iniciaron en la Zona Sureste, debido a que en esta área es donde se presentan las condiciones más críticas de operación. Las pruebas se realizaron para salmueras, lodos bentoníticos y lodo aerado de baja densidad (FAPX) en los pozos Eden 31, Sitio Grande 901 y Mora 27. El detalle de estas pruebas se presenta en la referencia 7.

A fin de separar las pérdidas de presión del espacio anular de las que ocurren dentro de la tubería se registraron las presiones en la superficie y en el fondo. En la superficie se usó un equipo de medición HOWCO con precisión de  $\pm 0.7 \text{ kg/cm}^2$  y en el fondo un medidor FLOPETROL con respuesta de  $\pm 0.007 \text{ kg/cm}^2$ . El gasto se controló con equipo HOWCO a  $\pm 0.1 \text{ bl/min}$ .

La circulación se hizo en directa e inversa con el objeto de registrar con el medidor de fondo, de mayor precisión, las caídas de presión en el espacio anular y en la tubería, respectivamente.

Como era de esperarse, las caídas de presión medidas al circular las salmueras, mostraron un ajuste excelente con las predichas por el simulador para fluidos Newtonianos. En la Fig. 3 se muestra el registro de presión de fondo a 4320 m. durante la circulación inversa con valores del gasto de 2 a 5 bl/min. En la primera corrida no se estabilizó el valor de 5 bl/min debido a una fuga en el preventor, por lo que se repitió la prueba para valores de 3.5 a 5 bl/min. El valor de la presión de fondo a condiciones estáticas es importante para comprobar la densidad del fluido usado. La comparación de las caídas de presión se grafica en la Fig. 4. A excepción del valor para 5 bl/min, los demás gastos muestran un buen ajuste. Los valores de eficiencia y rugosidad para esta corrida fueron de 100% y 0.00015 pg., respectivamente.

El fluido bentonítico se probó en tuberías de 3 1/2" y 2 7/8" y espacios anulares de 3 1/2" - 7 5/8" 2 7/8" - 7 5/8" y 2 7/8" - 5". Los resultados no mostraron un ajuste tan bueno como en el caso de las salmueras. No obstante, el error promedio se mantuvo dentro de un 8%, que ésta den -- tro de los límites prácticos.

Los resultados calculados con el modelo pseudoplástico se comparan con los datos medidos en las Figs. 5 y 6 para el caso de circulación directa a 5191 m. con tubería combinada de 3 1/2" con 2 7/8". Los valores medidos se muestran con línea continua, indicándose cuales fueron obtenidos al incrementar y cuales al disminuir el gasto. Nótese que se obtuvo un buen ajuste a la caída de presión en la tubería. No así en el espacio anular en donde el valor calculado para 5 bl/min. difiere grandemente del medido. Esto puede atribuirse a una medida errónea de la densidad, en vista de que no se registró la presión de fondo a condiciones estáticas y de que la caída de presión calculada en la tubería es menor que la medida.

Los resultados obtenidos con el fluido aireado (FAPX) no se reprodujeron con ninguno de los modelos reológicos contenidos en el simulador. Esto puede deberse a que el fluido pierde aire desde que se muestrea hasta



que se determina sus propiedades reológicas con el viscosímetro FAN. Además, el contenido de aire del fluido, hace que su comportamiento sea función de la presión en un grado aún no determinado. Por estas razones la determinación del modelo reológico de este fluido está aún pendiente, -- habiéndose solicitado ya la intervención de los especialistas del Instituto Mexicano del Petróleo.

En resumen, de los 3 fluidos más comúnmente usados en la Zona Sureste, -- dos de ellos ya se tienen validados en el simulador de la circulación. Se tienen programadas, para este año, la validación con pruebas de campo en las otras áreas de actividad de Reparación de Pozos.

## DESARROLLO DE PROCEDIMIENTOS PRACTICOS

La ventaja de contar con un simulador es que se puede analizar varias alternativas y de éstas seleccionar la más conveniente, antes de intervenir un pozo. Sin embargo, la ventaja mayor se obtiene de que se pueden hacer corridas en forma masiva, lo cual permite apoyar métodos de análisis, de preferencia gráficos, que se apliquen directamente en el campo, sin el -- auxilio del simulador. En este capítulo se presenta el desarrollo de tales métodos, los cuales consisten en la construcción de gráficas que permiten, para un fluido dado, calcular la profundidad máxima de circulación y determinar la presión de circulación a profundidades menores. La gran-ventaja de estos métodos es que permiten analizar con una sola gráfica, - todos los pozos que tengan una geometría similar, ésto es, mismos diáme--tros de tuberías de revestimiento y de sarta de trabajo, aún cuando las--longitudes sean diferentes.

CALCULO DE LA PROFUNDIDAD MAXIMA DE CIRCULACION.- La profundidad máxima de circulación depende de varios factores, los más importantes son: la - reología del fluido; la bomba de lodos; el estado mecánico del pozo, y -- el aparejo de trabajo. A continuación presentamos un método general para determinar esa profundidad máxima, dada la reología del fluido.

Considere un pozo con tubería de explotación hasta la profundidad  $L_B$  y tu-bería corta instalada hasta la profundidad total ( $L_t$ ) como se muestra - en la Fig. 7. La sarta de trabajo consiste de tubería de diámetro  $d_{tp}$  -- hasta la profundidad  $L_B$  y diámetro  $d_{tpr}$  dentro de la tubería corta. Ade-más se tiene una longitud de lastrabarrenas  $L_{dc}$  y un molino en el extremo. Para este pozo, las pérdidas de presión durante la circulación están da--das por:

$$\Delta P_t = \Delta P_m + \Delta P_{dc} + \Delta P_{tpr} + \Delta P_{tp} + \Delta P_{cs} \quad (1)$$

En donde:

$\Delta P_t$  = pérdidas de presión totales en el sistema

$\Delta P_m$  = pérdidas de presión en el molino.

$\Delta P_{dc}$  = pérdidas de presión por dentro de lastrabarrenas y por el espacio anular entre éstos y la tubería corta.

$\Delta P_{tp}$  = pérdidas de presión por dentro de la tubería de trabajo inferior y por el espacio anular entre ésta y la tubería corta.

$\Delta P_{tpr}$  = pérdidas de presión por dentro de la tubería superior y el espacio anular entre ésta y la tubería de explotación.

$\Delta P_{cs}$  = pérdidas de presión en las conexiones superficiales.

Nótese que en  $\Delta P_{dc}$ ,  $\Delta P_{tp}$  y  $\Delta P_{tpr}$ , las pérdidas de presión son exclusivamente por fricción ya que la carga hidrostática se cancela.

Definiendo  $\Delta P'$  como la caída de presión por unidad de longitud, ésto es:

$$\Delta P' = \frac{\Delta P}{L}, \quad (2)$$

la ecuación (1) queda

$$\Delta P_t = \Delta P_m + \Delta P'_{dc} L_{dc} + \Delta P'_{tp} L_B + \Delta P'_{tpr} (L_t - L_B - L_{dc}) + \Delta P_{cs}$$

Despejando  $L_t$  de esta ecuación obtenemos:

$$L_t = \frac{\Delta P_t - \Delta P_m - \Delta P_{cs} - \Delta P'_{dc} L_{dc} - (\Delta P'_{tp} - \Delta P'_{tpr}) L_B}{\Delta P'_{tpr}} + L_{dc} \quad (3)$$

Esta ecuación corresponde a la de una línea recta de la forma:

$$L_t = a + b L_B \quad (4)$$

En donde:

$$a = L_{dc} + \frac{\Delta P_t - \Delta P_m - \Delta P_{cs} - \Delta P'_{dc} L_{dc}}{\Delta P'_{tpr}} \quad (5)$$

$$b = 1 - \frac{\Delta P'_{tp}}{\Delta P'_{tpr}} \quad (6)$$

La gráfica de la ecuación (4), nos proporciona una relación de  $L_t$  en función de  $L_B$ , ésto es, de la profundidad máxima de circulación en función de la profundidad de la boca del "liner"  $L_B$ . Esta gráfica es aplicable para todos aquellos pozos que tengan tuberías de explotación y corta del mismo diámetro, independientemente de la profundidad de la boca del "liner".

Para la construcción de la gráfica de la ecuación (4), es necesario determinar los valores de la ordenada al origen (a) y de la pendiente (b), ésto a su vez involucra el cálculo de  $\Delta P_t$ ,  $\Delta P_m$ ,  $\Delta P_{cs}$ ,  $\Delta P'_{dc}$ ,  $\Delta P'_{tp}$  y  $\Delta P'_{tpr}$ .

El valor de  $\Delta P_t$ , corresponde a la presión de servicio de la bomba de lodos, es decir, la presión a la cual se puede operar en forma continua. En general este valor se toma del 80 al 90% de la presión máxima de la bomba. Sin embargo, es necesario determinar ese valor con mayor exactitud, ya que el 10% puede representar 600 m. o más en la profundidad máxima de operación. Por esta razón y para comprobar las especificaciones del fabricante es recomendable realizar pruebas de campo de las bombas de lodos, en donde se determine la eficiencia mecánica y la máxima potencia disponible.



El resto de las caídas de presión, a excepción de las conexiones superficiales, se obtienen directamente del programa de cómputo, dadas las características del fluido.

Para ilustrar el procedimiento, a continuación se presenta su aplicación a los pozos de la Zona Sureste. En esta Zona los pozos tienen instalada tuberías de explotación de 7 5/8" y tuberías cortas de 5". En general las terminaciones se realizan con sartas de trabajo combinadas de 3 1/2" IF, 13.3 lb/pie con 2 3/8" IF, 6.65 lb/pie ó 3 1/2" IF con 2 7/8" PH6 8.6 lb/pie. En ambos casos se usan lastrabarrenas de 3 1/8". Otros datos pertinentes se muestran en la Fig. 8.

Las caídas de presión determinadas en el programa para el fluido indicado y para una velocidad mínima en el espacio anular de 120 pie/min, se muestran en la Tabla I. Con los valores de esta Tabla obtenemos que para la sarta de 3 1/2" x 2 7/8" el valor de la ordenada al origen ( ecuación 5 ) está dado por:

$$a = 100 + \frac{352 - 20.9 - 0 - (0.7524 \times 100)}{0.0682} = 3851.6$$

y la pendiente

$$b = 1 - \frac{0.0225}{0.0682} = 0.67$$

Para construir la gráfica correspondiente, aplicamos la ecuación (4) para 2 valores de  $L_B$ : 2000 y 5000 m.

$$L_t (2000) = (3851.6) + (0.67) (2000) = 5191.6 \text{ m.}$$

$$L_t (500) = (3851.6) + (0.67) (5000) = 7201.6 \text{ m.}$$

Con estos dos pares de valores ( 2000, 5191.6 ) y ( 5000, 7201.6 ), se trazó la gráfica de la Fig. 8. De manera similar se construyó la recta correspondiente a la sarta de 3 1/2" x 2 3/8" IF.

Estas rectas nos representan la profundidad máxima de operación con la -- bomba PZ-8, para las condiciones establecidas y tuberías de revestimiento y de trabajo indicadas. Lo más importante es que esta gráfica se aplica para cualquier profundidad de la boca de la tubería corta, lo cual permite realizar observaciones generales como las siguientes:

- (1) La combinación de  $3 \frac{1}{2}"$  x  $2 \frac{3}{8}"$  nos limita grandemente la operación dentro de la tubería corta. En pozos que tengan instaladas tuberías cortas de 1000 m. sólo podemos circular a una profundidad -- máxima de 5000 m.
- (2) La caída de presión dentro de la tubería de  $2 \frac{3}{8}"$  es tan grande, -- que se observa la misma pérdida en 100 m. de la geometría  $5"$  x --  $2 \frac{3}{8}"$  que en 600 m. de  $7 \frac{5}{8}"$  x  $3 \frac{1}{2}"$ . Esto quiere decir que por cada 100 m. adicionales de la tubería corta reducimos en 600 m. la -- profundidad máxima de operación.
- (3) La tubería de  $2 \frac{7}{8}"$  nos incrementa dramáticamente de rango de operación. Podemos circular en pozos de 6500 m. con tuberías cortas -- 2500 m. o en pozos de 5200 m. con tuberías cortas de 3200 m.

Obviamente que esta gráfica es de gran utilidad para la selección de sargas de trabajo desde el punto de vista hidráulico. Para ilustrar este -- punto, en las Figs. 9 y 10 se han sobrepuesto, al rango de operación de -- las tuberías, las geometrías de los pozos en explotación de los campos -- Samaria y Cardenas. Obsérvese en la Fig. 9 que la mayoría de los pozos -- pueden intervenirse con la tubería de  $3 \frac{1}{2}"$  -  $2 \frac{3}{8}"$  I.F. No obstante en aquellos en que la longitud de la tubería corta excede de 1000 m. -- es necesario usar la tubería de  $2 \frac{7}{8}"$ . Para el campo Cardenas, en donde los pozos son más profundos y con tuberías cortas más largas, solamente un pozo cae dentro del rango de operación de la tubería de  $2 \frac{3}{8}"$  y -- algunos pozos estan fuera del rango de la tubería de  $2 \frac{7}{8}"$ . Para circular en estos pozos se deberán modificar las propiedades del fluido, o -- bien, usar una unidad de bombeo de alta presión.

Los ejemplos anteriores ilustran, el potencial de los métodos de análisis presentados no solamente para la selección de sartas de trabajo, sino para señalar las condiciones críticas en las que se tiene que operar en algunos pozos profundos, debido a la gran longitud y diámetro reducido de las tuberías de revestimiento cortas.

Es oportuno señalar que mediante un análisis apoyado en gráficas semejantes a las Figs. 9 y 10, se seleccionaron 50 km. de tuberías para operar en los pozos del área de Villahermosa. Esta tubería tiene un costo aproximado de 500 millones de pesos.

DETERMINACION DE LA PRESTION REQUERIDA PARA CIRCULAR. La utilidad de las gráficas semejantes a la de la Fig. 8 es indudable para la selección de sartas de trabajo, ya que nos proporcionan las profundidades máximas de operación. Sin embargo, rara vez se operará a estas condiciones críticas, y para la operación diaria tiene mayor ventaja una gráfica que nos proporcione la presión de circulación a otras profundidades, menores que la crítica. Esta gráfica también se puede construir a partir de las ecuaciones mostradas, sustituyendo por  $\Delta P_t$  diferentes valores de presión y obteniendo para cada uno la ecuación que nos relacione la profundidad total con la boca de la tubería corta.

Sea  $\Delta P_c$ , un valor de presión de circulación tal que  $\Delta P_c = \Delta P_t$ . Se desea determinar la profundidad máxima a la que se pueda circular con esta presión, dada la geometría del pozo mostrada en la Fig. 7. Siguiendo un razonamiento similar al de inciso anterior, obtenemos que la profundidad máxima está dada por:

$$L_t = a' + b L_B \quad (7)$$

En donde:

$$a' = L_{dc} + \frac{\Delta P_c - \Delta P_m - \Delta P'_{dc} L_{dc}}{\Delta P_{tpr}}$$

De esta manera se pueden obtener ecuaciones semejantes a la (7) para diferentes valores de  $\Delta P_c$  y construir una gráfica con la mostrada en la Fig. 11, para valores de  $\Delta P_c$  de 340, 320, 300 etc.,  $\text{kg/cm}^2$ .

Esta figura proporciona la presión requerida para circular a cualquier profundidad dentro de la tubería corta y usando el aparejo de trabajo indicado. Se pueden construir fácilmente otras figuras semejantes a la 11 para otras condiciones de fluido y gasto, de tal manera que se puedan aplicar directamente en el campo para controlar las condiciones de circulación y detectar anomalías.

Es importante recalcar que para la aplicación confiable de los procedimientos presentados aquí, se deben cumplir con todas las etapas previas señaladas en este trabajo. Esto es, es necesario que las caídas de presión que se involucran en el cálculo nos representen lo que realmente ocurre en el campo. Para esto es necesario llevar a cabo pruebas de circulación en pozos que nos garanticen la validez de los modelos usados. Asimismo, se nota que para determinar las profundidades máximas de operación, y por lo tanto seleccionar las sartas de trabajo, es fundamental conocer las limitaciones reales del equipo con que se cuenta, en este caso, de la bomba de lodos. De nuestra experiencia, sabemos que no siempre se cumplen con las especificaciones de diseño y en algunos casos se han detectado fallas en algunos elementos al operar las bombas en condiciones críticas. Por lo que es recomendable llevar a cabo un programa sistemático de pruebas de bombas, que nos conlleve a conocer realmente sus limitaciones.

El conocimiento preciso de las condiciones de circulación de los pozos, cuyas bases han quedado establecidas aquí, es sólo una parte, aunque fundamental, de la optimización de la hidráulica en las operaciones de molienda. Este es el siguiente aspecto en el cual ya se está iniciando a estudiar con el objeto de mejorar las operaciones que se realizan durante la reparación de los pozos.

Otro aspecto que se debe consignar es la reducción que se ha observado en las operaciones con problemas durante la terminación de los pozos, a partir de que la revisión de las condiciones de circulación se ha implantado como-



una rutina de trabajo. En el Distrito Villahermosa sólo se tuvo un -  
problema importante de pesca durante 1985 comparado con 4 en 1984.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El control efectivo de las condiciones de circulación requiere de la concurrencia de varios elementos. Entre éstos es fundamental -- un simulador cuya confiabilidad haya sido validada con resultados-- de campo.
2. En base a los resultados del simulador es posible desarrollar procedimientos prácticos y precisos que nos ayuden a generalizar un mejor control de la hidráulica.
3. La aplicación de estos procedimientos ha coadyuvado a la selección de sartas de trabajo para equipos del área de Villahermosa.
4. La mayor atención a la supervisión de la hidráulica durante las operaciones de reparación de pozos han reducido la incidencia de problemas de pesca.
5. En algunos pozos de la Zona Sureste, para circular es necesario usar unidades de alta presión, aún así la operación se torna riesgosa con un alto porcentaje de probabilidades de falla.
6. Como secuela de este trabajo, se debe profundizar en la optimización de la hidráulica en las operaciones de molienda.

## REFERENCIAS

1. Viñas Rodríguez R. y De León Mojarro J.C.: "Diseño de Sartas de Trabajo", artículo propuesto para la XXIV Conv. de la AIPM, 1986.
2. Tellez Notario H. y Andaluz Carmona L.M.: "Control de Pérdidas de -- Circulación en Rocas Carbonatadas Mediante la Utilización del Cloruro de Sodio como Obturante, Sistema HT-SAL-PO", artículo propuesto para la XXIV Conv. de la AIPM, 1986.
3. Cranmer J.L.: "BASIC Drilling Engineering Manual", Penn Well Books, - Tulsa, Okla., 1983.
4. Iskander H.F. y Combes J.D.: "Drilling Applications For Programmable Calculators", Pet. Eng. Int., Oct. 1978, P. 40.
5. "Instructivo de Operación de la Programoteca, Tomo I", Gcia. de Rep. y Term. de Pozos, Pemex, 1985.
6. Monicard R.: "Drilling Mud and Cement Slurry Rheology Manual", Gulf-Publishing Co., Paris, 1982.
7. Hernández Guzmán S.: "Ajuste del Simulador de Circulación a los -- Fluidos de Villahermosa", Gcia. de Rep. y Term. de Pozos, Pemex - 1985.

## NOMENCLATURA

|                  |                                                                                                  |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $a$              | Ordenada al origen de la ecuación (4), m.                                                        |
| $a'$             | Ordenada al origen de la ecuación (7), m.                                                        |
| $b$              | Pendiente, en la ecuación (4), indimensional.                                                    |
| $d_{tr}$         | Diámetro interno de la tubería de trabajo superior, pg.                                          |
| $d_{tpr}$        | Diámetro interno de la tubería de trabajo inferior, pg.                                          |
| $l_B$            | Profundidad de la boca del "liner", m.                                                           |
| $l_t$            | Longitud total de la sarta de trabajo, m.                                                        |
| $\Delta P_{cs}$  | Caída de presión en las conexiones superficiales, $\text{kg/cm}^2$ .                             |
| $\Delta P_{dc}$  | Caída de presión por fricción por dentro y fuera de los lastra--<br>barrenas, $\text{kg/cm}^2$ . |
| $\Delta P_m$     | Caída de presión en el molino, $\text{kg/cm}^2$ .                                                |
| $\Delta P_t$     | Presión total disponible en la superficie, $\text{kg/cm}^2$ .                                    |
| $\Delta P_{tp}$  | Caída de presión por dentro y fuera de la tubería superior, $\text{kg/cm}^2$ .                   |
| $\Delta P_{tpr}$ | Caída de presión por dentro y fuera de la tubería inferior, $\text{kg/cm}^2$ .                   |



TABLA I  
CAIDAS DE PRESTION CALCULADAS

| GEOMETRIA       | $Q^{(*)}$<br>bl/min | $\Delta P'$                      | $\Delta P'$                             | $\Delta P'$                    |
|-----------------|---------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|
|                 |                     | Tubería<br>kg/cm <sup>2</sup> /m | Espacio Anular<br>kg/cm <sup>2</sup> /m | Total<br>kg/cm <sup>2</sup> /m |
| 7 5/8" x 3 1/2" | 4.15                | 0.0202                           | 0.0023                                  | 0.0225                         |
|                 | 4.44                | 0.0228                           | 0.0024                                  | 0.0252                         |
| 5" x 2 7/8"     | 4.15                | 0.045                            | .0232                                   | 0.0682                         |
| 5" x 2 3/8"     | 4.44                | 0.1398                           | 0.0161                                  | 0.1559                         |
| 5" x 3 1/4"     | 4.15                | 0.7012                           | 0.051                                   | 0.7524                         |
|                 | 4.44                | 0.7892                           | 0.0576                                  | 0.8468                         |

$$\Delta P_m = 20.9 \text{ kg/cm}^2 \text{ para } Q = 4.15 \text{ bl/min}$$

$$\Delta P_m = 23.9 \text{ kg/cm}^2 \text{ para } Q = 4.44 \text{ bl/min}$$

(\*) Se toman dos valores de gasto para obtener la misma velocidad de 120 pie/min a la salida de la tubería corta con las dos geometrías.

D A T O S

(1) POZO V.H. CARDENAS

(2) PROFUNDIDAD Y DISTANCIA VERTICAL (M) 5900.0, 5900.0

| (3) T.P. | PROFUNDIDAD<br>M | DIAM EXT<br>PG | DIAM INT<br>PG |
|----------|------------------|----------------|----------------|
|          | 3450.0           | 3.500          | 2.992          |
|          | 5840.0           | 2.875          | 2.259          |
|          | 5899.0           | 3.425          | 1.000          |

(4) T.R.

| PROFUNDIDAD<br>M | DIAM INT<br>PG |
|------------------|----------------|
| 3200.0           | 6.625          |
| 5900.0           | 4.276          |

(5) BARRENA TIPO CONVENCIONAL CON TOBERAS DE 12, 12, 12; (1/32")  
DIAMETRO PROMEDIO DE LOS CORTES .20 PG

(6) FLUIDO: LEY DE POTENCIAS, DENSIDAD 1.200 GM/CM3  
LECTURA A 300 RPM 22.0 A 600 RPM 38.0

(7) DESGASTE DE LA TUBERIA .0% Y EFICIENCIA 100.0%

(8) BOMBA PZ-8 EFICIENCIA VOLUMETRICA 95.0%

(9) CIRCULACION DIRECTA. CONTRAPRESION EN LA TR .0 KG/CM2  
2 VALORES DE GASTO DE 3.0 A 5.0 BL/MIN

(10) IMPRESION COMPLETA

Fig. 1.- DATOS NECESARIOS PARA CORRER EL PROGRAMA.

**\*\* CALCULO DE LAS CONDICIONES HIDRAULICAS \*\***

NOMBRE DEL POZO: V.H. CARDENAS

**G E O M E T R I A   D E L   P O Z O**

|             |       | TUBERIA DE PRODUCCION |       |       |        |  | ESPACIO ANULAR |        |        |
|-------------|-------|-----------------------|-------|-------|--------|--|----------------|--------|--------|
| PROFUNDIDAD | VERT  | D.E.                  | D.I.  | A.F.  | CAP.   |  | D.T.E.         | A.F.   | CAP.   |
| M           | M     | PG                    | PG    | PG2   | BLS    |  | PG             | PG2    | BLS    |
| 0.-3150.    | 3150. | 3.500                 | 2.992 | 7.034 | 89.84  |  | 6.625          | 24.854 | 317.55 |
| 3150.-3200. | 3200. | 2.875                 | 2.259 | 4.008 | .81    |  | 6.625          | 27.980 | 5.68   |
| 3200.-5840. | 5840. | 2.875                 | 2.259 | 4.008 | 42.92  |  | 4.276          | 7.869  | 84.27  |
| 5840.-5899. | 5899. | 3.125                 | 1.000 | .785  | .49    |  | 4.276          | 6.690  | 1.60   |
| 5899.-5900. | 5900. |                       |       |       |        |  | 4.276          | 14.360 | .06    |
|             |       |                       |       |       | 133.77 |  | 409.15         |        |        |

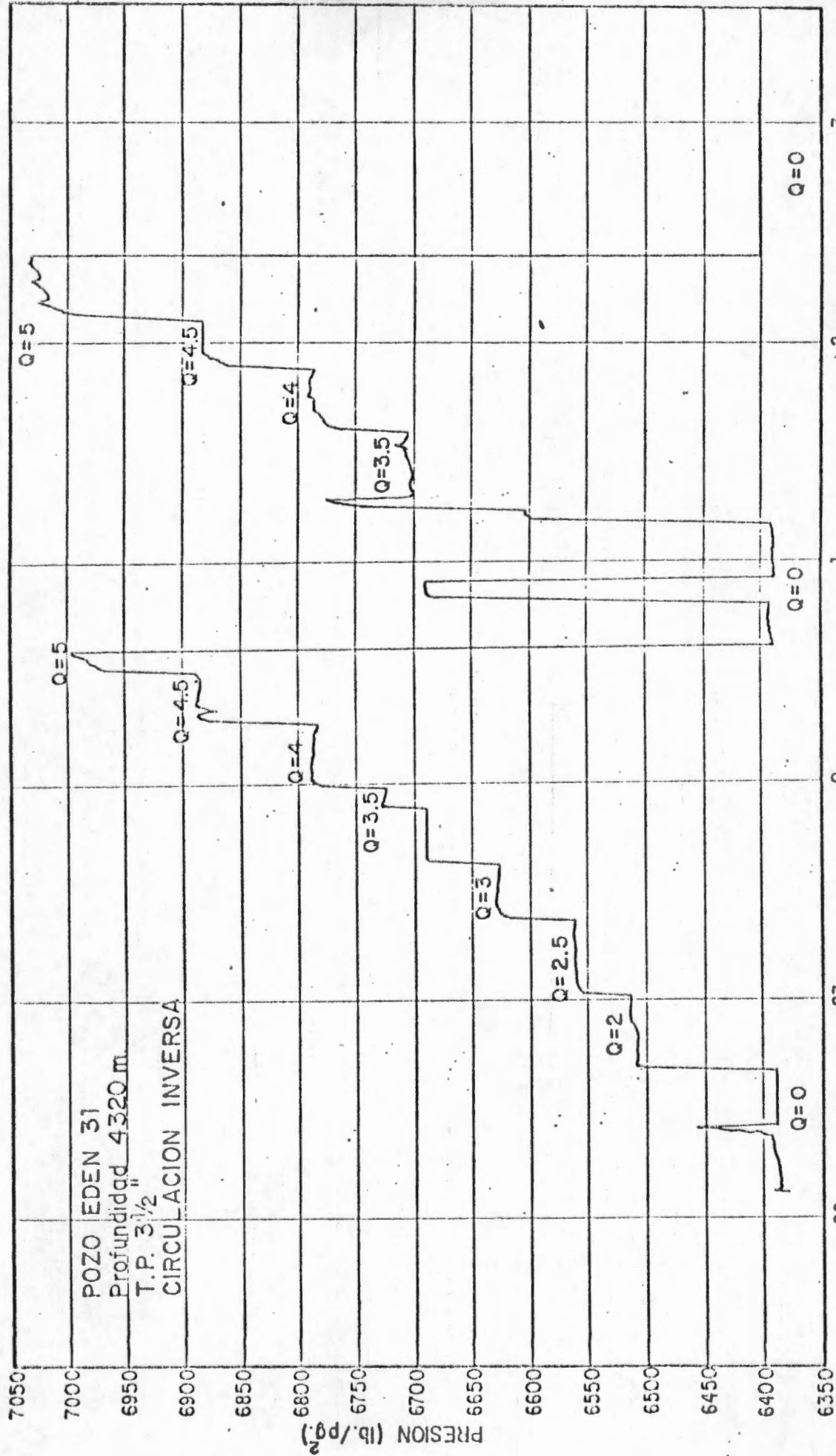
GASTO 3.00 BL/MIN  
TIEMPO DE CIRCUL. 3: 0 HR:MIN  
DEL FONDO A SUPRF. 2:16 HR:MIN  
TIEMPO DE ATRASO 2:58 HR:MIN  
VEL EN TOBERAS 7320.8 PIE/MIN

BOMBA: PZ-8 (4.0 X 102 EPM)

PRESION EN T.P. 234.7 KG/CM2  
PRESION EN T.R. .0 KG/CM2  
PRESION DE FONDO 775.9 KG/CM2  
CAIDA PRES TOTAL 234.7 KG/CM2  
CAIDA PRES BARRN 13.4 KG/CM2  
PORC DEL TOTAL 5.7  
POTENCIA USADA 257.9 HP

| TUBERIA DE PRODUCCION |        |        |        |         | ESPACIO ANULAR |        |        |         |
|-----------------------|--------|--------|--------|---------|----------------|--------|--------|---------|
| PROF.                 | PRES.  | DPFR   | DPHT   | VEL.    | PRES.          | DPFR   | DPHT   | VEL.    |
| M                     | KG/CM2 | KG/CM2 | KG/CM2 | PIE/MIN | KG/CM2         | KG/CM2 | KG/CM2 | PIE/MIN |
| .0                    | 234.7  | 23.4   | -378.0 | 345.0T  | .0             | 4.0    | 378.0  | 97.6L   |
| 3150.0                | 589.6  | 4.4    | -6.0   | 605.2T  | 382.0          | .0     | 6.0    | 86.7L   |
| 3200.0                | 594.2  | 71.5   | -316.8 | 605.2T  | 388.4          | 48.7   | 316.8  | 308.3T  |
| 5840.0                | 839.5  | 70.6   | -7.1   | 3088.5T | 753.6          | 1.8    | 7.1    | 362.6T  |
| 5899.0                | 775.9  | .0     | .0     | .0      | 762.5          | .0     | .0     | .0      |

Fig. 2.-RESULTADOS OBTENIDOS POR EL PROGRAMA.



27-FEB.-85

Fig. 3.-REGISTRO DE PRESION DE FONDO CON CIRCULACION INVERSA.



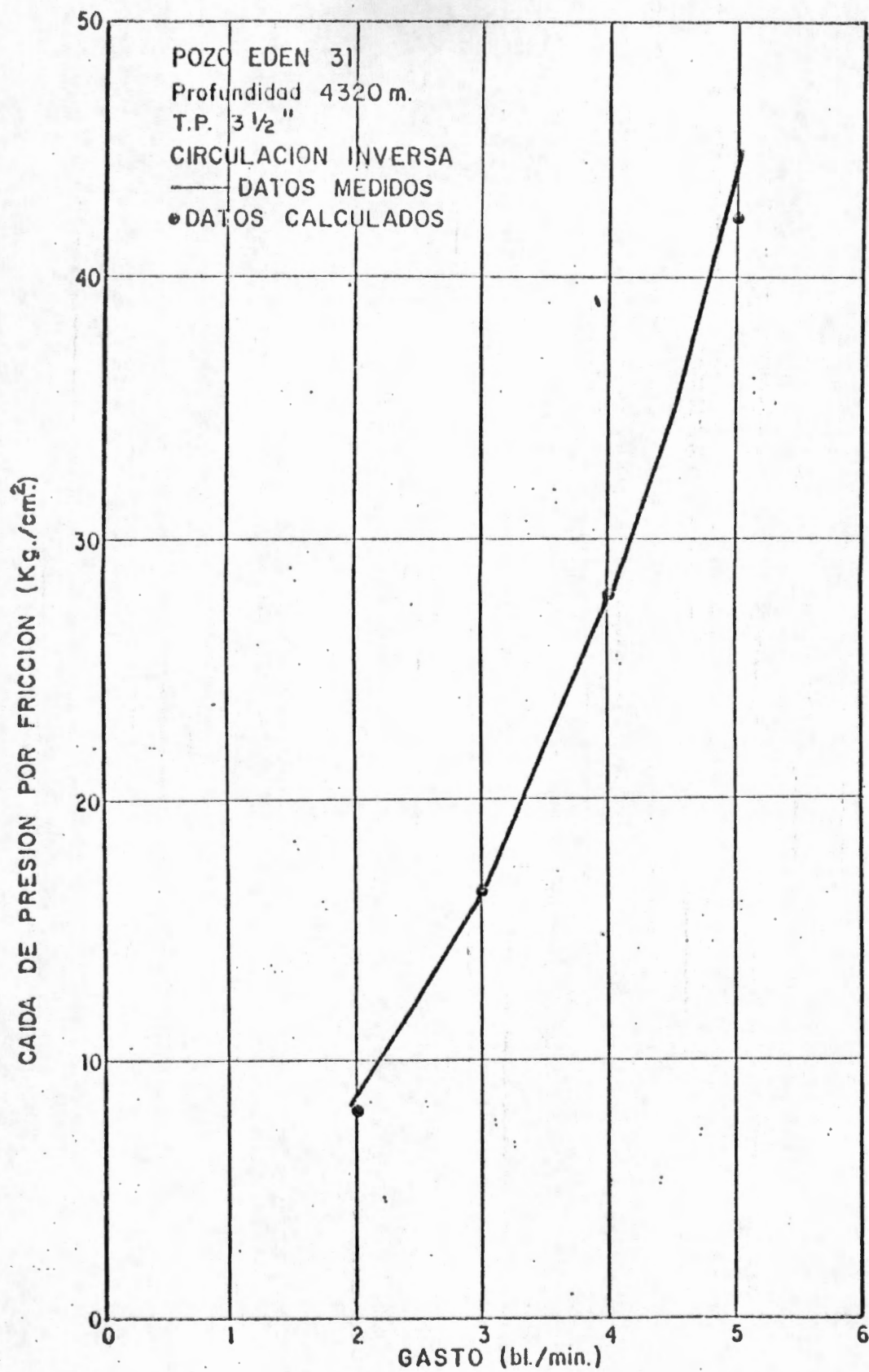


Fig. 4.- COMPARACION DE LAS CAIDAS DE PRESION CALCULADAS CON LAS MEDIDAS.

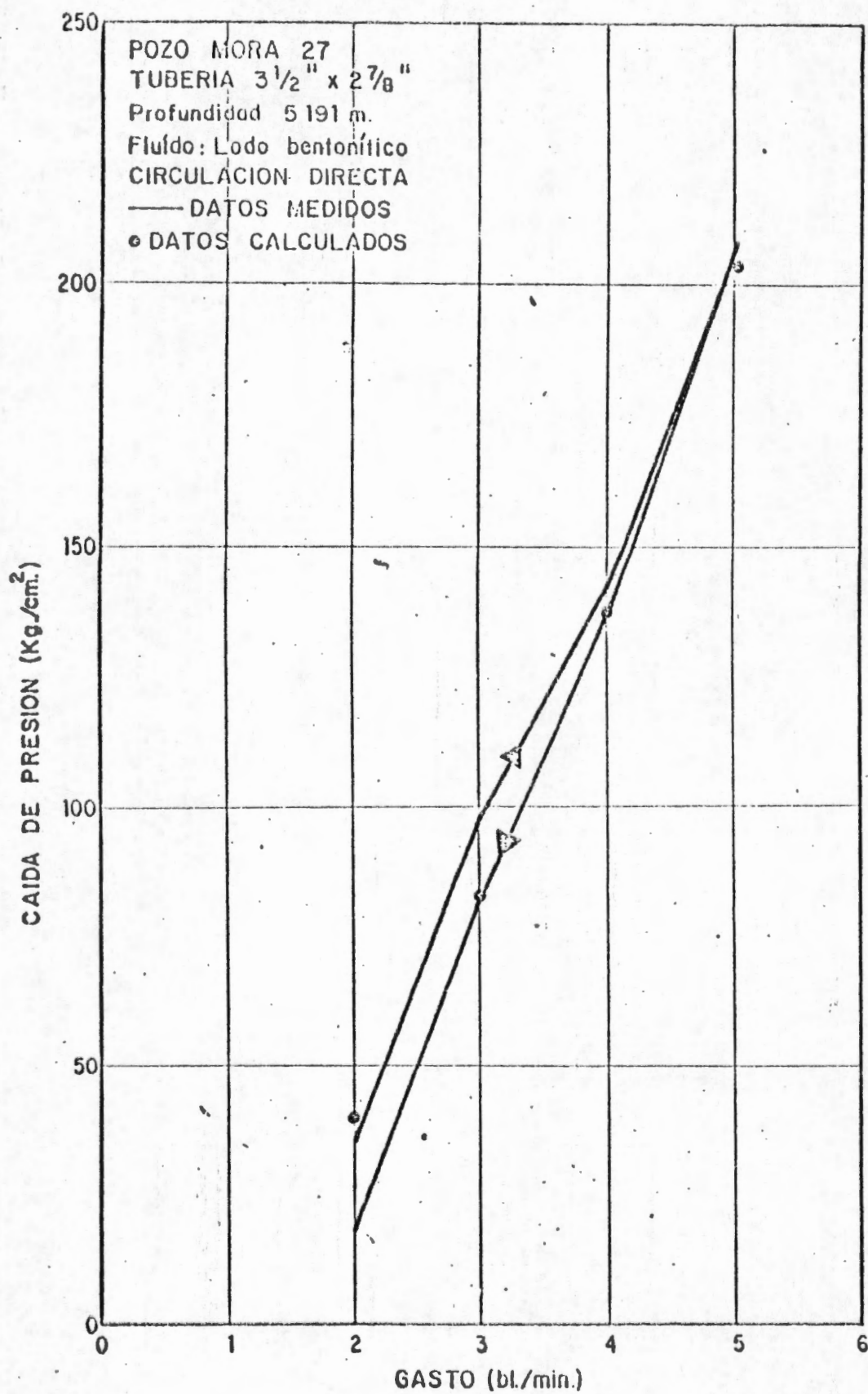


Fig. 5.- CAIDA DE PRESION EN LA TUBERIA, FLUIDO BENTONITICO.

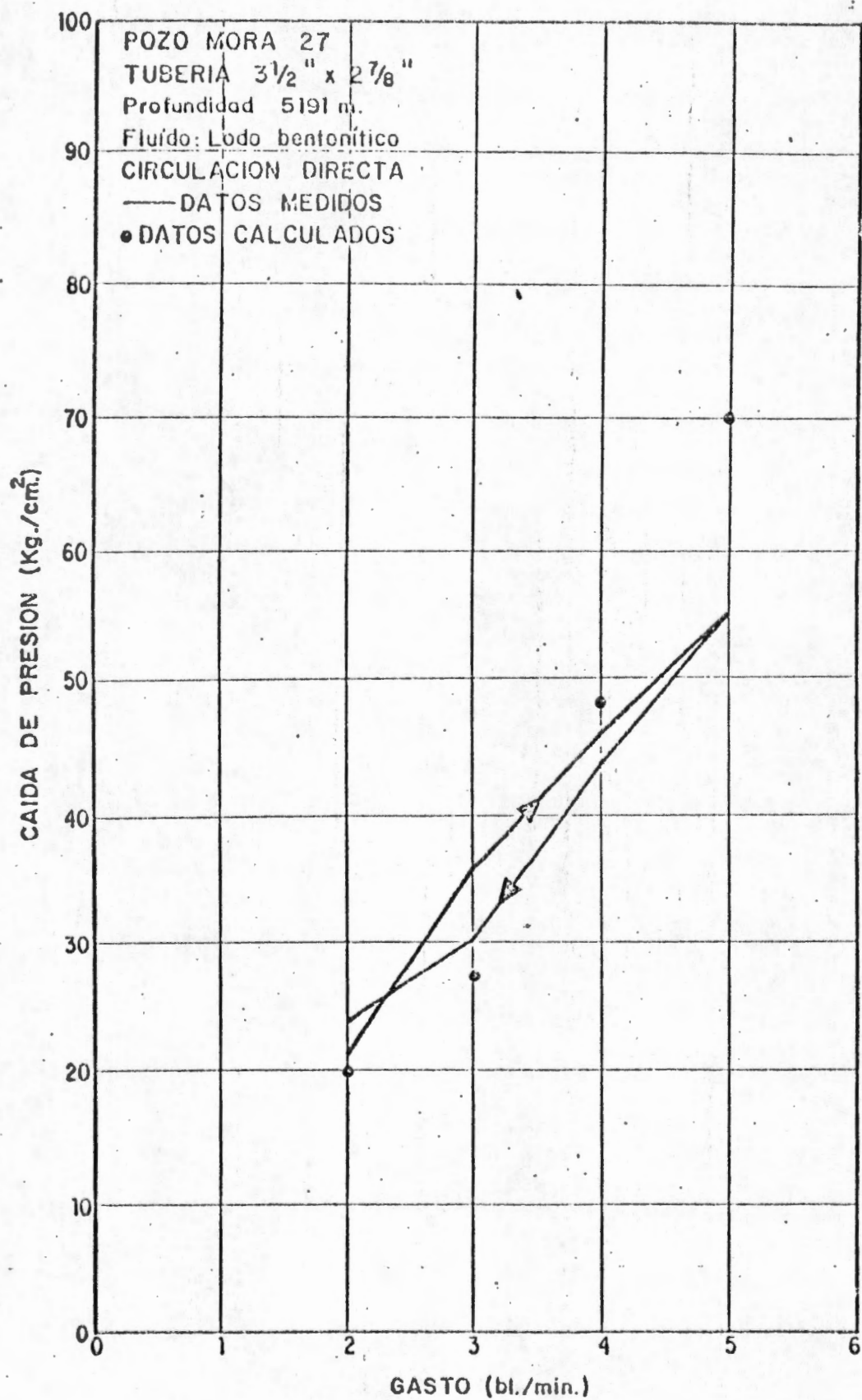


Fig. 6.-CAIDA DE PRESION EN EL ESPACIO ANULAR, FLUIDO BENTONITICO.

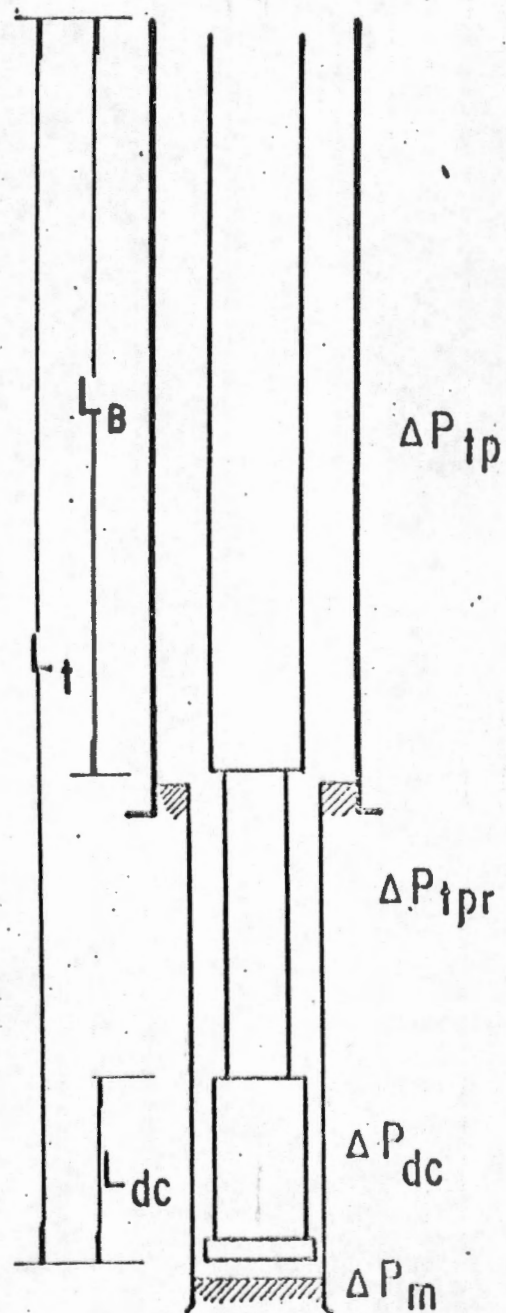


Fig. 7.- GEOMETRIA DEL POZO PARA EL CALCULO DE LAS PERDIDAS DE PRESION.



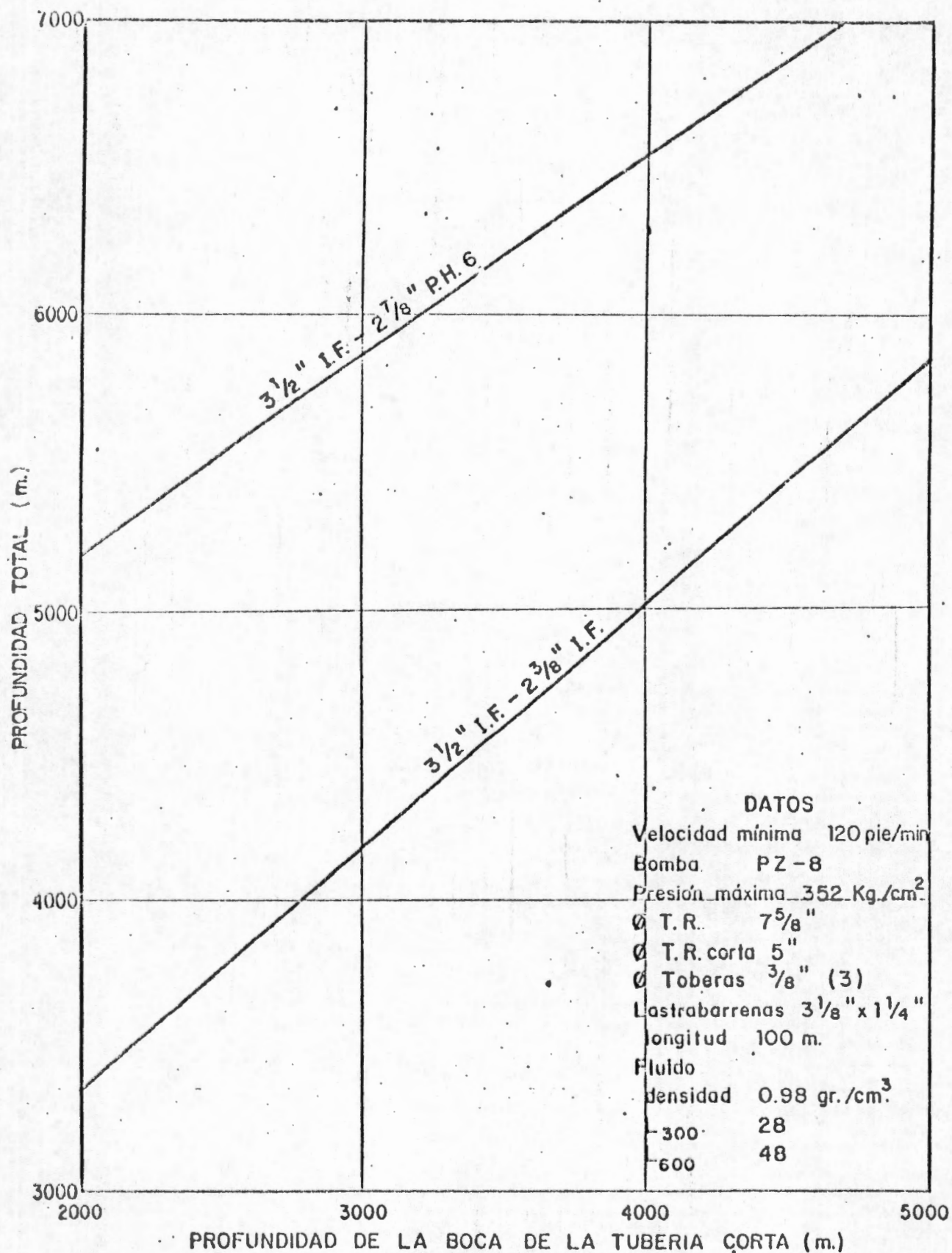


Fig. 8.-PROFUNDIDADES MAXIMAS DE OPERACION.

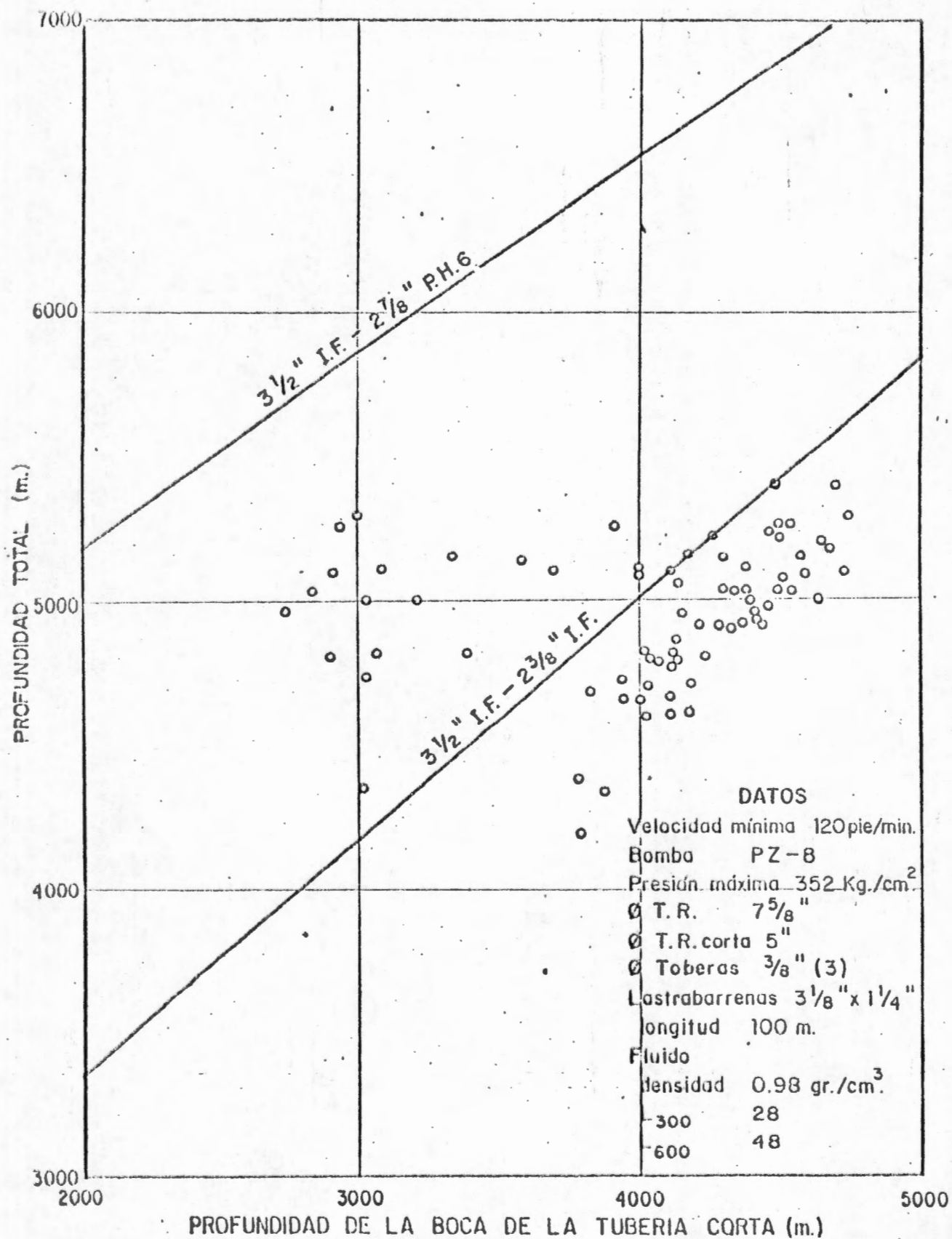


Fig. 9.-ANALISIS DE OPERACION EN LOS POZOS DEL CAMPO SAMARIA

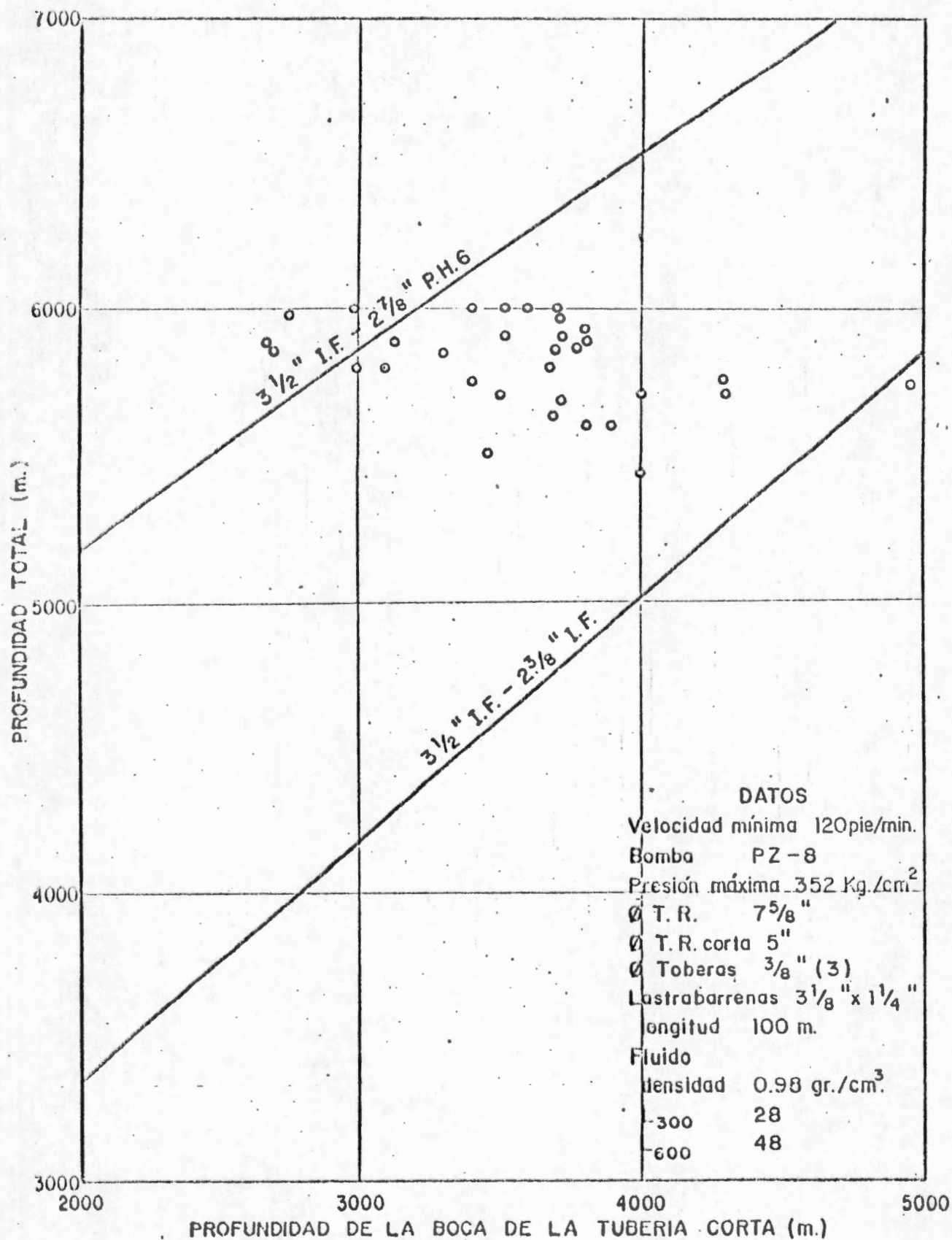


Fig. 10.-ANALISIS DE OPERACION EN LOS POZOS DEL CAMPO CARDENAS.

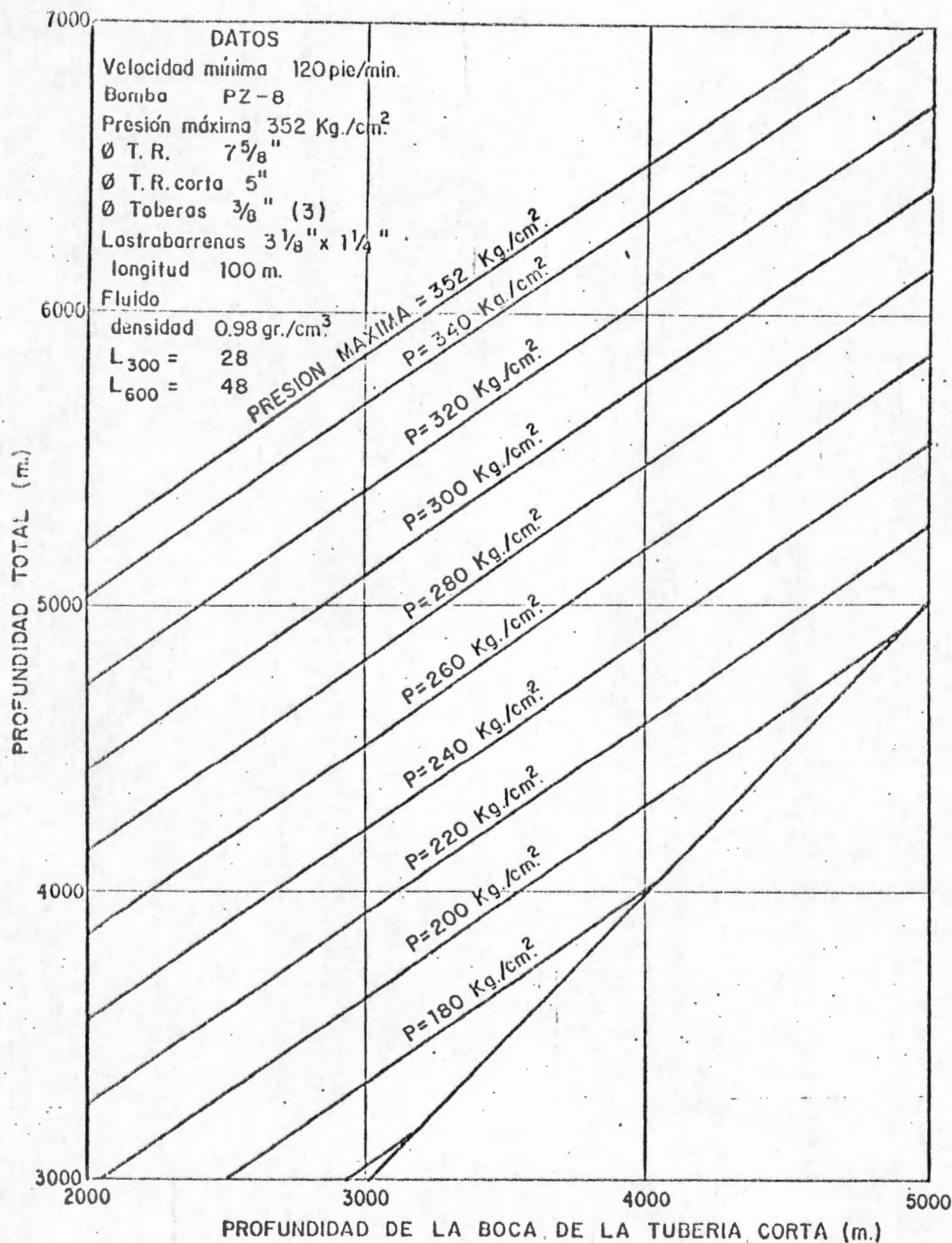


Fig. 11.-PRESIONES REQUERIDAS PARA CIRCULAR A DIFERENTES PROFUNDIDADES.



3.1.- OPTIMIZACION DE LA HIDRAULICA  
=====

### 3.1.- OPTIMIZACION DE LA HIDRAULICA:

En las Operaciones de Perforación es de fundamental importancia el empleo óptimo del caballaje de la bomba. Para esto se requiere el cabal conocimiento del equipo superficial motriz y sus componentes, así como su evaluación analítica.

El término de potencia hidráulica está asociado generalmente con el empleo de toberas en la barrena. El propósito de éstas, es el de mejorar la capacidad de limpieza del lodo en el fondo, incrementando con ello la velocidad de penetración.

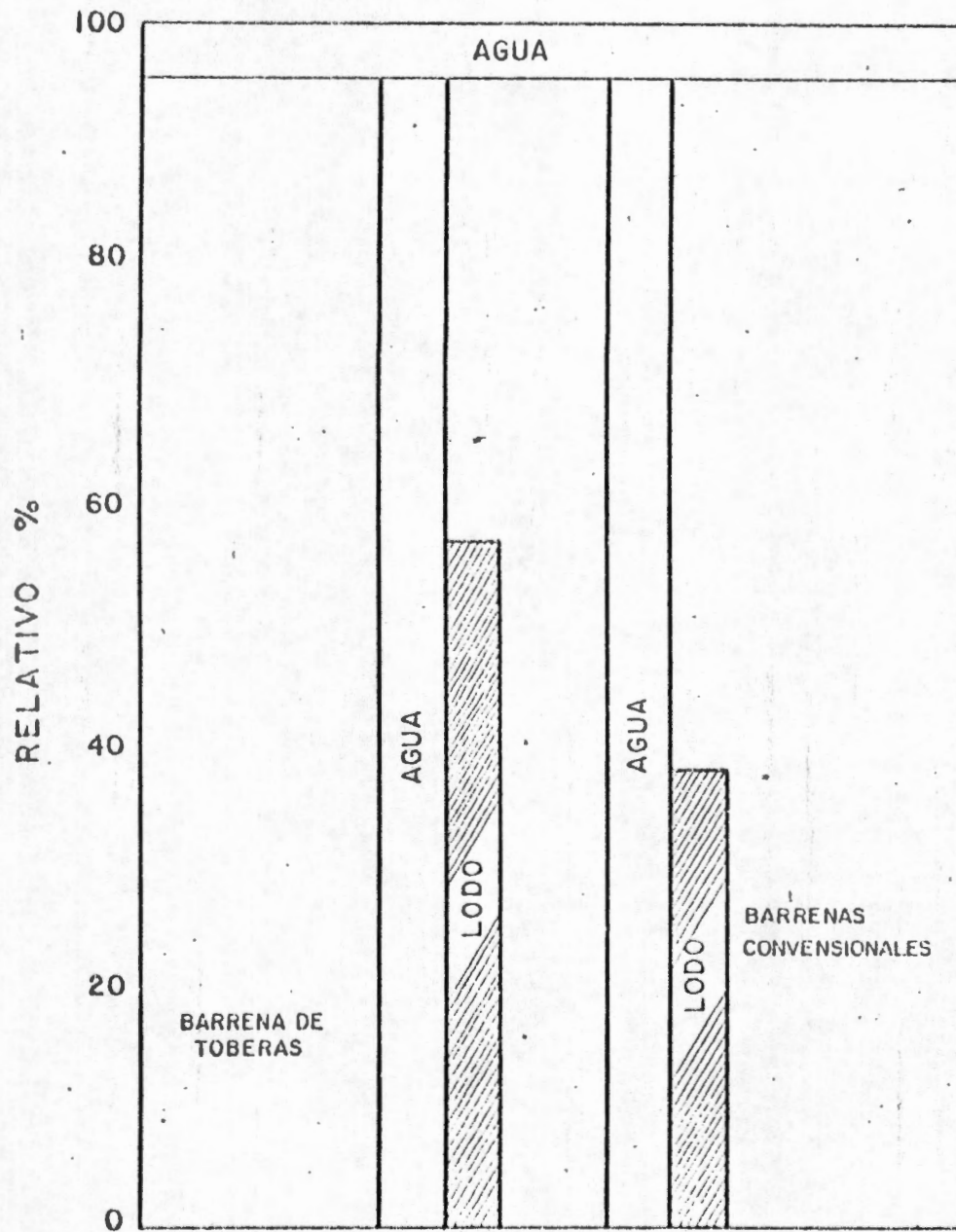
Anteriormente al empleo de las toberas, la limpieza de recortes del fondo era ineficiente y gran parte de la vida de la barrena se consumía remoliendo los recortes.

A pesar de que aún no se ha comprendido bien la acción de limpieza del chorro, algunos investigadores han concluido que ésta se maximiza, al maximizar la fuerza de impacto hidráulico del chorro de fluido, contra el fondo del agujero.

Una de las aplicaciones más frecuentes de las ecuaciones de caída de presión es la del cálculo del tamaño adecuado de las toberas. Esto trae consigo un incremento sustancial en la velocidad de penetración, ya que si se logra una "limpieza perfecta", los recortes serán levantados del fondo con la misma rapidez con que se forman. En formaciones suaves el chorro de lodo puede ayudar, por sí solo, a "hacer agujero".

A la fecha aún no se ha logrado la verdadera optimización de la hidráulica. Esto se debe a que no existen modelos matemáticos precisos que definan el efecto de la hidráulica en: 1) La velocidad de penetración, 2) Los costos de Operación, 3) El desgaste de la barrena, 4) Los problemas potenciales como la erosión del agujero, y 5) La capacidad de acarreo del lodo. Incluso, actualmente hay desacuerdo en el sentido de cuál parámetro hidráulico debe usarse para indicar el nivel de limpieza hidráulica. Sin embargo, los criterios de diseño hidráulico más usados son: 1) caballaje hidráulico en la barrena, 2) Fuerza de impacto del chorro y 3)-

## HIDRAULICA



EFECTO DEL FLUIDO SOBRE EL RITMO DE PENETRACION

velocidad en las toberas. La práctica común en el diseño de un programa hidráulico consiste en la selección de los tamaños de toberas que ocasiona que uno de estos parámetros sea máximo.

### 3.11.- MAXIMO CABALLAJE HIDRAULICO EN LA BARRENA:

La efectividad de las barrenas de chorro se mejora aumentando la potencia hidráulica de la bomba. Esto se debe a que la velocidad de penetración aumenta; sin embargo, una vez que se llega al nivel de "limpieza perfecta" (recortes que se levantan del fondo a medida que se generan), cualquier incremento en la potencia hidráulica ya no trae consigo un aumento en los avances. (Fig. 1.2.4)

El caballaje hidráulico desarrollado por la bomba se utiliza en parte en vencer la resistencia ofrecida al lodo por el sistema circulatorio destinándole el resto a la barrena.

Si se aumenta indiscriminadamente la potencia superficial, en general, se aumentará el gasto, a presión constante, incrementándose por lo tanto las caídas de presión en el sistema. Esto trae como consecuencia (para una misma combinación de toberas) que aumente el caballaje destinado a vencer la resistencia por circulación a costa del caballaje empleado en la barrena, lo cual significa que el parámetro que requiere optimizarse, es el caballaje en la barrena y no el superficial.

De acuerdo con la siguiente ecuación:

$$P_b = P_s - P_c \quad \dots\dots\dots 1.2.8$$

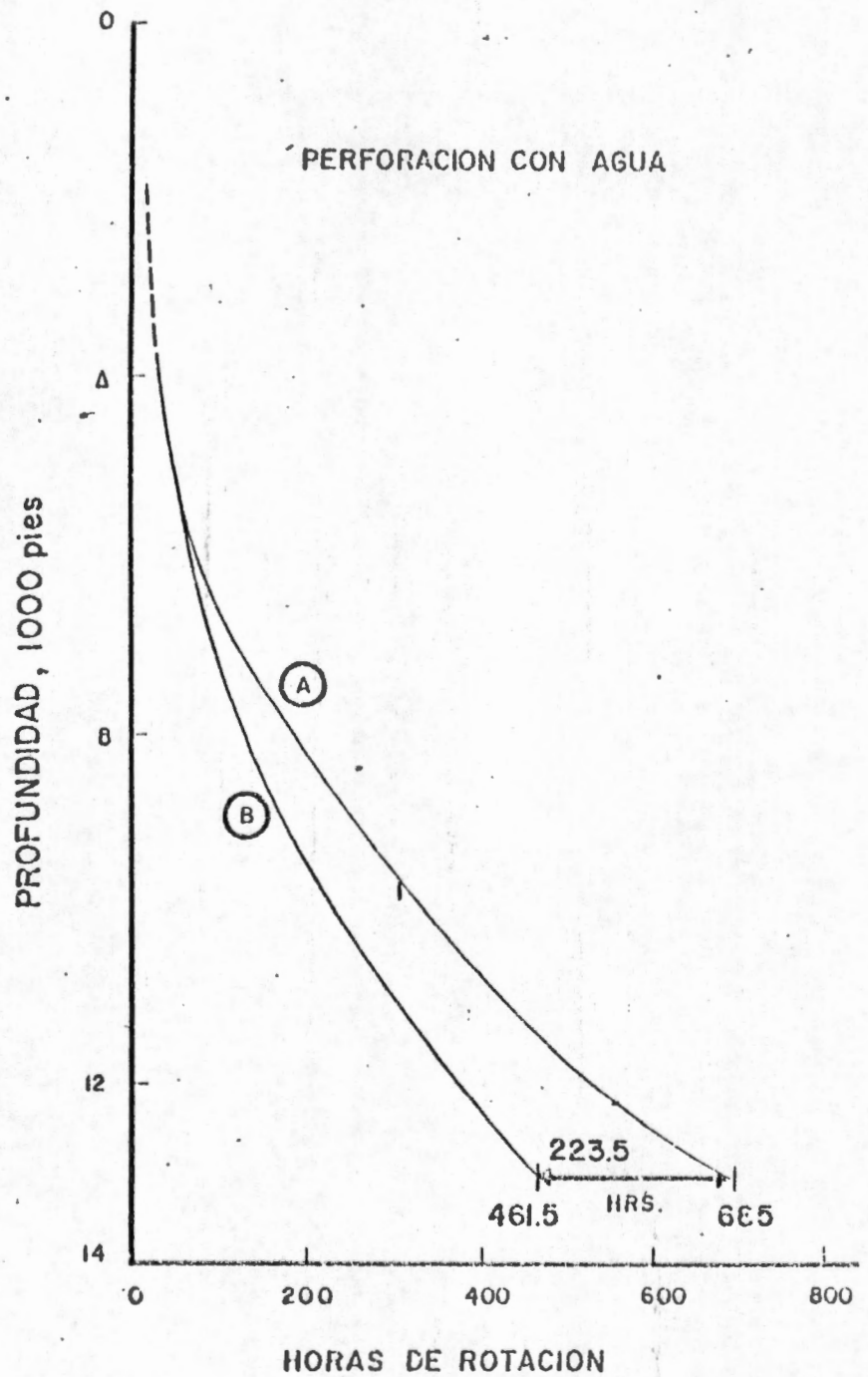
Por otro lado, la caída de presión por circulación (excluyendo la barrena) en flujo turbulento está dada por:

$$P_c = B \cdot Q^m \quad \dots\dots\dots 1.2.9$$

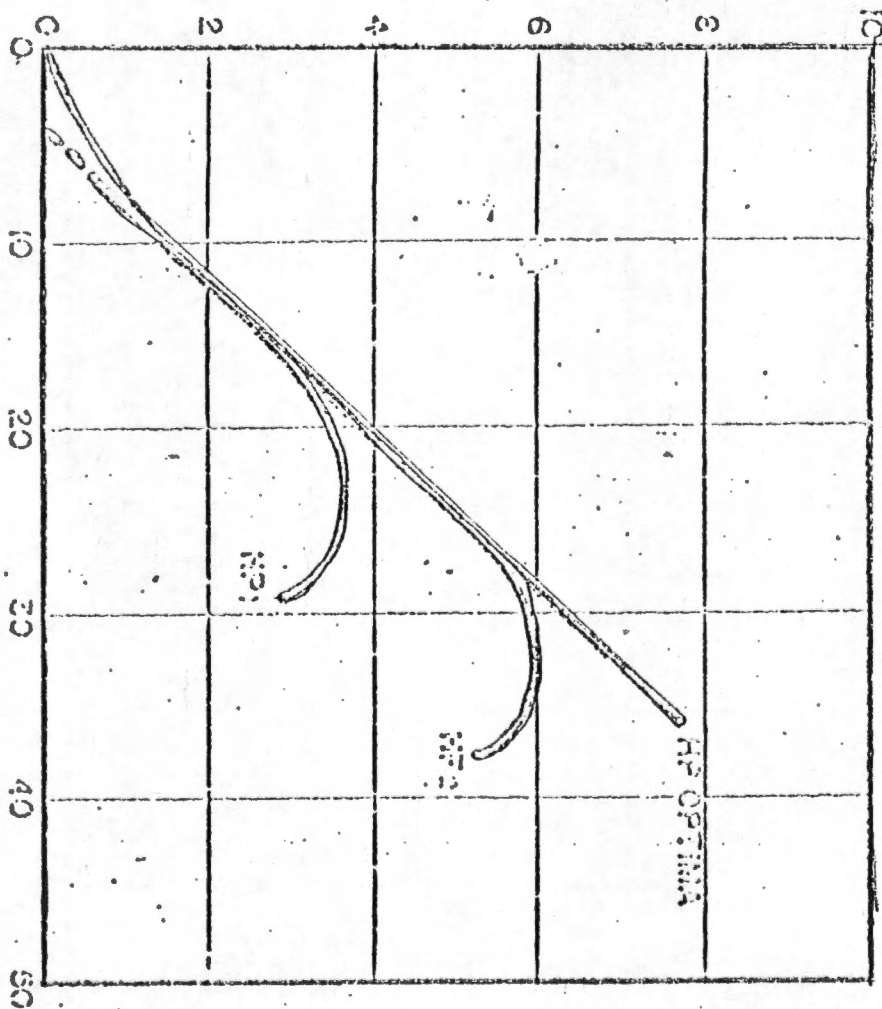


# POTENCIA EN LA BARRENA

|              | <u>A</u> | <u>B</u> |
|--------------|----------|----------|
| HP BOMBA     | 370      | 580      |
| HP BARRENA   | 62       | 182      |
| R(pie/hr.)   | 16.3     | 24.2     |
| Pies/Barrena | 294      | 372      |



VELOCIDAD DE PERFORACION (m./hs.)



CARGA SOBRE LA BARRERA (TON.)

FIG. 12.4 EFECTO DE LA POTENCIA HIDRAULICA SOBRE LA VELOCIDAD DE PERFORACION

en donde:

$B$  = Constante que depende de las propiedades del lodo y la geometría del agujero.

$m$  = Constante cuyo valor oscila entre 1.2 y 1.9 (teóricamente tiene un valor de 1.8).

Al sustituir 1.2.9 en 1.2.8 queda:

$$P_b = P_s - BQ^m \quad \text{.....1.2.10}$$

Además la potencia en la barrena se define como:

$$HP_b = \frac{P_b Q}{1714} \quad \text{.....1.2.11}$$

sustituyendo 1.2.10 en 1.2.11

$$HP_b = \frac{P_s Q - BQ^{m+1}}{1714} \quad \text{.....1.2.12}$$

Derivando 1.2.12 con respecto a  $Q$  e igualando a cero:

$$\frac{d HP_b}{dQ} = \frac{P_s - (m + 1) BQ^m}{1714} = 0 \quad \text{.....1.2.13}$$

La raíz de esta ecuación corresponde a un máximo y resulta ser:

$$P_s = (m + 1) BQ^m = (m + 1) P_c \text{ de donde:}$$

$$P_c = \frac{1}{m + 1} P_s \quad \text{.....1.2.14}$$

La ecuación 1.2.14 establece que el caballaje en la barrena es máximo cuando  $P_c$  es  $\frac{1}{m + 1}$  veces la presión superficial.

Para  $m = 1.8$ ,  $P_c = 0.36 P_s$  .....1.2.15

Como consecuencia de la ecuación 1.2.8

$$P_b = \left[ 1 - \left( \frac{1}{m + 1} \right) \right] P_s = \frac{m}{m + 1} P_s \quad \text{.....1.2.16}$$

Y para  $m = 1.8$ :

$P_b = 0.64 P_s$  .....1.2.17

### 3.12.- Máximo impacto hidráulico:

Por trabajos experimentales reportados en literatura especializada se determinó que la velocidad del flujo a través del fondo es máxima, cuando la fuerza de impacto es máxima. Dicha fuerza de impacto se define como:

$$F_b = \left[ \frac{Q^2 P_b}{361} \right]^{1/2} \quad \text{.....1.2.18}$$

es decir:

$$F_b = \left[ \frac{Q^2 (P_s - P_c)}{361} \right]^{1/2} = \left[ \frac{(P_s Q^2 - BQ^{2+m})}{361} \right]^{1/2}$$

derivando esta ecuación con respecto a  $Q$  es igualando a cero:

$$\frac{d F_b}{d Q} = \left[ \frac{1}{361} \right]^{1/2} \left[ \frac{2 P_s Q - (2 + m) B Q^{1+m}}{2 (P_s Q^2 - BQ^{2+m})^{1/2}} \right] = 0$$

o sea, resolviendo la raíz:



$$P_S Q = \left( \frac{2+m}{2} \right) BQ^{1+m}$$

Simplificado:

$$P_S = \left( \frac{2+m}{2} \right) BQ^m = \left( \frac{2+m}{2} \right) P_C$$

y finalmente:

$$P_C = \left( \frac{2}{2+m} \right) P_S \quad \dots\dots\dots 1.2.19$$

$$\text{y para } m = 1.8, \quad P_C = 0.53 P_S \quad \dots\dots\dots 1.2.20$$

Como consecuencia de 1.2.8

$$P_b = 1 - \left( \frac{2}{2+m} \right) P_S = \left( \frac{m}{2+m} \right) P_S \quad \dots\dots\dots 1.2.21$$

y para  $m = 1.8$ :

$$P_b = 0.47 P_S \quad \dots\dots\dots 1.2.22$$

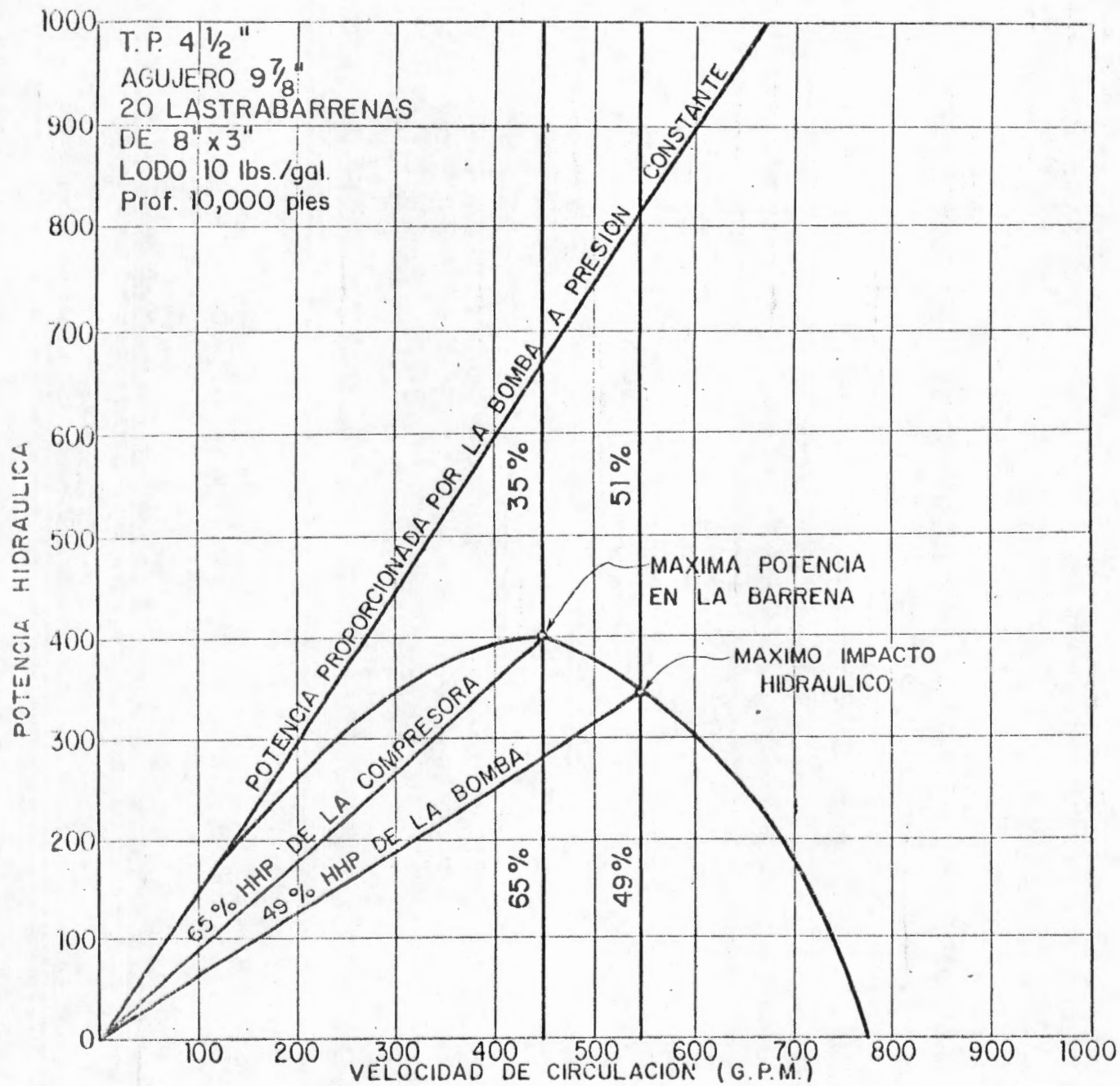


FIG. 4.—COMPARACION DE METODOS DE OPTIMIZACION HIDRAULICA EN LA BARRENA.

### MAXIMA VELOCIDAD DE LAS TOBERAS:

Antes de que se introdujeran las barrenas de chorro, las bombas se operaban usualmente al gasto correspondiente a la mínima velocidad anular requerida para levantar los recortes. Actualmente esta práctica continúa hasta cierto punto.

Si las toberas se calculan de tal forma que la presión superficial (con este gasto mínimo) sea igualado a la presión superficial máxima permisible, entonces la velocidad en las toberas será la máxima que pueda alcanzarse y aún levantar los recortes.

Es decir, la velocidad en las toberas es máxima cuando la caída de presión disponible en la barrena es máxima. Esta caída de presión es máxima cuando la presión superficial es máxima y las pérdidas por fricción,  $P_c$ , son mínimas. Esto ocurre cuando el gasto es mínimo.

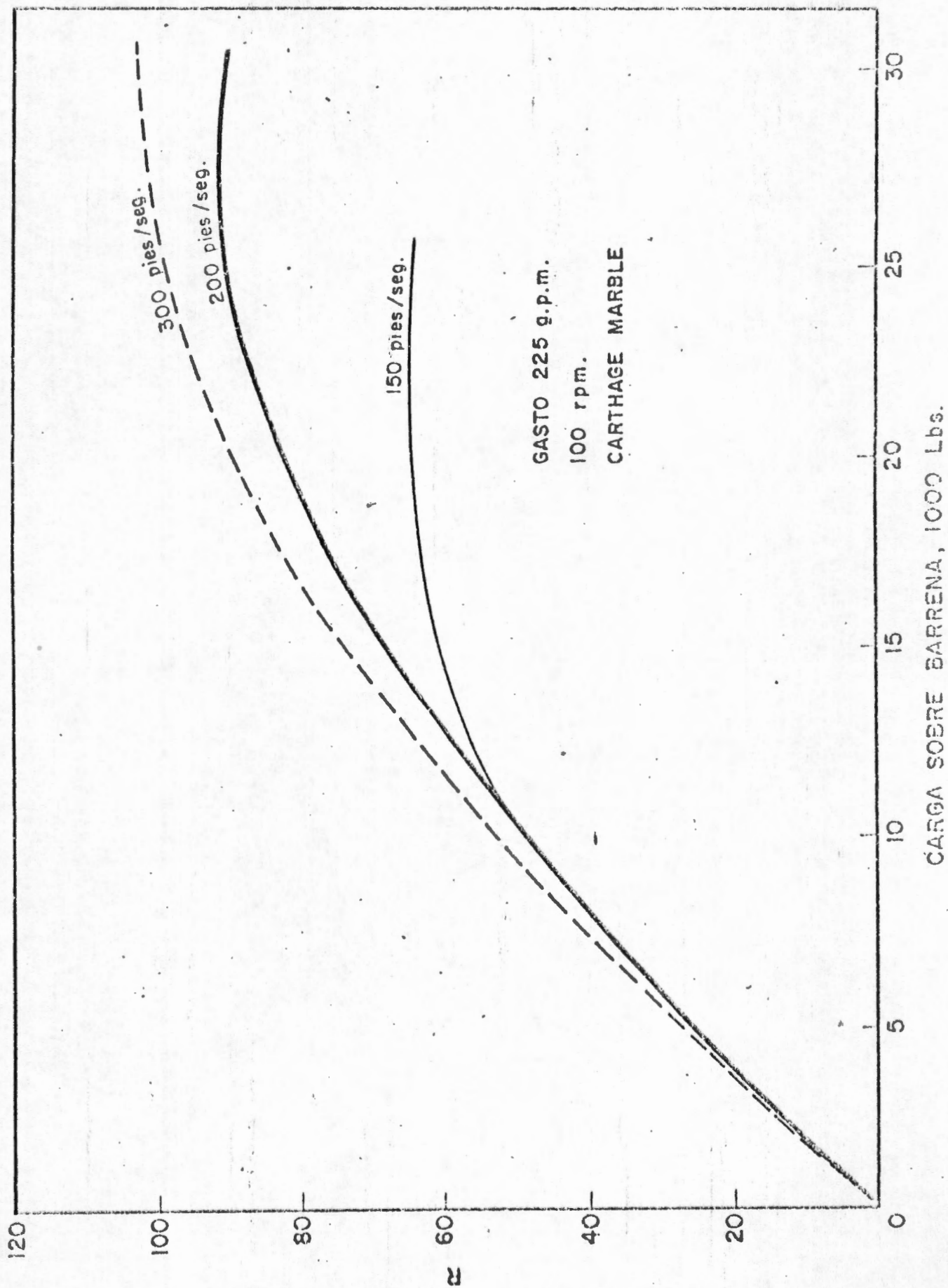
La velocidad en las toberas (en pies/seg) se calcula con la ecuación:

$$v_t = \frac{0.32 Q}{A_t} \quad \text{.....1.2.23}$$

### PROCEDIMIENTOS PARA SELECCIONAR LAS TOBERAS CON AUXILIO DE UN ANALISIS GRAFICO:

El análisis se lleva a cabo representando en forma lineal en coordenadas logarítmicas (Presión contra gasto) la presión de circulación  $P_c$  en función del gasto (e.c.1.2.9).  $P_c$  se obtiene trabajando la bomba cuando menos dos gastos y midiendo la presión en el manómetro ( $P_s$ ); dado que se conoce el área de las toberas, la presión en la barrena se calcula con la (e.c.1.2.7) y por diferencial ( $P_s - P_b$ ) se obtiene  $P_c$ . También se puede calcular utilizando las ecuaciones teóricas para el cálculo de caídas de presión. De igual modo, se grafica una línea de caballaje superficial constante. Esto es el máximo caballaje disponible, con la camisa más pequeña que pueda dar el gasto mínimo requerido para levantar los recortes, a la máxima presión superficial permitida ( $P_s \text{ máx}$ ).

# VELOCIDAD EN LAS TOBERAS VARIABLES





El procedimiento para obtener las condiciones "óptimas" bajo las cuales se seleccionan las toberas, se ilustran en la figura 1.2.5.

La velocidad mínima requerida para limpiar los recortes se puede estimar con la figura 1.2. ó con la ecuación empírica para gastos mínimos:

$$Q_{\min} = 30 D_a \quad \dots\dots\dots 1.2.24$$

Para una velocidad de penetración menor o igual a 13 mín/metro - usa la ecuación:

$$Q_{\min} = 35 D_a \quad \dots\dots\dots 1.2.24b$$

Para avances mayores, úsese:

$$Q_{\min} = 40 D_a \text{ ó bien } 45 D_a \quad \dots\dots\dots 1.2.24b$$

Nunca se use más de 50 gal/mín/pg, ya que gastos mayores dañan a las barrenas y causan erosión y altas presiones en el espacio anular.

Las condiciones para operación adecuada de la bomba y selección de las toberas ocurre en la intersección de la línea que representa  $P_c$  y la trayectoria de hidráulica óptima. Dicha trayectoria tiene 3 segmentos lineales denominados intervalos 1, 2 y 3. el intervalo 1, definido por  $Q = Q_{\max}$  corresponde a la porción somera del pozo, en donde la bomba se opera a la máxima presión permisible y al máximo gasto posible con la camisa empleada y la potencia superficial disponible. El intervalo 2, definido por  $P_c = \text{constante}$ , corresponde a la porción intermedia del pozo, en donde el gasto se va reduciendo gradualmente para poder mantener el cociente  $P_c/P_s$  máx nivel adecuado, según el criterio elegido.

El intervalo 3, definido por  $Q = Q_{\min}$  corresponde a la porción profunda del pozo, donde el gasto se ha reducido al valor mínimo con el que se pueden levantar eficientemente los recortes.

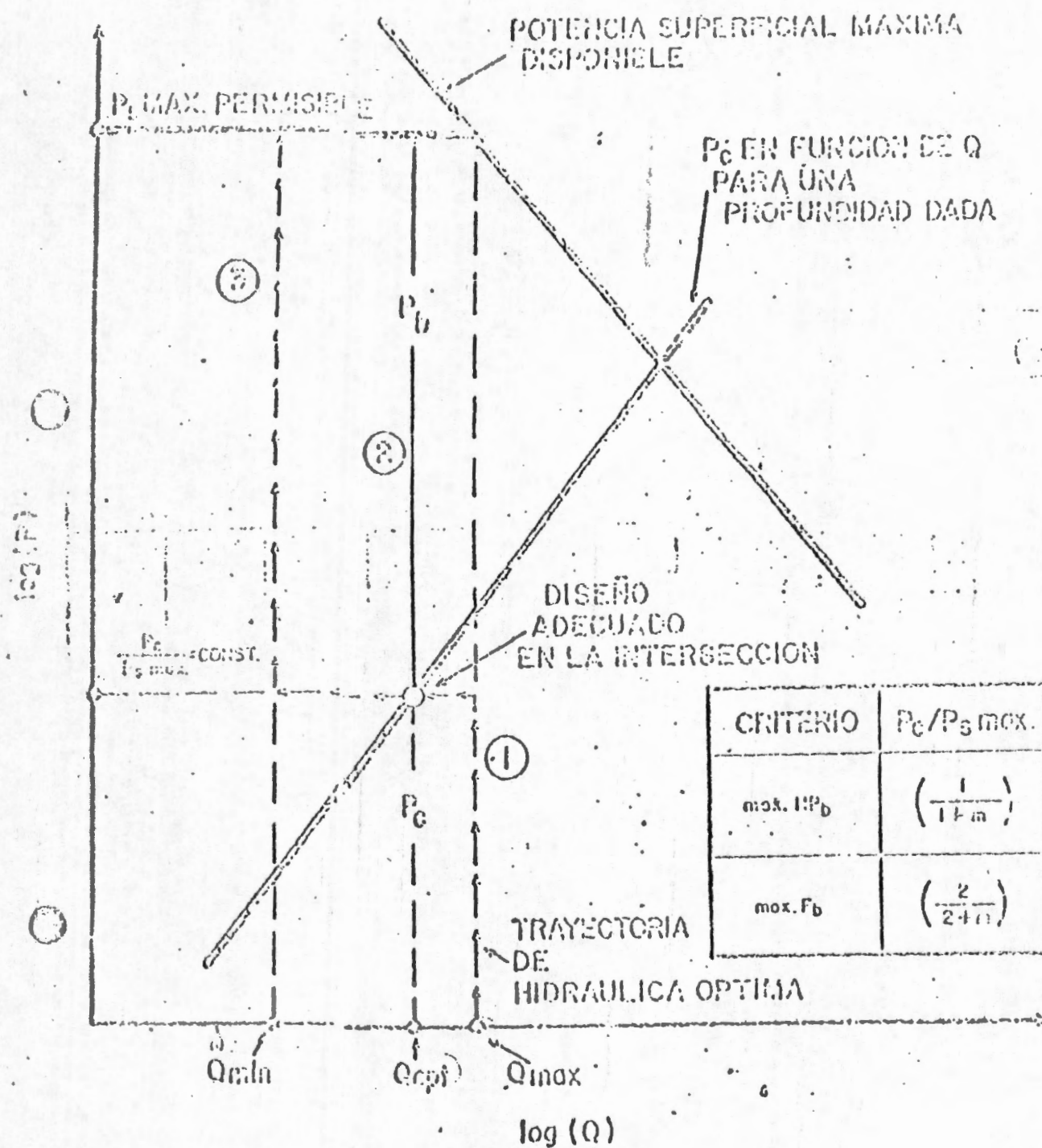


FIG. I.2.5

METODO GRAFICO PARA SELECCION ADECUADA DE LAS CONDICIONES DE BOMBEO Y DE LAS TOBERAS

La caída de presión óptima en la barrena es:

$$P_b \text{ opt} = P_s \text{ m\bar{a}x } P_c \text{ opt} \quad \dots\dots\dots 1.2.25$$

En consecuencia el área óptima de las toberas es:

$$A_t \text{ opt} = \sqrt{\frac{\bar{e} Q^2}{1303 P_b}} \quad \dots\dots\dots 1.2.26$$

TABLA: \*\*\*\* AREA DE DESCARGA DE TOBERAS \*\*\*\*

| Tamano<br>(pg) |   | 7/32  | 8/32  | 9/32  | 10/32 | 11/32 | 12/32 | 13/32 | 14/32 | 15/32 | 16/32 | 18/32 | 20/32 | 22/32        |
|----------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| No de<br>jets  |   | 0     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2            |
| 0              | 0 | 0     | .0752 | .0982 | .1212 | .1534 | .1855 | .2208 | .2992 | .3007 | .3431 | .3927 | .4970 | .5135 0.7424 |
| 7/32           | 1 | .0376 | .1129 | .1358 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |              |
| 8/32           | 1 | .0491 | .1243 | .1473 | .1733 |       |       |       |       |       |       |       |       |              |
| 9/32           | 1 | .0521 |       | .1663 | .1864 | .2155 |       |       |       |       |       |       |       |              |
| 10/32          | 1 | .0767 |       |       | .2010 | .2310 |       |       |       |       |       |       |       |              |
| 11/32          | 1 | .0928 |       |       | .2462 | .2784 | .3137 |       |       |       |       |       |       |              |
| 12/32          | 1 | .1104 |       |       |       | .2961 | .3318 | .3697 |       |       |       |       |       |              |
| 13/32          | 1 | .1296 |       |       |       |       | .3505 | .3889 | .4303 |       |       |       |       |              |
| 14/32          | 1 | .1503 |       |       |       |       |       | .4096 | .4510 | .4955 |       |       |       |              |
| 15/32          | 1 | .1726 |       |       |       |       |       |       | .4737 | .5177 | .5853 |       |       |              |
| 16/32          | 1 | .1983 |       |       |       |       |       |       |       | .5415 | .5890 | .6931 |       |              |
| 18/32          | 1 | .2485 |       |       |       |       |       |       |       |       | .6412 | .7455 | .8621 |              |
| 20/32          | 1 | .3088 |       |       |       |       |       |       |       |       |       | .8038 | .9204 | 1.0492       |
| 22/32          | 1 | .3712 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | .9848 | 1.1137       |
| 24/32          | 1 | .4418 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 1.1842       |



| FORMACION                                           | CLASE | 1        | 2                 | 3                  | 4                   | 5                                           | 6                                | 7                                                | FORMACION                                           | CLASE | 1        | 2                 | 3                  | 4                   | 5                                           | 6                                | 7                                             |
|-----------------------------------------------------|-------|----------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------|----------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------|
|                                                     |       | ESTANDAR | DIENTES<br>CALIB. | INSERTOS<br>CALIB. | BALEROS<br>SELLADOS | BALEROS<br>SELLADOS<br>E INSERTOS<br>CALIB. | BALEROS<br>DE FRICC.<br>SELLADOS | BAL. - DE<br>FRICC. SEL.<br>E INSERTOS<br>CALIB. |                                                     |       | ESTANDAR | DIENTES<br>CALIB. | INSERTOS<br>CALIB. | BALEROS<br>SELLADOS | BALEROS<br>SELLADOS<br>E INSERTOS<br>CALIB. | BALEROS<br>DE FRICC.<br>SELLADOS | BAL. - DE<br>FRICC. SEL.<br>E INSEI<br>CALIB. |
| SUAVE, POCO<br>COMPACTA Y<br>DE ALTA<br>PENETRACION | 1     | OSC-3A   |                   |                    | X3A                 |                                             |                                  |                                                  | SUAVE, POCO<br>COMPACTA Y<br>DE ALTA<br>PENETRACION | 1     | DS       |                   |                    | SDS                 |                                             |                                  |                                               |
|                                                     | 2     | OSC-3    |                   |                    | X3                  |                                             |                                  |                                                  |                                                     | 2     | DT       | DTT               |                    | SDT                 |                                             |                                  |                                               |
|                                                     | 3     | OSC-16   |                   | ODG                | X16                 | XD6                                         |                                  |                                                  |                                                     | 3     | DG       | DGT               | DGH                | SDG                 | SDGH                                        |                                  |                                               |
|                                                     | 4     | OSC      |                   |                    |                     |                                             |                                  |                                                  |                                                     | 4     | K2       |                   | K2H                |                     |                                             |                                  |                                               |
| MEDIO DURA<br>A DURA CON<br>ALTA<br>COMPACTACION    | 1     | OWVOW4   |                   | OOV/OD4            | XV                  | XDV                                         |                                  |                                                  | MEDIO DURA<br>A DURA CON<br>ALTA<br>COMPACTACION    | 1     | V1       |                   | VIH                |                     |                                             |                                  |                                               |
|                                                     | 2     | WO       |                   |                    |                     |                                             |                                  |                                                  |                                                     | 2     | V2       |                   | V2H                | SV                  | SVH                                         |                                  |                                               |
|                                                     | 3     | OWC      |                   |                    | XC                  |                                             |                                  |                                                  |                                                     | 3     | T2       |                   | T2H                | ST2                 |                                             |                                  |                                               |
|                                                     | 4     |          |                   |                    |                     |                                             |                                  |                                                  |                                                     | 4     |          |                   |                    |                     |                                             |                                  |                                               |
| DURA DE SEMI-<br>ABRASIVA A<br>ABRASIVA             | 1     | W7       |                   | WD7                | X7                  | XD7                                         | J7<br>JD7                        |                                                  | DURA DE SEMI-<br>ABRASIVA A<br>ABRASIVA             | 1     | L4       |                   | L4H                | SL4                 | SL4H                                        |                                  |                                               |
|                                                     | 2     | W7R-2    |                   |                    | X7R                 |                                             |                                  |                                                  |                                                     | 2     | W4       |                   | W4H                |                     |                                             |                                  |                                               |
|                                                     | 3     |          |                   |                    |                     |                                             |                                  |                                                  |                                                     | 3     |          |                   |                    |                     |                                             |                                  |                                               |
|                                                     | 4     | WR       |                   | WDR                | XWR                 | XDR                                         | J8<br>JD8                        |                                                  |                                                     | 4     | WC       |                   | WCH                | SWC                 | SV/CH                                       |                                  |                                               |
| MEDIO SUAVE<br>CON BAJA<br>COMPACTACION             | 1     |          |                   |                    |                     |                                             |                                  | J 22                                             | MEDIO SUAVE<br>CON BAJA<br>COMPACTACION             | 1     |          |                   |                    |                     |                                             |                                  |                                               |
|                                                     | 2     |          |                   |                    |                     |                                             |                                  | J 33                                             |                                                     | 2     |          |                   |                    |                     | 2JS                                         |                                  | F                                             |
|                                                     | 3     |          |                   |                    |                     |                                             |                                  |                                                  |                                                     | 3     |          |                   |                    |                     | 3JS                                         |                                  | F                                             |
|                                                     | 4     |          |                   |                    |                     |                                             |                                  |                                                  |                                                     | 4     |          |                   |                    |                     |                                             |                                  |                                               |
| MEDIO DURA<br>CON ALTA<br>COMPACTACION              | 1     | 44 R     |                   |                    |                     | X 44                                        |                                  | J 44                                             | MEDIO DURA<br>CON ALTA<br>COMPACTACION              | 1     |          |                   |                    |                     | 4JS                                         |                                  | F                                             |
|                                                     | 2     | 55 R     |                   |                    |                     | X 55-R                                      |                                  | J 55-R                                           |                                                     | 2     |          |                   |                    |                     | 5JS                                         |                                  | F                                             |
|                                                     | 3     |          |                   |                    |                     |                                             |                                  | J 55                                             |                                                     | 3     |          |                   |                    |                     |                                             | 47 JS<br>57 JS                   | F                                             |
|                                                     | 4     |          |                   |                    |                     |                                             |                                  |                                                  |                                                     | 4     |          |                   |                    |                     |                                             |                                  | F                                             |
| DURA DE<br>SEMIABRASIVA<br>A ABRASIVA               | 1     |          |                   |                    |                     |                                             |                                  |                                                  | DURA DE<br>SEMIABRASIVA<br>A ABRASIVA               | 1     |          |                   |                    |                     |                                             |                                  |                                               |
|                                                     | 2     |          |                   | RG7                |                     |                                             |                                  | J 88                                             |                                                     | 2     |          |                   | 6                  |                     | 6 JS                                        |                                  | F                                             |
|                                                     | 3     |          |                   |                    |                     |                                             |                                  |                                                  |                                                     | 3     |          |                   | 7                  |                     | 7 JS                                        |                                  | F                                             |
|                                                     | 4     |          |                   | FG1                |                     |                                             |                                  |                                                  |                                                     | 4     |          |                   | 8                  |                     | 8 JS                                        |                                  | F                                             |
| EXTREMADAMENTE<br>DURA Y ABRASIVA                   | 1     |          |                   |                    |                     |                                             |                                  | J 99                                             | EXTREMADAMENTE<br>DURA Y ABRASIVA                   | 1     |          |                   |                    |                     |                                             |                                  |                                               |
|                                                     | 2     |          |                   |                    |                     |                                             |                                  |                                                  |                                                     | 2     |          |                   |                    |                     |                                             |                                  |                                               |
|                                                     | 3     |          |                   | RG 2               |                     |                                             |                                  |                                                  |                                                     | 3     |          |                   | 9                  |                     | 9 JS                                        |                                  | F                                             |
|                                                     | 4     |          |                   |                    |                     |                                             |                                  |                                                  |                                                     | 4     |          |                   |                    |                     |                                             |                                  |                                               |

## FACTORES QUE AFECTAN LA VELOCIDAD DE PENETRACIÓN (R).

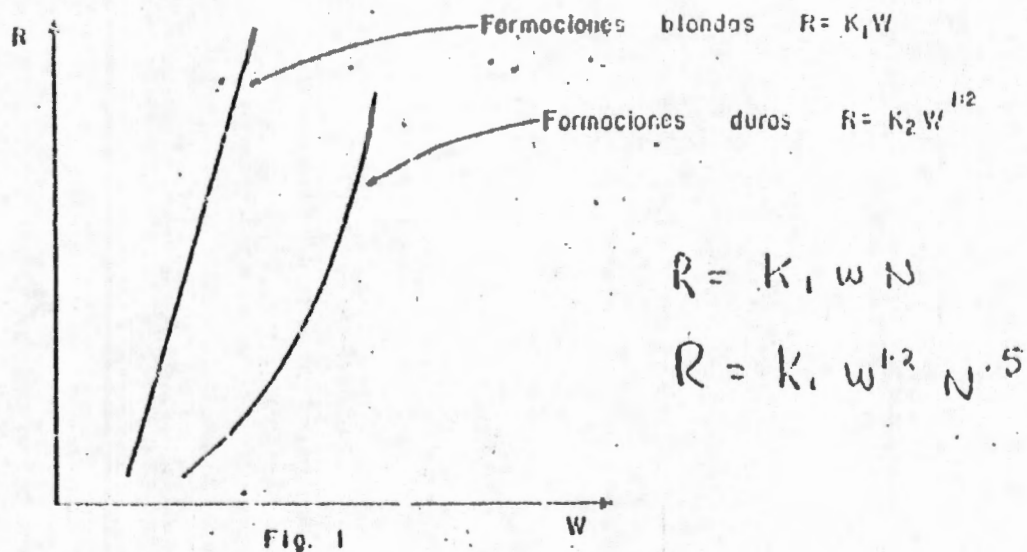
Los principales factores que afectan la velocidad de penetración son:

- 3.2 Tipo de barrena
- 3.3 Tipo de formación
- 3.4 Peso sobre la barrena (W)
- 3.5 Velocidad de rotación (N)

Desde el punto de vista de perforación las rocas se dividen en:

- 1) Blandas
- 2) Medias
- 3) Duras

En forma gráfica la velocidad de penetración en función del peso sobre la barrena para formaciones duras y blandas se da en la fig. (1)



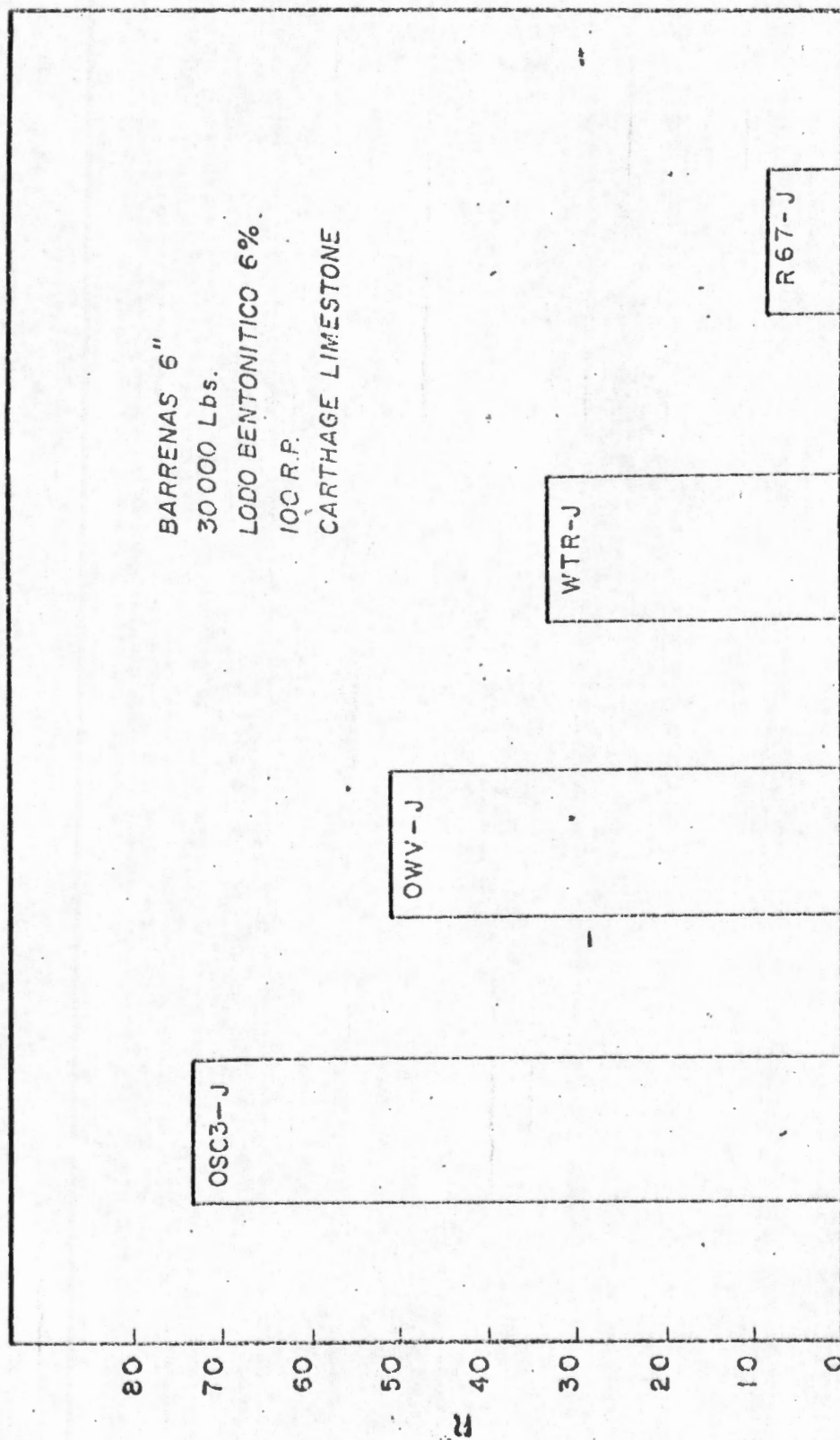
En forma general se puede decir que para formaciones blandas, la velocidad de penetración (R) está controlada principalmente por la velocidad de rotación N, teniendo un efecto menor el peso sobre la barrena, W.

$$R = K_f W N$$

En formaciones duras la variable que más beligerancia tiene sobre la velocidad de penetración R es W, siendo la velocidad de rotación N de menor importancia.

$$R = K_e W^{1/2} N^{0.5}$$

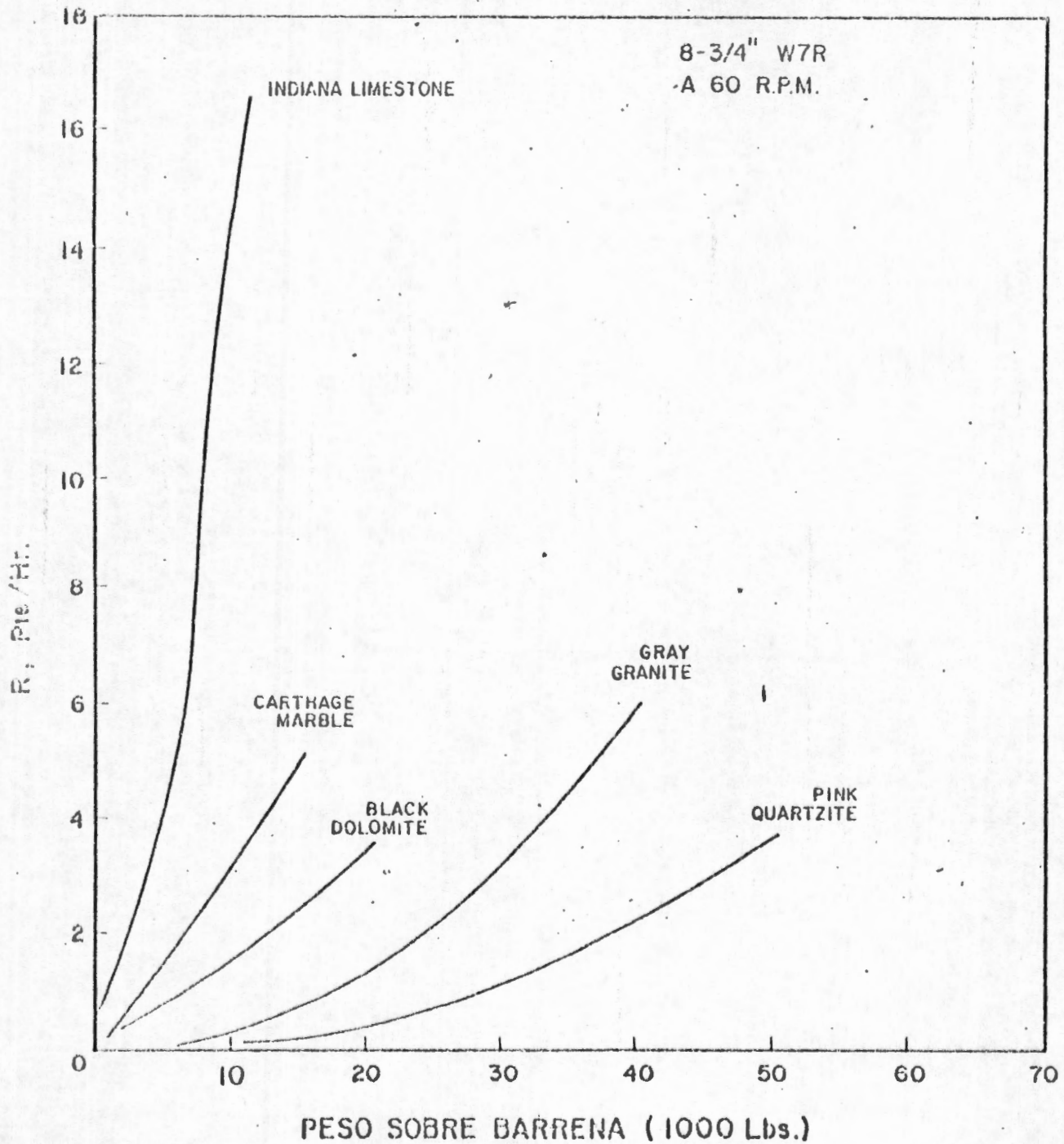
### 3. 25 TIPO DE BARRENA



## FACTORES MECANICOS

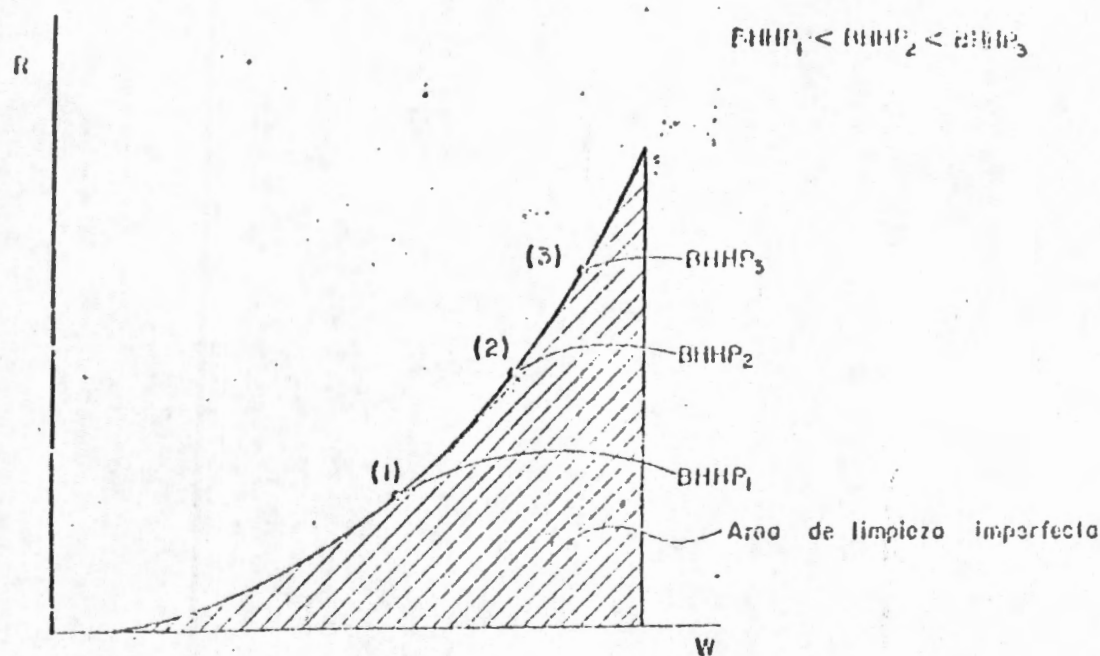
3.4/5 CARGA SOBRE BARRENA

PESO SOBRE BARRENA VARIABLE





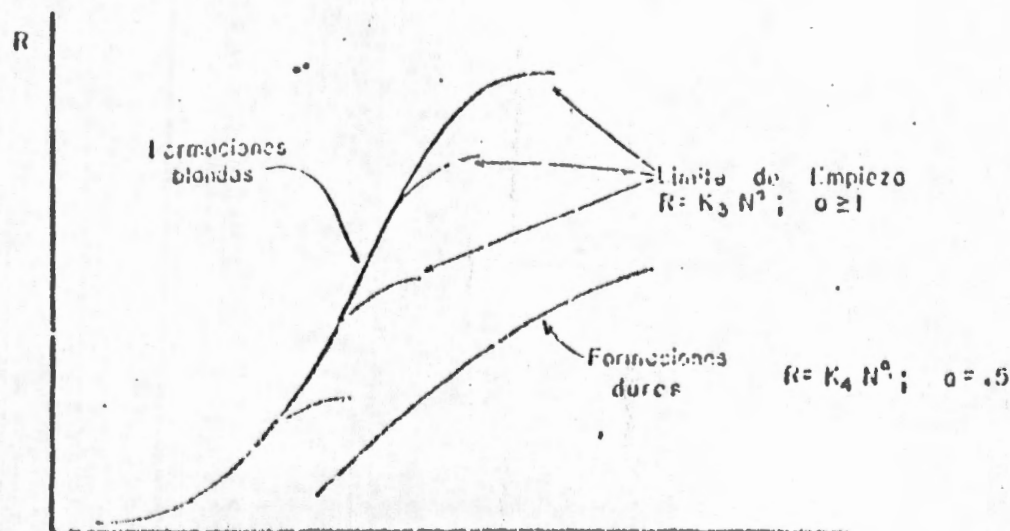
En función de la potencia hidráulica en la barrena la variación de la velocidad de penetración con el peso sobre la barrena se da en la fig. 2



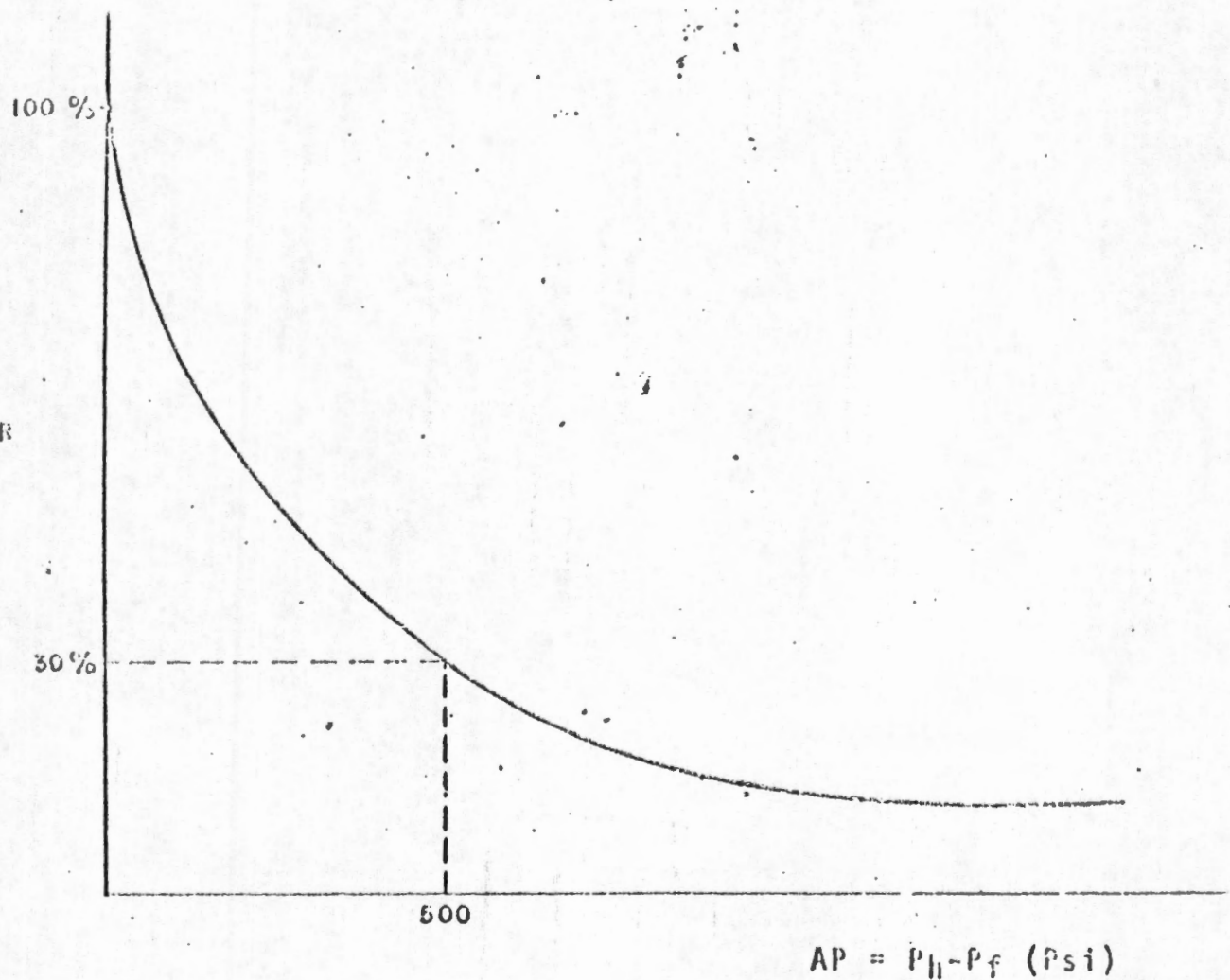
$BHHP$  = Potencia hidráulica en la barrena.

En los puntos (1), (2) y (3) la velocidad de penetración se ve disminuida por embolamiento de la barrena y esto es motivado por una limpieza insuficiente del material cortado por la barrena.

La velocidad de penetración en función de la velocidad de rotación ( $R$ ) se ve afectada de la siguiente manera.



# Efecto de la presión de poro sobre la velocidad de penetración.

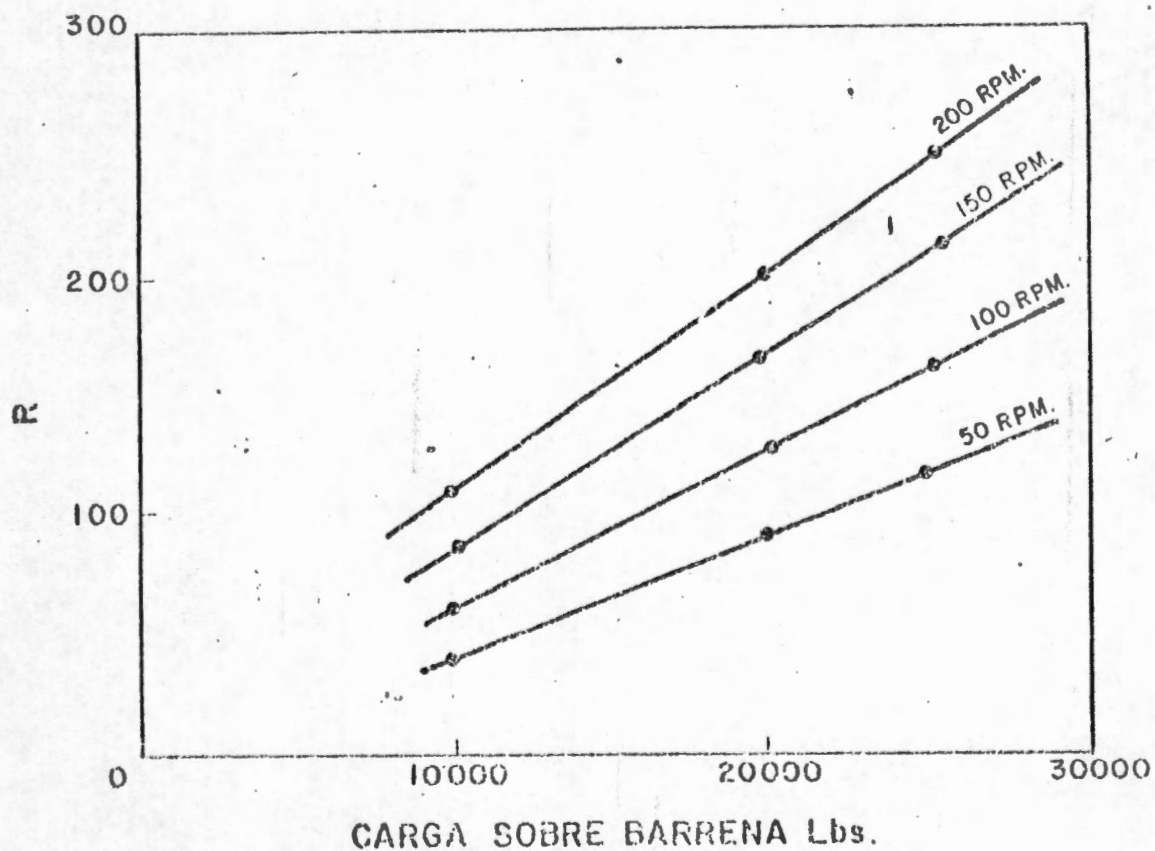
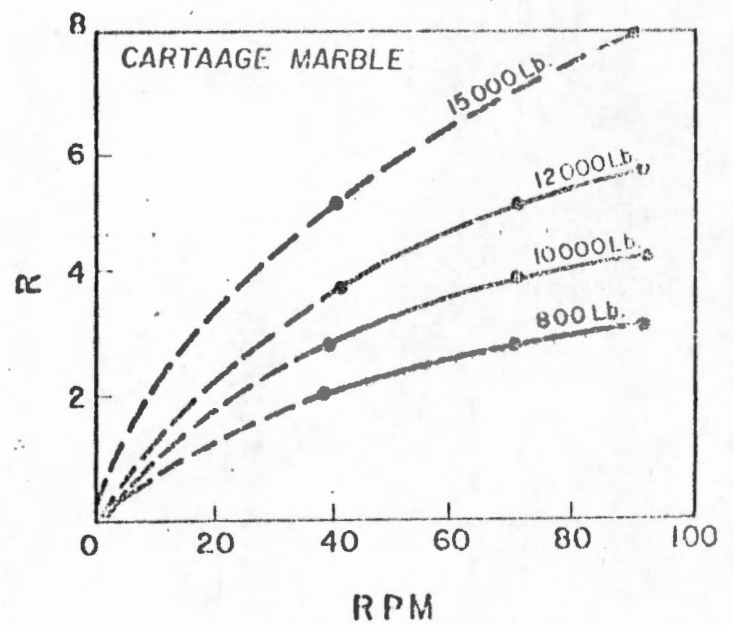
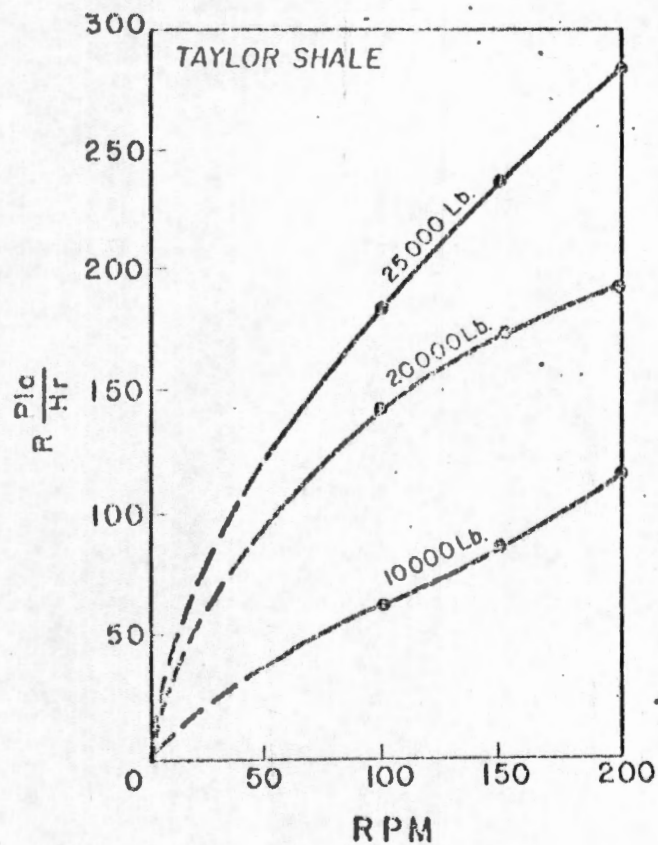


$P_h$  = Presión Hidrostática.

$P_f$  = Presión de Formación.

Se ha comprobado que si la diferencia de presión entre la hidrostática y la presión de poro es de 500 Psi, la velocidad de penetración disminuye en un 70 %.

### 3.5 VELOCIDAD DE ROTACION



### 3.6 EFECTOS DE LAS PROPIEDADES DEL LODO SOBRE LA VELOCIDAD DE PENETRACION

#### a) Viscosidad Plástica.

La viscosidad de un fluido tiene efecto inverso en la velocidad de penetración, la siguiente formulación empírica es útil para estimar el cambio de la velocidad de penetración cuando se varía la viscosidad plástica.

$$R_2 = R_1 (10)^{.003 (PV_1 - PV_2)}$$

Donde:  $R_1$  = Velocidad de penetración (pie/hr.) a condiciones de viscosidad plástica ( $PV_1$ ) en (C.P.)

$R_2$  = Velocidad de penetración cuando se tiene la viscosidad plástica  $PV_2$  en (C.P.)

Ejemplo:

$$R_1 = 20 \text{ pies/hr.} \quad @ \quad PV = 18 \text{ C.P.}$$

Si se baja la PV a 10 C.P.; ¿cuál será la velocidad de penetración?

$$R_2 = R_1 (10)^{.003 (PV_1 - PV_2)} = 20 (10)^{.003 (18 - 10)}$$

$$R_2 = 21.1 \text{ [pie/hr.]}$$

Si además se tienen los siguientes datos

Costo de la barrena = \$ 85,000.00

Costo del equipo = \$ 50,000.00 /hora

$T = 8$  = Tiempo de un viaje redondo a 2,000.00 m.

$Tr = 25$  = Tiempo de operación de la barrena.



¿Cuál será el ahorro que se tendrá por bajar la viscosidad plástica de 18 a 10 C.P. ?

Cálculo del costo bajo las condiciones iniciales

$$\text{Costo}_1 = \frac{85000 + 50000 (25+8)}{20 \times 25} = 3\,470 \text{ \$/pie.}$$

Bajo las segundas condiciones el costo es:

$$\text{Costo}_2 = \frac{85000 + 50000 (25+8)}{21.1 \times 25} = 3\,289 \text{ \$/pie.}$$

$$\text{Ahorro} = (\text{Costo}_1 - \text{Costo}_2) \text{ Profundidad perforada.}$$

$$\text{Ahorro} = (3\,470 - 3\,289) 527.5$$

$$= \$ 95,425.00$$

b) Porcentaje de Sólidos.

Al igual que la viscosidad plástica se puede decir que el porcentaje de sólidos de un fluido de perforación, es inversamente proporcional a la velocidad de penetración. La expresión siguiente es útil para estimar el cambio de la velocidad de penetración, -- cuando se varía el porcentaje de sólidos en volumen.

$$R_2 = R_1 (10)^{.0066 (\% \text{ Vol. Sólidos}_1 - \% \text{ Vol. Sólidos}_2)}$$

c) Porcentaje de Aceite.

El cambio de la velocidad de penetración con variaciones en la -- cantidad de aceite en un fluido de perforación se da con la expresión siguiente:

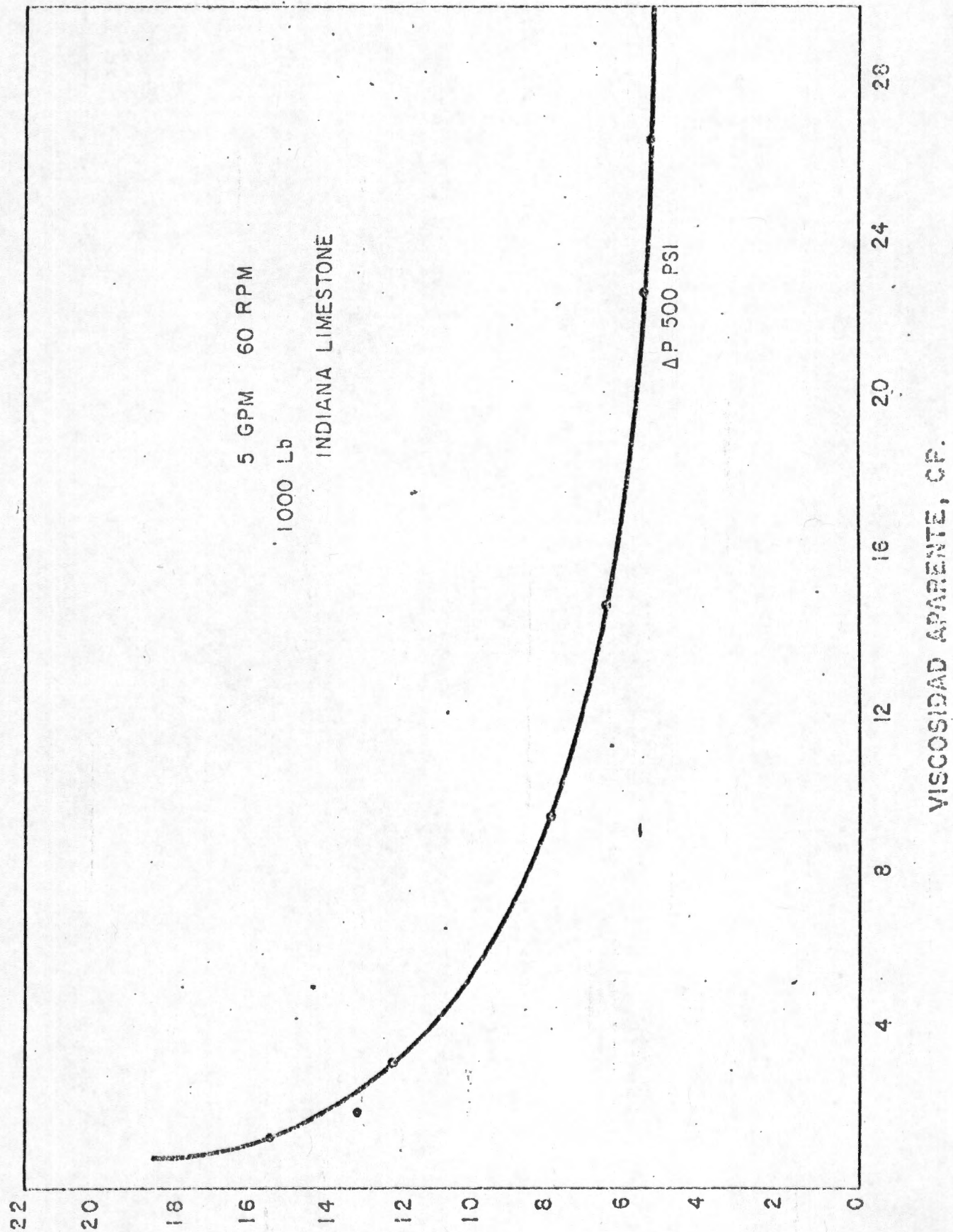
$$R_2 = R_1 \left[ \frac{\text{Sen} (10.6 \times \% \text{ Vol. Aceite } 2 - 4.83) + 10.33}{\text{Sen} (10.6 \times \% \text{ Vol. Aceite } 1 - 4.83) + 10.33} \right]$$

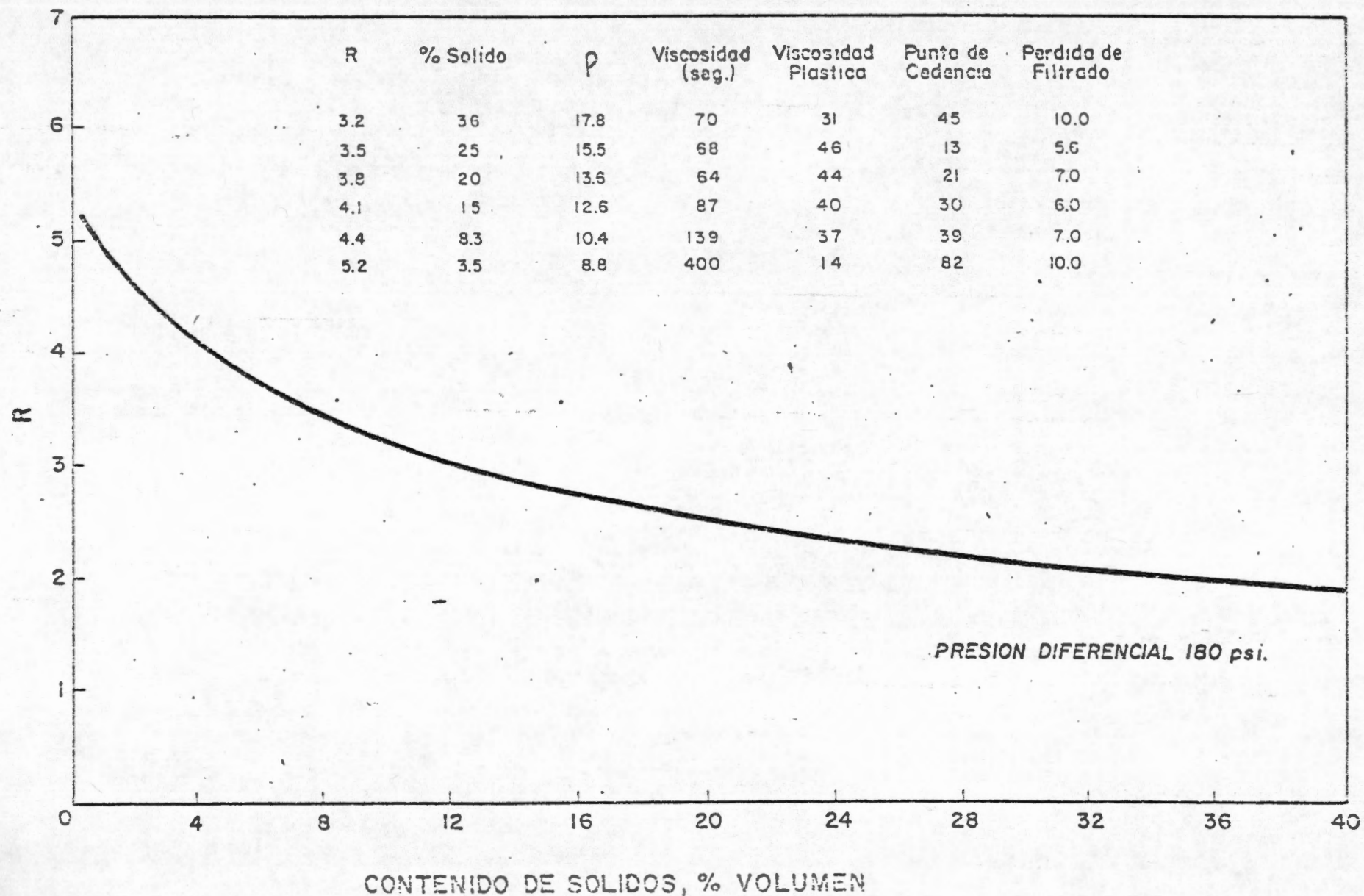
d) Densidad.

la forma como afecta la densidad en la velocidad de perforación es según la expresión siguiente:

$$R_2 = R_1 \left( 1 - 3.1832 (P_1 - P_2) \right)$$

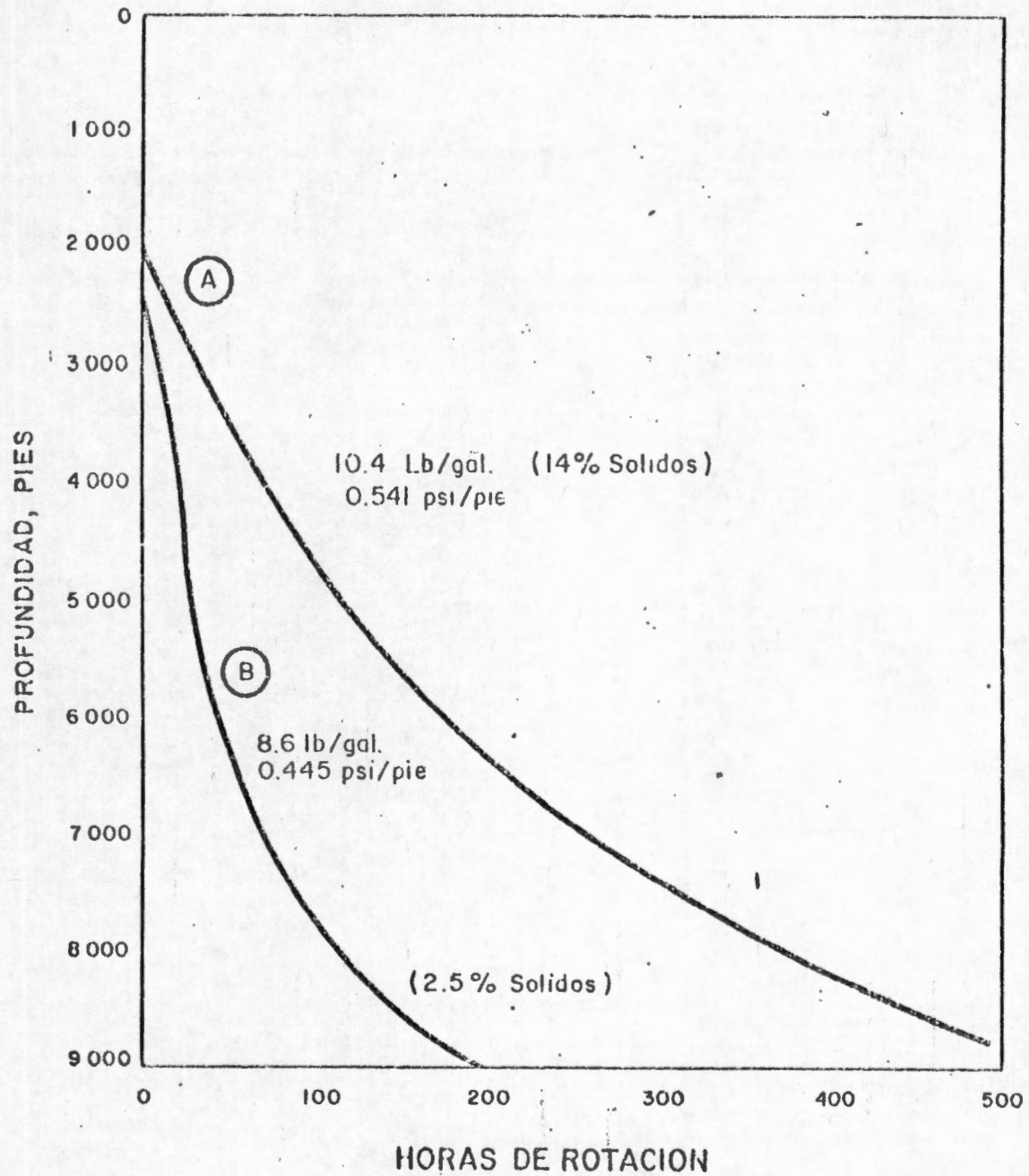
Donde:  $P_1$  y  $P_2$  densidad del fluido en (gr/cc)







## VARIABLE : PESO DEL LODO



Algunos de los factores que afectan al nivel de penetración son:

3.7 Eficiencia del Personal

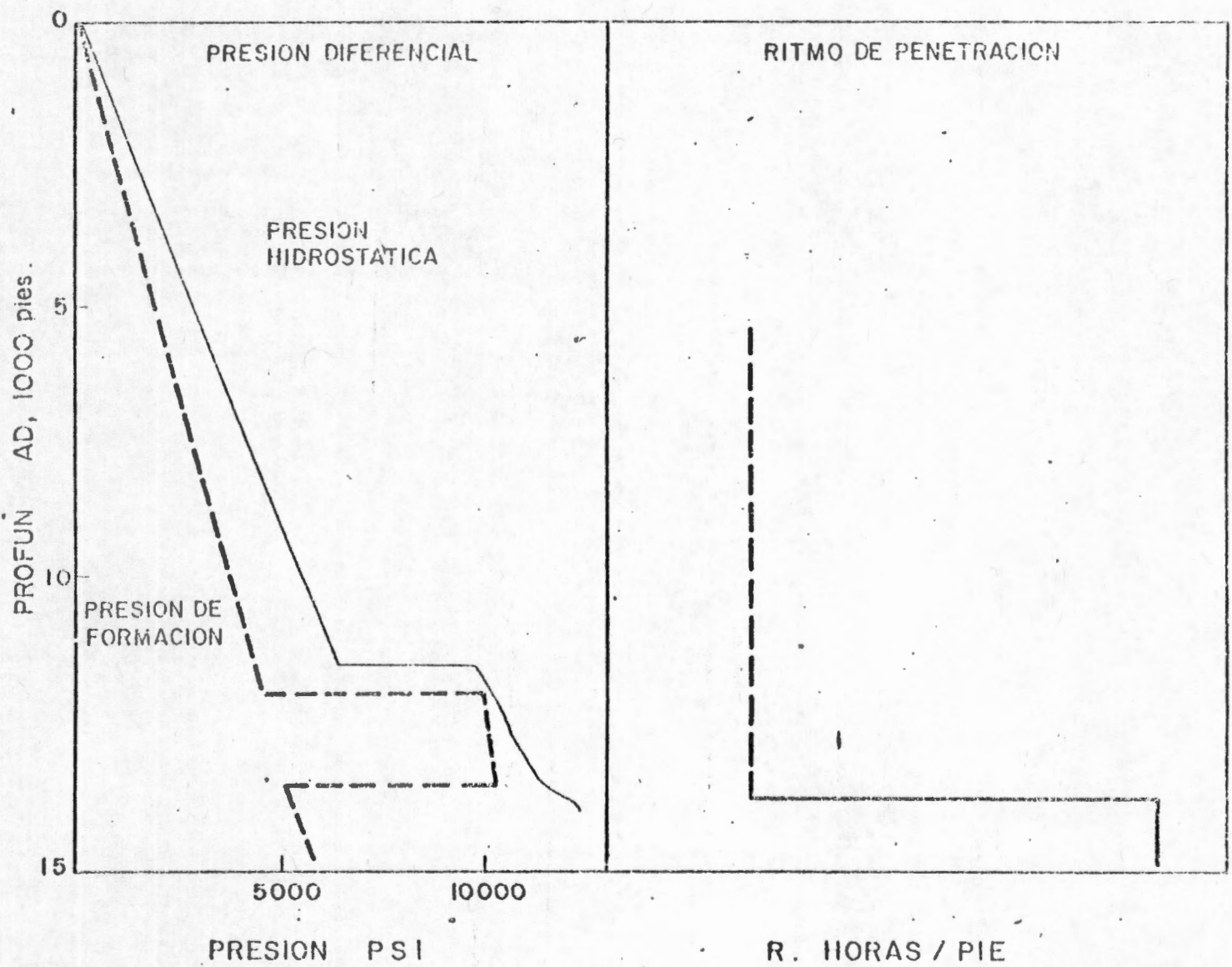
- a) Competencia { experiencia, entrenamiento
- b) Factores psicológicos { relación empresa-trabajador, orgullo en el trabajo, oportunidades

3.8

Eficiencia del Equipo

- Estado, mantenimiento
- Tamaño apropiado
- Facilidad de operación, potencia y automatización

### 3.9 - PRESION DIFERENCIAL



# OPERACIONES ESPECIALES EN REPARACIÓN DE POZOS.

Ing. Rafael Viñas Rodríguez



6.- OPERACIONES ESPECIALES EN REPARACION  
DE POZOS.

6.1.- CEMENTACIONES FORZADAS

6.2.- REPARACION DE POZOS

6.3.- OPERACIONES CON LINEA Y TUBERIA  
CONCENTRICA.

6.4.- SEGURIDAD EN OPERACIONES DE REPARACION  
Y TERMINACION DE POZOS.

6.5.- METODOS DE INDUCCION

6.6.- PERDIDAS DE CIRCULACION

6.1.-CEMENTACIONES FORZADAS

6.11.- OBJETIVO

6.12.- TIPO DE CEMENTO

6.13.- ADITIVOS

6.14.- MITOS

6.15.- PLANEACION DE LAS CEMENTACIONES

6.16.- TECNICAS DE ALTA Y BAJA PRESION

6.17.- HERRAMIENTAS

6.18.- EVALUACION

6.19.- MEDIANTE PRUEBAS CON PRESION

6.20.- INDIRECTAMENTE CON REGISTROS

3.10.- SISTEMA T B T.

## 6.1.- CEMENTACIONES FORZADAS.

### 6.11.- OBJETIVO.

Es una operación en donde una lechada de cemento es forzada mediante una presión diferencial en un punto específico de un pozo con el propósito fundamental de corregir alguna anomalía.

Su aplicación puede ser:

1. Obturar perforaciones que causen una condición indeseable.
2. Corregir fallas de la cementación primaria.
3. Reparar tuberías de revestimiento dañadas.

Es importante hacer notar que la cementación a presión sólo resolverá problemas de comunicación entre la TR y el agujero. No puede resolver un problema de comunicación dentro de la formación.

## 6.12 TIPOS DE CEMENTO.

### CLASIFICACIÓN API DE LOS CEMENTOS.

| Clasificación<br>API | Agua de<br>Mezcla<br>(Gal/sc) | Peso de la<br>lechada<br>(Lbs/gal) | Profundidad<br>del pozo<br>(Pies) | Temperatura<br>Estática<br>(°F) |
|----------------------|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| A                    | 5.2                           | 15.6                               | 0-6000                            | 80-170                          |
| B                    | 5.2                           | 15.6                               | 0-6000                            | 80-170                          |
| C                    | 6.3                           | 14.8                               | 0-6000                            | 80-170                          |
| D                    | 4.3                           | 16.4                               | 6-12000                           | 170-260                         |
| E                    | 4.3                           | 16.4                               | 6-14000                           | 170-290                         |
| F                    | 4.5                           | 16.2                               | 10-16000                          | 230-320                         |
| * { G                | 5.0                           | 15.8                               | 0-8000                            | 80-200                          |
| H                    | 4.3                           | 16.4                               | 0-8000                            | 80-200                          |

\* Para la industria petrolera y puede ser acelerado o retardado para la mayoría de las condiciones de los pozos.

## 6.13 ADITIVOS USADOS EN CEMENTOS.

- . Aceleradores.
- . Reductores de densidad.
- . Densificantes.
- . Retardadores.
- . Reductores de pérdida de fluido

### 6.13.1 ACELERADORES APLICACIONES:

1. Para reducir el tiempo de fraguado.
2. Obtener en tiempos cortos valores altos de resistencia.



3. Se usa ampliamente en la cementación de tuberías superficiales, principalmente donde se tienen temperaturas bajas.

4. En pozos someros y en la colocación de tapones de cemento.

En la tabla 6.3.1 se anotan los materiales comunmente usados como aceleradores.

#### 6.13. REDUCTORES DE DENSIDAD.

Existen tres métodos mediante los cuales se puede lograr reducir la densidad de un cemento:

1. Agregando mayor cantidad de agua.
2. Agregando materiales de baja densidad.
3. Combinando los métodos anteriores.

¿Cómo usarlo?

Seco

Prehidratado.

¿Por qué usarlo?

Reduce el peso

Reduce la pérdida de agua

Reduce los costos

En la tabla 6.32 se anotan los materiales que se usan con este fin.

En la tabla 6.32.a se ven los efectos sobre la resistencia.

TABLA 6.31  
ACELERADORES

| TIPO                                                                    | % en peso<br>usado<br>comúnmente | tipo de<br>cemento | Modo de uso    |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------|----------------|
| Cloruro de Calcio ( $\text{CaCl}_2$ )                                   | 2 - 4                            | Cualquiera         | Seco o en agua |
| Cloruro de Sodio ( $\text{NaCl}$ )                                      | 1.5 - 5                          | Cualquiera         | Seco o en agua |
| Yeso                                                                    | Más de 20                        | Cualquiera         |                |
| Silicato de Sodio<br>( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )                      | 1 - 7.5                          | Cualquiera         | Seco o en agua |
| Cemento con dispersantes<br>mezclados con poca agua.<br>(Alta densidad) | .5 - 1.0                         | Cualquiera         | Seco o en agua |

TABLA 6.32  
REDUCTORES DE DENSIDAD

| TIPO DE MATERIAL          | % en peso       |
|---------------------------|-----------------|
| Bentonita                 | 2 - 16          |
| Atapulguita               | 1/2 - 4         |
| Tierras diatomeas         | 10 - 40         |
| Puzolana                  | 74 lb/sk        |
| Gilsonita<br>(H. Natural) | 1 - 50 lb/sk    |
| Perlita                   | 5 - 20 lb/sk    |
| Silicato de Sodio         | 1 - 7 ó 5 lb/sk |
| Cemento Bentonita         | Variable        |
| Puzolana                  |                 |

Nota: el uso de este tipo de materiales reduce en cierta medida la resistencia del cemento.

TABLA 6.32.a  
EFECTO SOBRE LA RESISTENCIA

| Cemento           | Resistencia a la Compresión<br>24 hs. |       |       |
|-------------------|---------------------------------------|-------|-------|
|                   | 120°F                                 | 150°F | 180°F |
| Puro clase A      | 2800                                  | 4100  | 4900  |
| Clase A+2% Bent.  | 1480                                  | 2075  | 2620  |
| Clase A+4% Bent.  | 750                                   | 1000  | 1300  |
| Clase A+12% Bent. | 300                                   | 500   | 750   |

TABLA 6.33  
DENSIFICANTES

| TIPO DE MATERIAL            | % en peso |
|-----------------------------|-----------|
| Arena Sílica                | 5 - 25    |
| Barita                      | 10 - 108  |
| Ilmenita                    | 5 - 100   |
| (Oxido de fierro y titanio) |           |
| Hematita                    | 4 - 104   |
| Sal                         | 5 - 16    |

TABLA 6.34  
RETARDADORES

| TIPO DE MATERIAL                 | % en peso     |
|----------------------------------|---------------|
| Lignosulfonato de calcio         | 0.1 - 1.0     |
| Lignosulfonato de Sodio y Calcio | 0.1 - 1.0     |
| C M H E C                        | 0.1 - 1.5     |
| Salmuera saturada                | 15 - 17 lb/sk |

TABLA 6.35  
REDUCTORES DE PERDIDA DE FLUIDO

| TIPO DE MATERIAL                                  | % en peso | Forma de uso                  |
|---------------------------------------------------|-----------|-------------------------------|
| Polimeros Orgánicos<br>(derivados de la celulosa) | .5 - 1.5  | Mezclado en seco              |
| Polímeros Orgánicos<br>(dispersantes)             | .5 - 1.25 | Mezclado en seco<br>o en agua |
| C M H E C                                         | .3 - 1.0  | Mezclado en seco              |
| Compuestos de Latez                               | 1 lb/sk   | Mezclado en seco<br>o en agua |
| Bentonita                                         | 12 - 16%  |                               |



6.14 MITOS.

6.14 El cemento "entra" a la formación. (fig. 6.41).

Las partículas del cemento son muy grandes.

Los intersticios muy pequeños. El filtrado de el cemento entra a la formación.

6.14 LA MAYORÍA DE LAS PERFORACIONES "ESTÁN" ABIERTAS.  
(FIG. 6.42).

El proceso de los disparos inicialmente tapona a menos --  
que se tomen precauciones especiales.

Aún con agua moderadamente sucia continua el tapón.

6.14 SE FORMA UN "PASTEL" DE CEMENTO ALREDEDOR DEL POZO  
(FIG. 6.43).

Se requiere fracturar si se desplaza mucho cemento.

Habrán fracturas verticales abajo de los 900 mts. (3000 --  
pies).

Probablemente fracturas verticales abajo de las 450 m. --  
(1500 pies). Puede ser horizontal arriba de las 450 m (1500-  
pies).

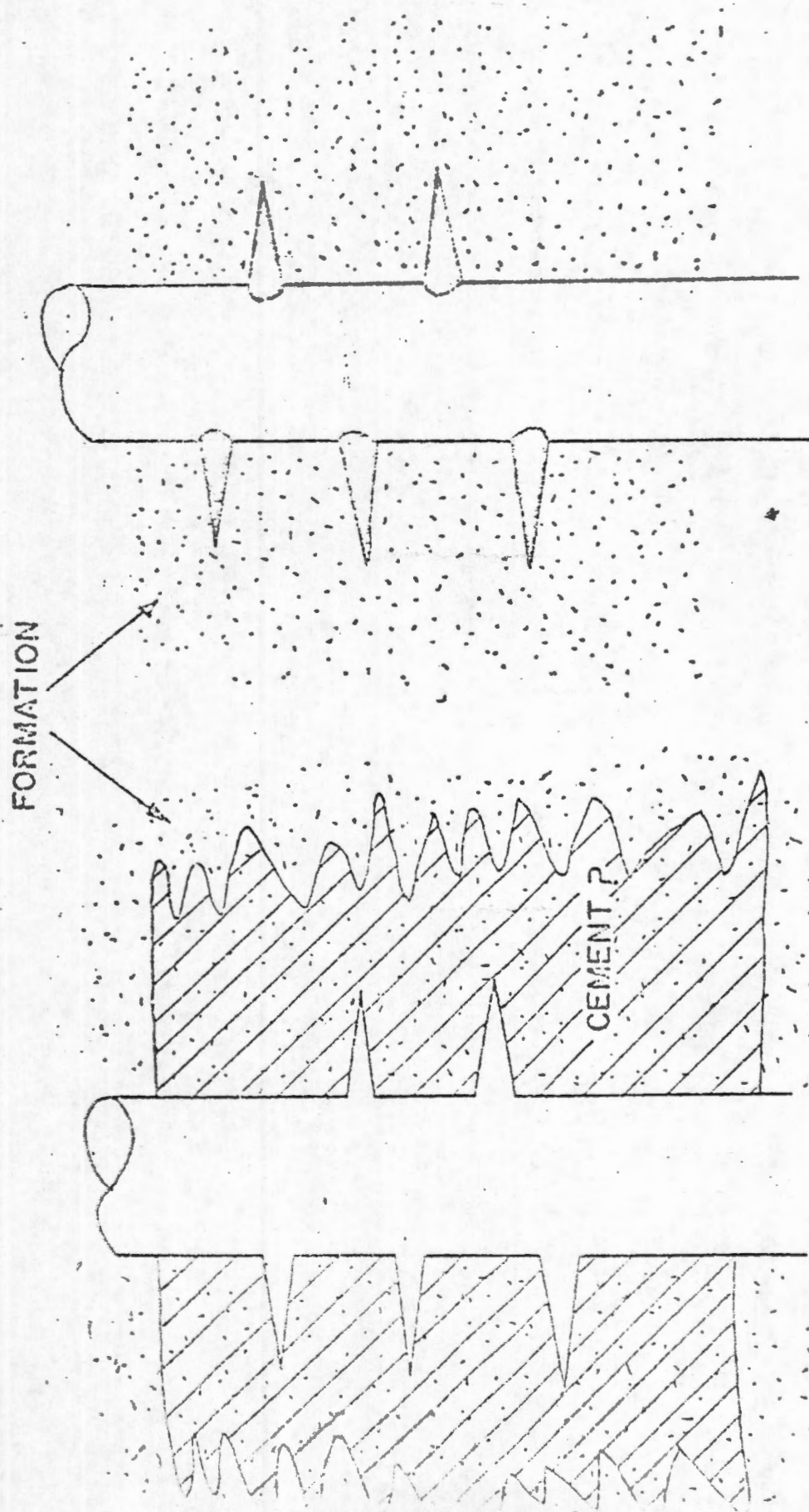


Fig. 6.41. El cemento entra a la formación (mito).

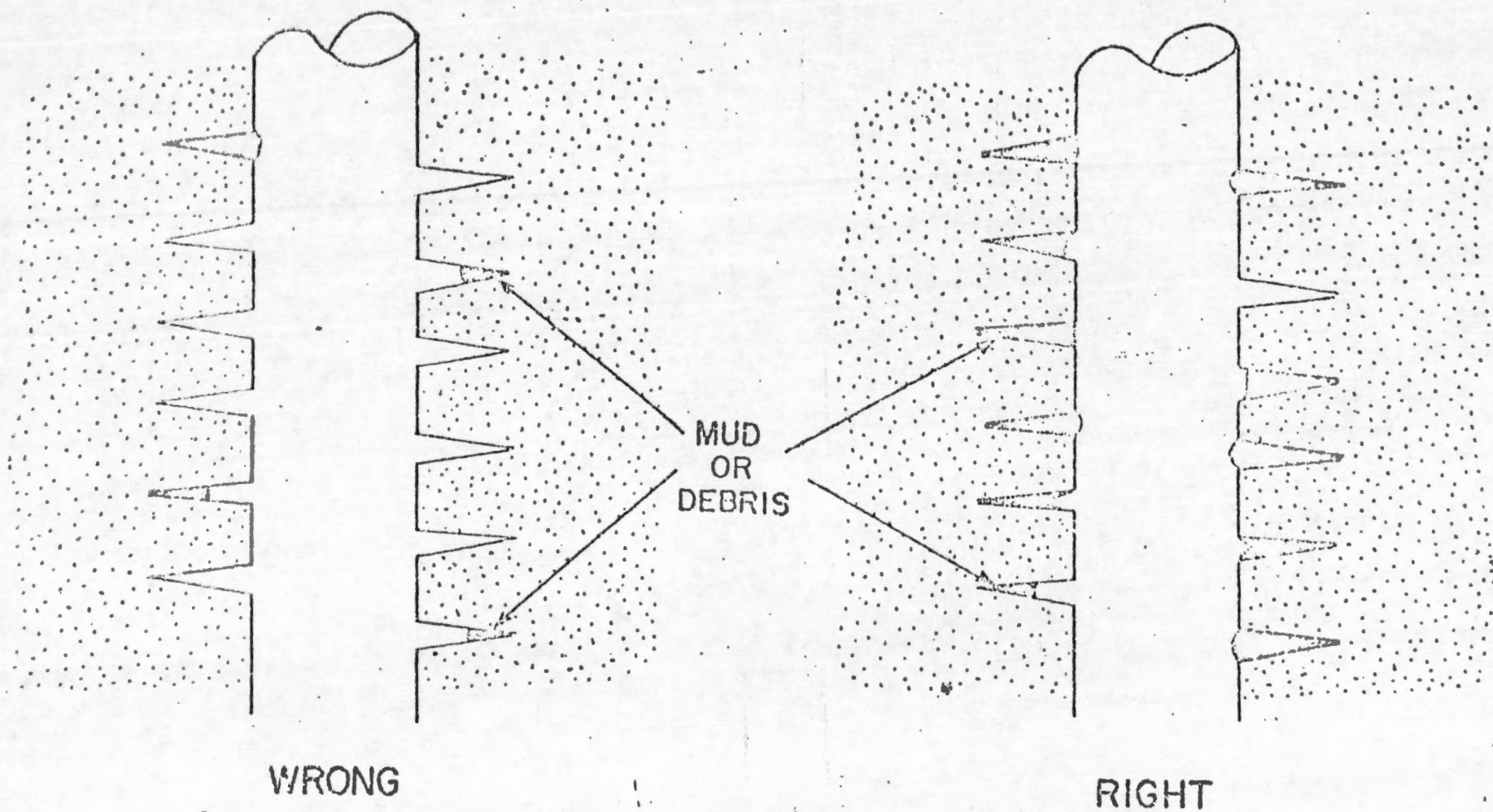


Fig. 6.42 Todas las perforaciones están abiertas. (Mito).

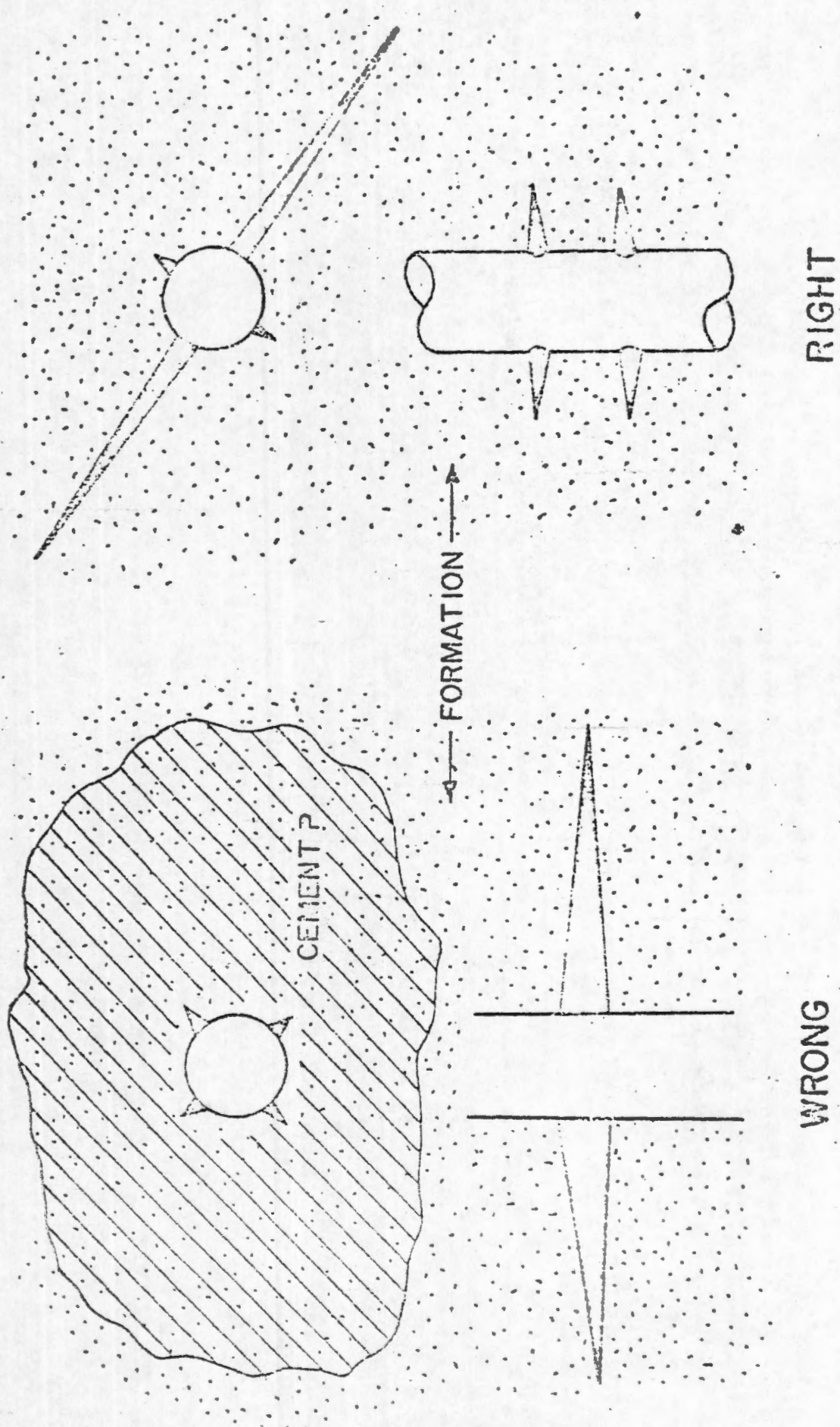


Fig. 6.43. Un "Pastel" horizontal de cemento. (Mito).



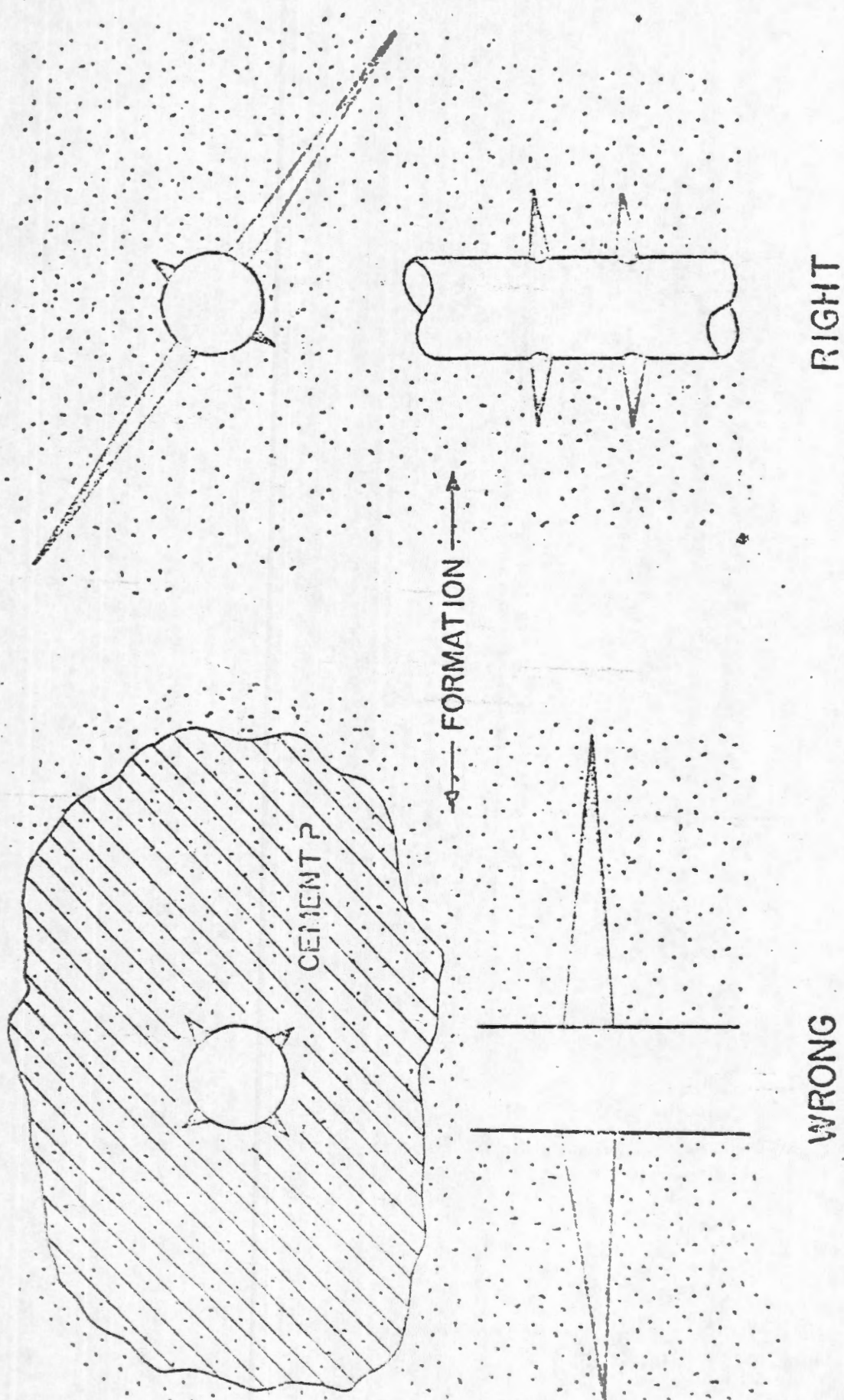


Fig. 6.43. Un "Pastel" horizontal de cemento. (Mito).

## 6.15 PLANEACIÓN DE LAS CEMENTACIONES.

6.15.1. Una salmuera es el fluido ideal para llevar a cabo las cementaciones.

Usar lodo equivale a fracturar la formación al efectuar la prueba de admisión.

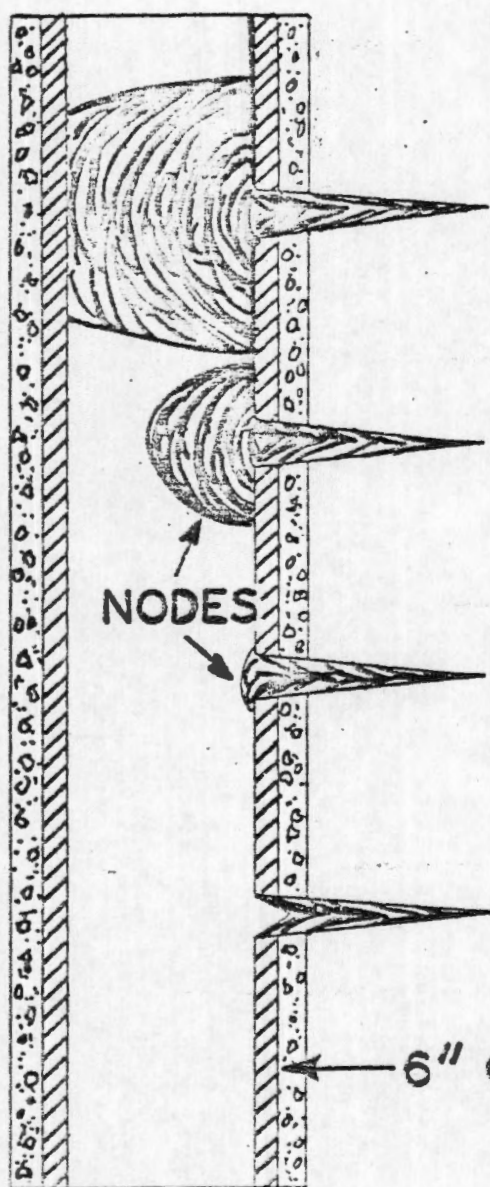
6.15.2. Si el pozo fue disparado con lodo o aunque haya sido disparado con agua se recomienda usar una formulación ácido-surfactante para limpiar las perforaciones y el espacio anular de lodo en lo que sea posible, de tal manera que todas las perforaciones estén limpias y puedan aceptar cemento.

6.15.3. Si se hace una cementación forzada por circulación use tapón mecánico.

6.15.4 Diseño de lechadas:

a. Tiempo bombeable.- depende de la profundidad, presión diferencial, temperatura de fondo; pero entre 2.5 a 4 hrs. es un tiempo de retardación razonable (retardar excesivamente el cemento es riesgoso ya que se pueden ver mermadas sus propiedades de resistencia).

6.15.5. Una filtración de 50-100 cc/30 min. 1000 psi y temperatura ambiente es lo adecuado; la malla del cemento mínima es de 325. Si se tiene pérdida notable en formaciones naturalmente fracturadas, se requiere usar algún obturante para ayudar a formar el enjarre.



## FLUID LOSS

800 ML/30 MIN

150 ML/30 MIN

50 ML/30 MIN

15 ML/30 MIN

6" CASING

Node build-up after a 45 minute squeeze,  
using slurries with different water loss.



#### 6.15.6. ¿Qué es volumen de lechada?

Según el cementing del API la cantidad debe ser fijada según el comportamiento de un campo. Sin embargo, se darán las siguientes reglas de dedo:

1. El volumen de lechada no debe exceder la capacidad de la tubería.
2. Dos sacos de cemento podrían ser usados por pie de intervalo perforado.
3. Un volumen mínimo de 100 sacos es recomendable si después de romper la formación se puede alcanzar un gasto de 2 bls/min. (en una cementación que usa la técnica de alta presión).

#### 6.15.7. ¿Qué presión es la necesaria?

$$P_{max} = Gf \times L - P_h - F_s$$

$P_{max}$  = presión superficial máxima permisible

$Gf$  = gradientes de fractura

$P_h$  = presión hidrostática (máximo de lechada más fluido desplazante).

$F_s$  = Factor de seguridad  $\approx$  300 psi - 500 psi.

La presión mínima que se recomienda es una presión ligeramente superior (300 psi aprox.) a la presión requerida para dar circulación inversa, y así asegurar que quede en condiciones estáticas.



6.15.8. Procedimiento de operación normal.

1. Mezclar
2. Colocar el cemento
3. Formar el enjarre
4. Regresar el exceso
5. 6 horas es suficiente como tiempo de fraguado
6. Evaluación. Limpie el cemento y aplique presión, si falla es que las perforaciones quizá no estaban bien limpias y no les entró cemento, aplique un bache lavador y repita la recementación, tome RSC.

6.15.9. Factores que alteran de cemento en el pozo en cuanto a su:

Resistencia

Temperatura  
Presión  
Densidad  
Tiempo  
Deshidratación

Contaminación con lodo  
Aditivos  
Disparos  
Agua de la Formación

Bombeabilidad

Mezcla de Agua  
Temperatura  
Presión  
Densidad  
Velocidad de desplazamiento  
Deshidratación  
Contaminación del lodo  
Aditivos

6.16. TÉCNICAS DE ALTA Y BAJA PRESIÓN.

a) Técnica de alta presión.

Este método considera la ruptura de la formación. La

lechada es bombcada dentro de la fractura creada hasta que se alcanza una presión superficial (una presión mayor que el esfuerzo de confinamiento pero menor que la presión de ruptura) específica de tal manera que no se tengan regreso de fluidos, este método tiene desventajas teóricamente notables, se entenderán mejor al comentar las ventajas de la cementación a baja presión, una fractura vertical no necesariamente encuentra un canal de flujo dejado por la cementación primaria, la fractura vertical generada puede ser tan alta que alcance zonas de agua o de gas y causar más daño que beneficio.

- b) Técnica de baja presión (técnica de cementos de baja pérdida de fluido).

En este caso el cemento es colocado frente al intervalo por obturar, se aplica una diferencial de presión suficiente para proporcionar la pérdida de agua de la lechada y formar un enjarre de cemento deshidratado en las perforaciones y entre la T.R. y la formación, la presión de fractura de la formación no se debe alcanzar.

El tiempo de formación del enjarre depende principalmente de la permeabilidad de la formación, de las características de pérdida de fluido, de la magnitud de la presión diferencial y del tiempo que dure esta presión aplicada.

Pruebas de superficie indican que se requiere el doble de tiempo para formar un enjarre de cierta magnitud en una formación de 30 md. que en una de 300 md. de permeabilidad.

## 6.17 HERRAMIENTAS.

De acuerdo a la herramienta que se use, las cementaciones forzadas se dividen en:

- a) cementaciones con tubería franca
- b) cementaciones con empacador { Recuperable  
Ver fig. 6.7.1. { Permanente

El método de recementar con tubería franca fue el primeramente utilizado. Consiste en colocar por circulación una cierta cantidad de cemento predeterminado, frente al intervalo por obturar; enseguida se levanta la T.P. fuera de la lechada, se cierra el preventor y las válvulas del cabezal, y se efectúa la inyección hasta que se alcance cierta cantidad, se cierra el pozo y se espera el tiempo de fraguado necesario.

En el método con empacador (usa ya sea tapón mecánico o empacador recuperable) la herramienta se corre hasta cerca de la cima del intervalo por recementar, se efectúa una prueba de inyección a fin de comprobar primeramente la admisión y de terminar la presión de ruptura, enseguida se bombea la lechada hasta obtener la presión requerida, por circulación inversa es desalojada la lechada remanente.

En forma general una cementación forzada se puede llevar a cabo bajo la secuencia siguiente:

1. Baje la herramienta hasta cerca de la cima de intervalo por recementar.
2. Si el fluido de control es lodo, coloque un bache de agua salada o cualquier otro fluido tratado, levante a su posición original y compruebe la admisión y anote la presión de fractura.



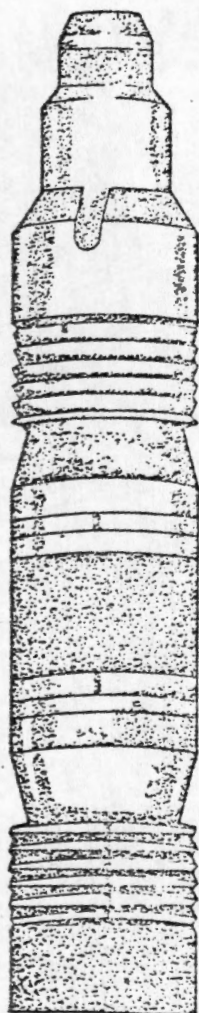


Fig. 3.- Reten de cemento

Fig 6.7.1.

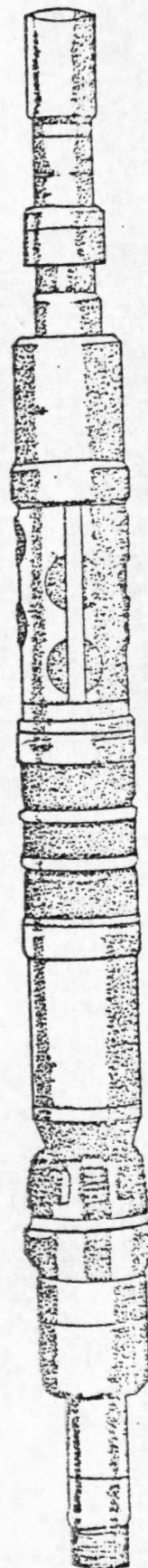


Fig. 4.- Herramienta recuperable  
para cementación forzada



3. Con la junta circulación abierta bombee la lechada -- usando fluidos espaciadores.
4. Cierre la junta de circulación y efectue la inyección de la lechada al ritmo que marque la técnica preestablecida. El incremento de presión indicará la deshidratación del cemento o que la formación de un enjambre de cemento ha ocurrido evitando el flujo de mas filtrado.
5. Sostenga momentáneamente la presión y compruebe las condiciones estáticas.
6. Desanque la herramienta y por circulación inversa desaloje el exceso de cemento.

#### 6.18. EVALUACIÓN:

Evaluación de la cementación.- La prueba de la cementación forzada quedará determinada por los requerimientos de -- las operaciones subsecuentes en el pozo.

##### 6.18.1.. MEDIANTE PRUEBAS CON PRESIÓN.

- a) Aplique una presión hacia la formación por lo menos -- igual a la que será empleada en los fracturamientos -- subsecuentes. Debe de hacerse notar que el represionamiento de la TR no es una indicación positiva del sellado de las perforaciones con cemento, ya que las perforaciones taponadas con lodo también pueden soportar -- una presión diferencial considerable.
- b) Aplique una presión diferencial negativa hacia el pozo por lo menos tan grande como la que se tendrá al producir el pozo.

Si la cementación forzada falla con la presión diferencial hacia el pozo, probablemente se desprendieron algunos tapones de lodo de una o más perforaciones. La solución a este problema es efectuar otra cementación forzada. Esto no debe de considerarse como una indicación de que la lechada de cemento o la técnica de aplicación falló. Con la técnica de cementación de baja pérdida de filtrado, el costo de una segunda o tercera intervención es mínimo.

La prueba se debe hacer al menos con 500 PSI menos que la presión de yacimiento.

Las técnicas más comúnmente usadas para localizar la presencia de cemento detrás de una TR, son:

- 1) Registro de temperatura.
- 2) Registro sónico de cementación (CBL).
- 3) Registro de densidad variable (VDL).
- 4) Registro radioactivo.
- 5) Pruebas de producción.

- 1) Con el registro de temperatura se aprovecha la reacción térmica que genera la deshidratación del cemento.

Con este registro se puede determinar con muy buena precisión la cima del cemento. Sin embargo, no aporta información respecto a la calidad de la adherencia; deberá tomarse entre las 12 y 24 hrs. después de que se haya efectuado la cementación (ver fig. 6.12.1).

- 2) El registro sónico de cementación se basa en un principio acústico y es el más ampliamente utilizado para en forma cualitativa estimar la adherencia del cemento, tiene la limitación de que no da información de la adherencia entre el cemento y la información.

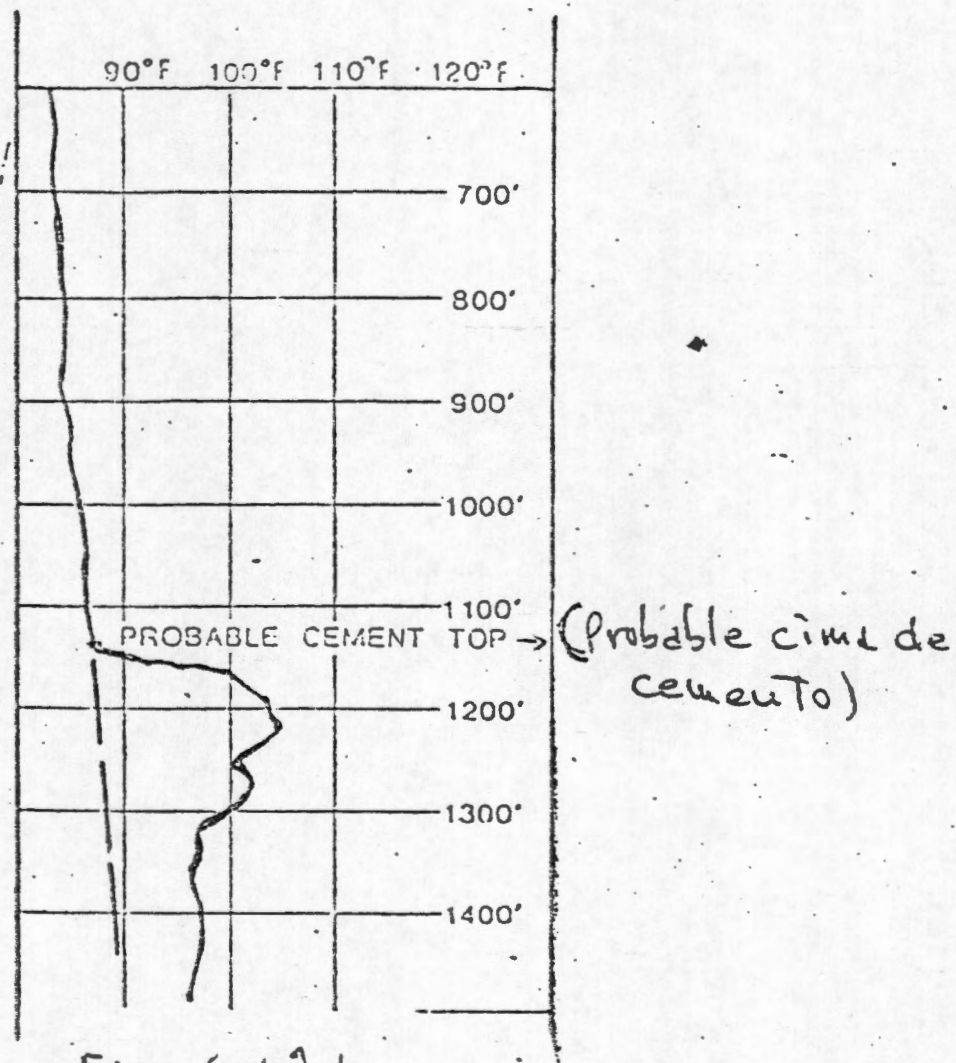


Fig 6.12.1  
REGISTRO DE TEMPERATURA.

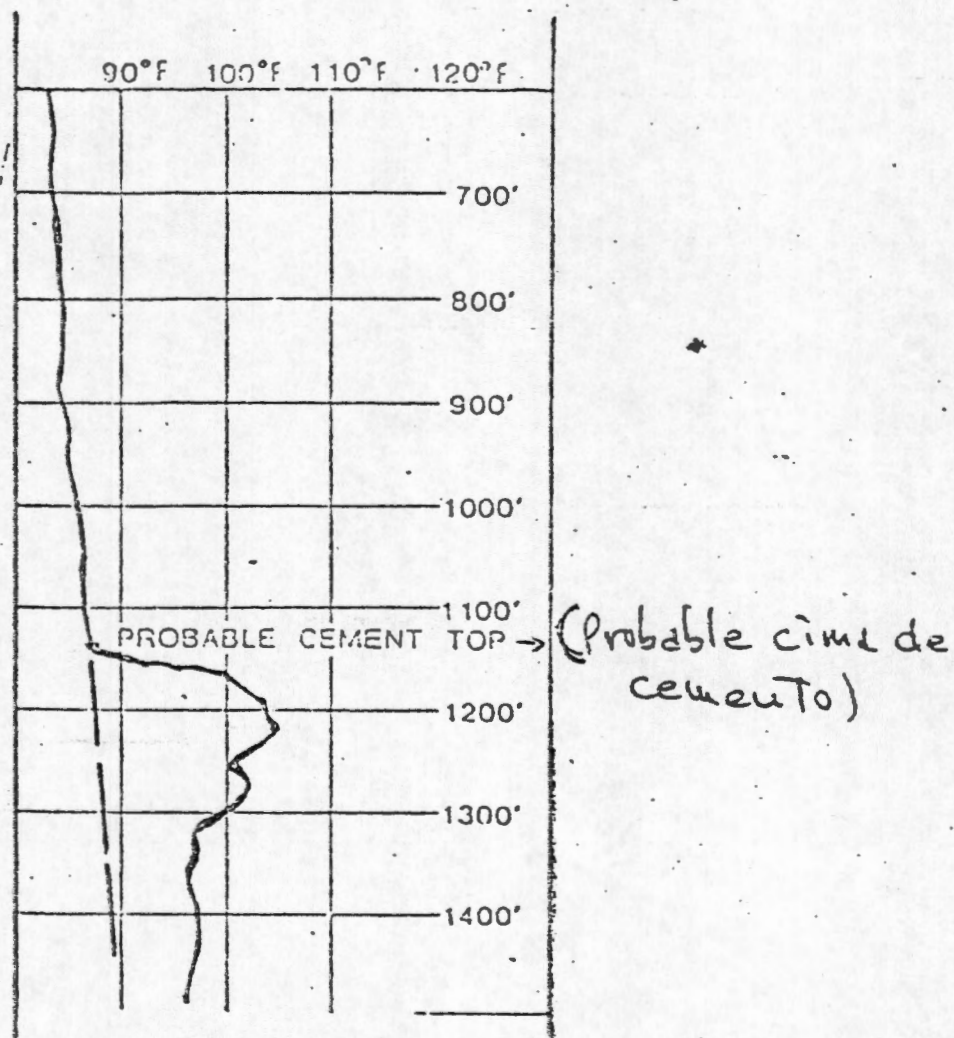


Fig 6.12.1  
REGISTRO DE TEMPERATURA.



La unidad de medida son mili-voltios, lecturas altas indicarán pobre adherencia y lecturas bajas se traducen en una buena cementación. (Ver fig. G.32.2).

Los factores que afectan al registro sónico de cementación son:

- a) Tiempo de toma de registro después de la cementación.
- b) Presión interna de la T.R.
- d) Limpieza interna de la T.R.
- e) Resistencia del cemento.
- f) Calibración = (unidad).
- g) Aditivos.

Se recomienda que el registro (CBL) sea tomado después de 24 ó 36 horas de que se haya efectuado la cementación. En la figura (G.32.2) se ve como afecta el tiempo en los resultados del registro.

Para tomar el registro se requiere que el lodo no esté gasificado.

- 4) El método de trazadores radioactivos consiste en usar junto con el cemento un material radioactivo de vida corta, comúnmente se usa el Iodine 131 o Scandium 46- los cuales tienen vida de 8 y 84 días respectivamente.

Con este método se determina en forma precisa la cima -- del cemento. El trazador se adiciona al cemento como una sal soluble.

Su principal desventaja es que requiere precauciones especiales en su manejo dado que es peligroso a la salud.

También en ocasiones interfiere con otros registros radioactivos que tienen otro propósito. Se requiere haber tomado previo a la cementación un registro de rayos gama para tener información de la radioactividad natural. En la figura - G.32.3 se ve el comportamiento de los trazadores.

- d) Cementaciones Forzadas.

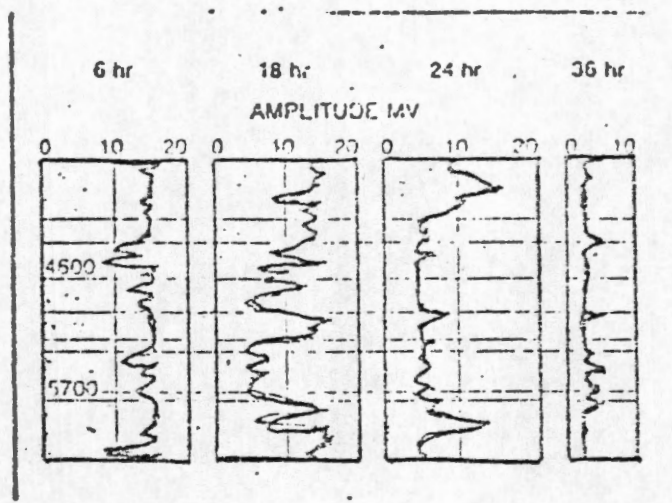


Fig. 6.32.2

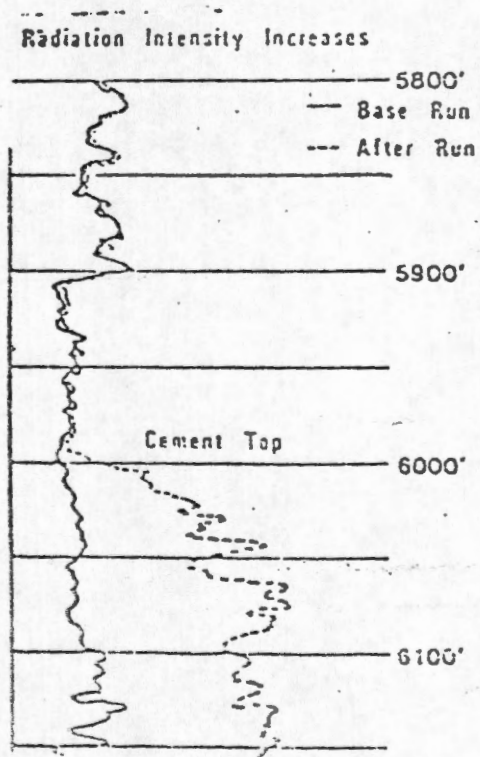


Fig. 6.32.3

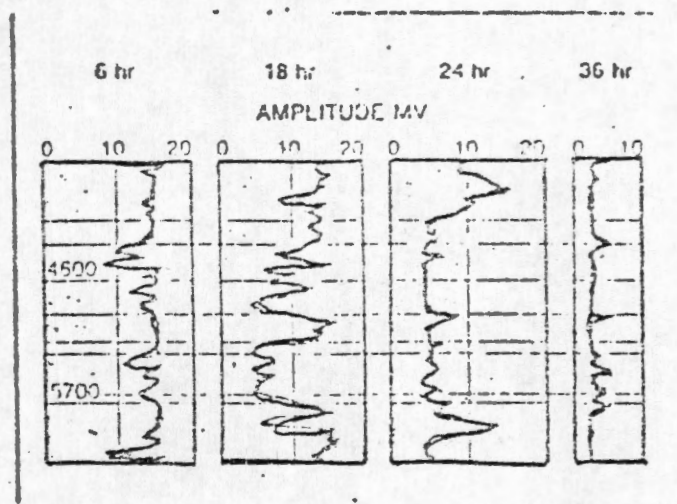


Fig. 6.32.2

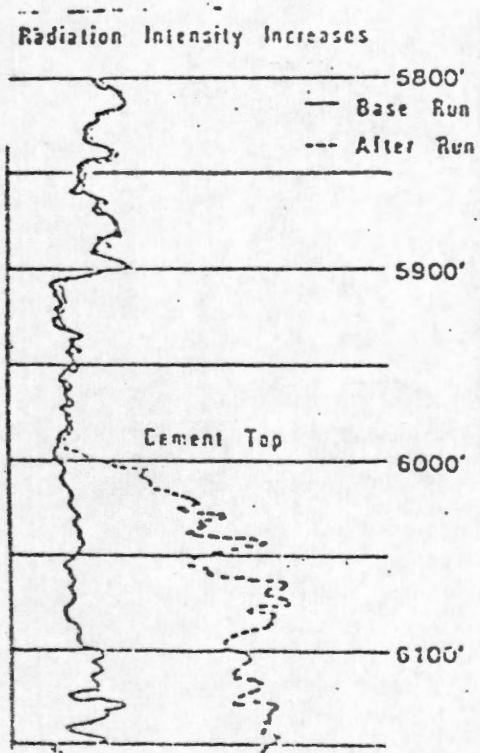


Fig. 6.32.3

- 6.6 PERDIDAS DE CIRCULACION
  - 6.6.1 Introducción
  - 6.6.2 Presiones anormales
    - 6.6.2.1 Detección de presiones anormales
    - 6.6.2.2 Origen de una presión anormal en la formación
    - 6.6.2.3 Métodos para detectar la presión
    - 6.6.2.4 Presiones de poro y gradiente de fracturación en el Golfo de Campeche
  - 6.6.3 Zonas de pérdida
    - 6.6.3.1 Tipos y causas de pérdidas de circulación
  - 6.6.4 Detección de las zonas de pérdidas de circulación
  - 6.6.5 Métodos preventivos y correctivos de pérdidas de circulación
  - 6.6.6 Selección del método para controlar una pérdida de circulación



## 6.6. PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN:

### 6.6.1. INTRODUCCIÓN.

El término pérdidas de circulación se refiere a pérdidas parciales o totales del lodo a la formación, éstas ocurren -- cuando existen aberturas naturales o inducidas en la forma--- ción, suficientes para permitir la entrada de las partículas más grandes del lodo y cuando la presión de la columna del lo do (hidrostática) es más grande que la presión de la forma--- ción.

Cuando ocurre una pérdida, casi siempre es necesario de-- jar de circular hasta que pueda remediarse la pérdida.

Reducciones en el volumen del lodo debido a pérdidas de - filtrado del lodo o llenado de un agujero no se deben confun- dir con pérdidas de circulación.

La solución a la mayoría de estos problemas depende de la identificación rápida del tipo de pérdidas y la localización- del punto de pérdida seguida del tratamiento apropiado para - remediarla.

### 6.6.2. PRESIONES ANORMALES.

#### 6.6.2.1. DETECCIÓN DE PRESIONES ANORMALES.

Es fundamental detectar cualquier presión anormal para la correcta planificación y perforación de pozos. Entre las --- aplicaciones más comunes de los principios de la detección de la presión están disminuir, la frecuencia y severidad de arran- cones y descontroles, reducir las tendencias de los tubos a

atorarse por presiones diferenciales, lodos con pesos mínimos, maximizar las velocidades de penetración y reducir los problemas de daños a la formación que se producen cuando se usan lodos de peso excesivo. Cuando se aplican en forma sistemática, se pueden usar estos principios y técnicas para perforar dentro de un marco de seguridad con tiempo y costos mínimos.

Por definición, una presión anormal es cualquiera que difiera de la tendencia normal establecida para las condiciones dadas. Las variaciones pueden ser (1) menos que la normal, - llamada comúnmente subnormal, ó (2) mayor que la normal, que se conoce como geopresión, superpresión o, sencillamente, presión anormal.

Las presiones subnormales presentan muy pocos problemas directos en el control del pozo. Sin embargo, el lector debe saber que las presiones subnormales causan muchos problemas de perforación y que en forma indirecta pueden producir problemas de control en el pozo. Las presiones mayores que la normal si producen problemas de control en el pozo y, por lo tanto, se discuten en este texto. A fin de no crear confusiones, se usará el término "presión anormal" para identificar cualquier presión que sea mayor que la normal.

#### 6.6 .22. ORIGEN DE UNA PRESIÓN ANORMAL EN LA FORMACIÓN.

La presión normal de la formación en un área es igual a la presión hidrostática de los fluidos naturales de la formación. En la mayoría de los casos, los fluidos varían de agua dulce con una densidad de 8.33 lbs/gal (0.453 psi/pie) a agua salada de 9.0 lbs/galón (0.465 psi/pie). (Sin embargo, cabe señalar que algunos reportes de campo indican casos en los que la densidad normal del fluido de la formación es mayor que 9.0 lbs/gal. Sin importar cual sea la densidad del fluido, se pue

de considerar que una formación con presión normal es un sistema hidráulico abierto en el que la presión se esparce en toda el área.

Las formaciones que presentan presiones anormales no tienen la comunicación libre de presión que se observa en las zonas normales. Si de hecho la tuvieran, las altas presio--nes se disiparían con rapidez y se volverían presiones normales. Por lo tanto se puede concluir que ha de haber algún mecanismo para atrapar la presión antes de que se puedan generar y mantener las presiones anormales. Fertl y Timko<sup>1</sup> --enumeraron varios de los sellos de atrapamiento más comunes-- que se han encontrado en todo el mundo.

Suponiendo que haya un sello de presión, las causas o los orígenes de la presión dependen de factores tales como la litología, la mineralogía, la acción tectónica y los índices de sedimentación. Fertl<sup>2</sup> ha enumerado muchas de las causas de las altas presiones reportadas en el campo (Tabla 6.2). La causa más común que se ha encontrado en todo el mundo es la relacionada con la compactación anormal de los sedimentos. Debido a la frecuencia con que se ha observado este tipo de generación de presión, en esta sección se va a describir en detalle. (Para mayor información con respecto a las otras fuentes de generación de presiones anormales, consulte la Referencia 2.).

#### Tabla 6.2

Orígenes para la generación de presiones anormales de --los fluidos (Según Fertl<sup>2</sup>).

Nivel piezométrico del fluido (sistema de pozos artesianos).

Estructura del yacimiento.



Tabla 6.2 (Cont.)

Represurización de las rocas del yacimiento.

Índice de la sedimentación y ambiente de la depositación.

Paleopresiones.

Actividades tectónicas.

Fallas.

Diapirismo del esquisto.  
(Volcanes de lodo).

Diapirismo de la sal.

Diques de arenisca.

Terremotos.

Fenómenos osmóticos.

Fenómenos diagenéticos.

Diagénesis de sedimentos arcillosos.

Diagénesis de sulfatos.

Diagénesis de cenizas volcánicas.

Depositación masiva de rocas en el área.

Ambiente permanentemente congelado.

Causas termodinámicas y bioquímicas.



La forma en que la matriz rocosa acepta la sobrecarga creciente permite explicar la generación de presiones anormales en este ambiente. Puesto que tanto la depositación en la superficie como la sobrecarga total resultante aumentan, la roca subyacente debe aceptar la carga.

La forma primaria en que la matriz rocosa puede aumentar su resistencia es intensificando el contacto entre grano y -- grano de las partículas individuales de la roca. Esto implica que la porosidad resultante debe disminuir con la profundidad bajo condiciones normales de sedimentación. En la fig. 6.1 se puede ver esta relación, en la que el esfuerzo de la sobrecarga se iguala con la profundidad. Si nó se permite -- que el proceso de compactación de la porosidad siga su curso normal, al no permitir que los fluidos dentro de los espacios de los poros escapen, la matriz rocosa no puede aumentar su contacto entre grano y grano ni su capacidad para soportar la sobrecarga.

Puesto que la sobrecarga total sigue en aumento y la matriz rocosa ya no puede soportar su carga, los fluidos de los poros de la roca, por consiguiente, tienen que empezar a soportar una cantidad anormalmente alta de la sobrecarga que -- produce presiones del fluido más altas que las normales (Fig. 6.2). La profundidad a la que se encuentran porosidades anórmalmente altas, usualmente se presupone es la profundidad inicial a la que se encuentran presiones anormales.

Debe existir el mecanismo de sellado para atrapar las presiones anormales en su ambiente. El mecanismo de sellado más común que se encuentra en las cuencas de depositación conti--nua es la depositación rápida de una capa de roca de baja permeabilidad, tal como una sección limpia de esquisto. El es--quisto reduce el escape normal del fluido produciendo una sub

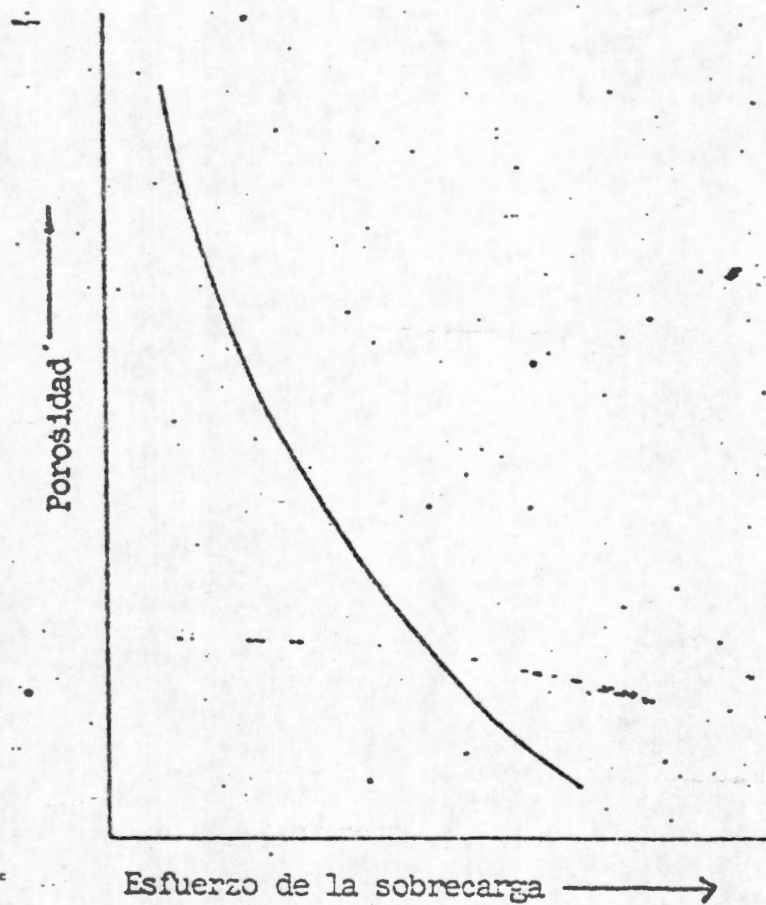


Figura 6.1 Efecto del esfuerzo de la sobrecarga sobre la porosidad de la formación durante la compactación normal.

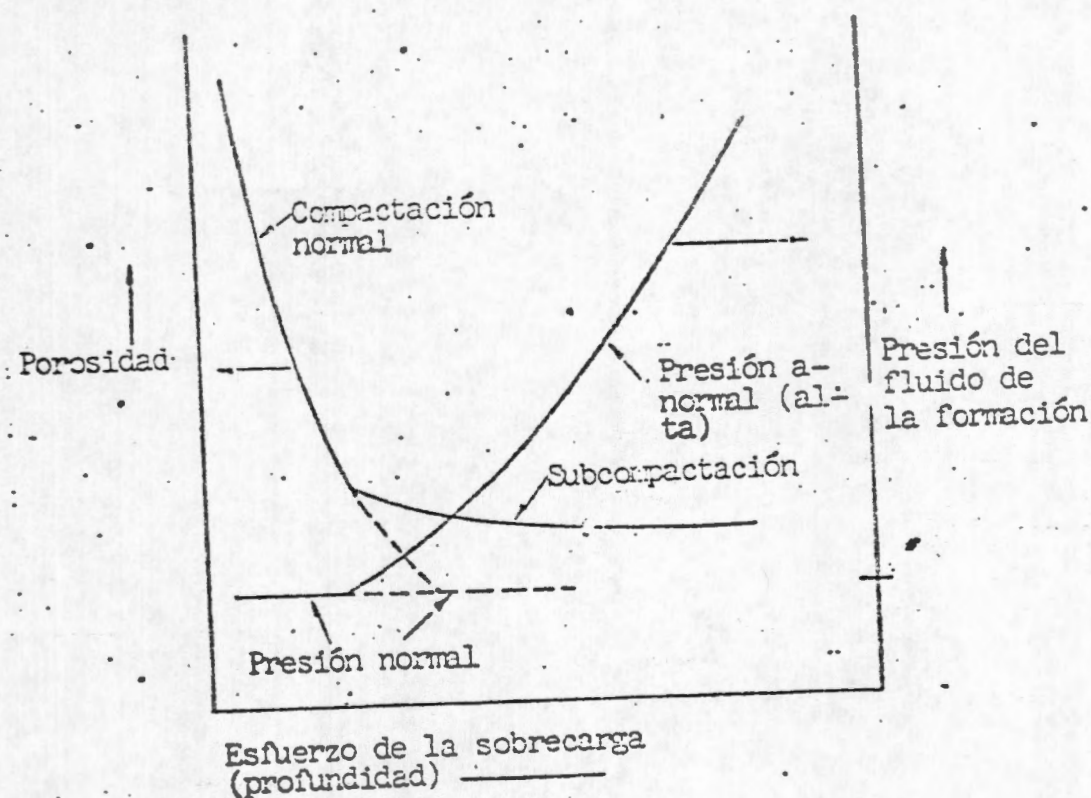


Figura 6.2. La presión del fluido de la formación aumenta por arriba del valor normal a la profundidad en que empieza a ocurrir la sub-compactación.

compactación y presiones anormales del fluido.

La fig. 6.3 ilustra este fenómeno observado por medio del registro eléctrico. En este caso del campo, la sección de esquistos bajo las arenas masivas atrapó los fluidos en los intervalos inferiores y creó gradientes de presión mayores que 0.465 psi/pie.

### 6.6.23. MÉTODOS PARA DETECTAR LA PRESIÓN.

En la actualidad existen muchos métodos que se utilizan -



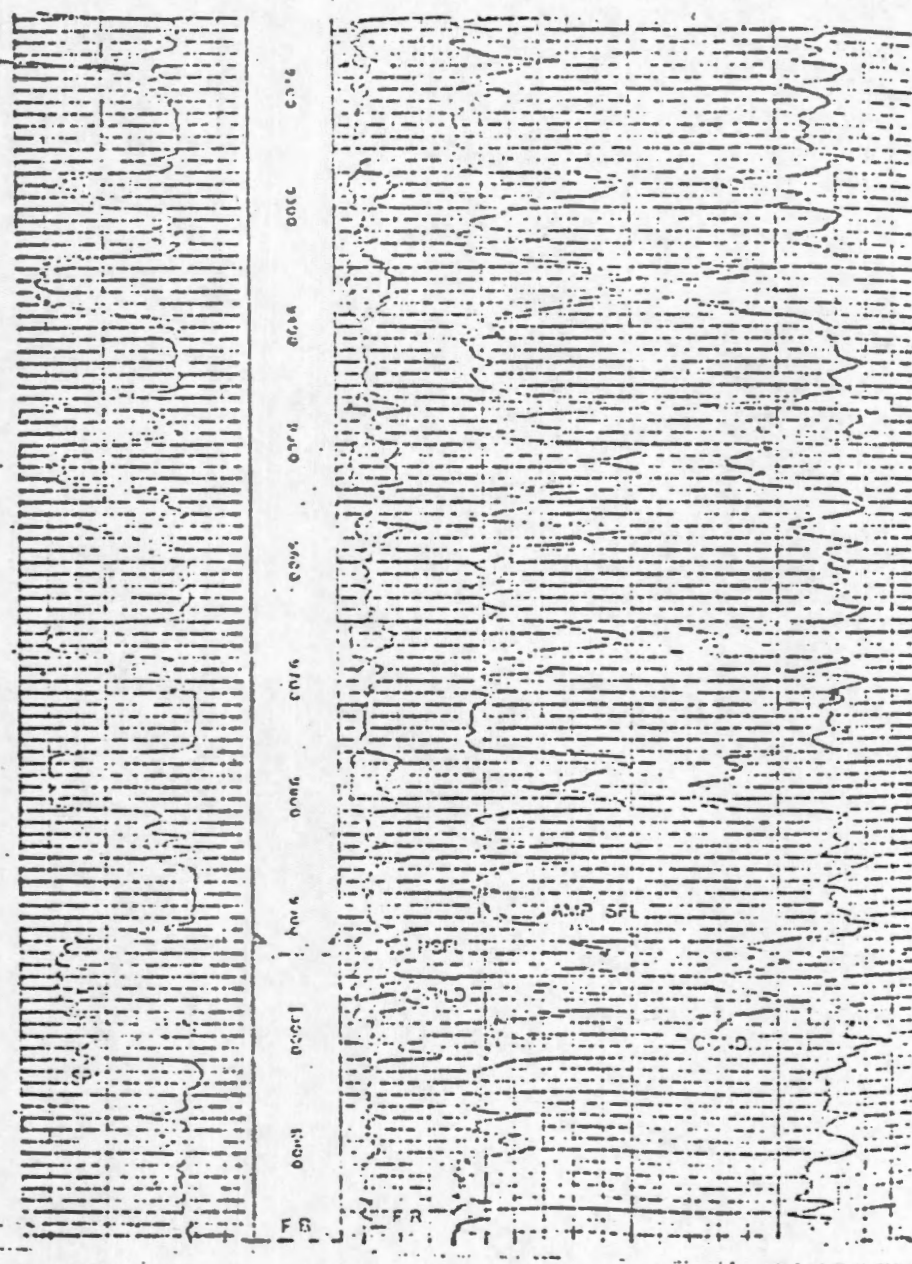


Figura 6.3 Ilustración de un registro eléctrico de un pozo cuya depositación de una barrera de esquisto impermeable generó presiones anormales en los intervalos inferiores. En el pozo, la barrera está desde 10 100 pies.

para predecir, detectar y evaluar las presiones de los fluidos de una formación. Fertl<sup>2</sup> desarrolló un listado representativo de estos métodos (tabla 6.3). La mayoría de los métodos incluidos en esta lista se pueden subdividir en métodos -



de detección cualitativa o cuantitativa, como se indica en -  
la tabla 6.4. La tabla 6.4 sólo contiene los métodos que se  
pueden aplicar durante la fase de perforación de un pozo.

TABLA 6.3. TÉCNICAS DISPONIBLES PARA PREDECIR, DETECTAR Y EVALUAR SOBREPRESIONES (SEGÚN FERTL).

| FUENTE DE LA INFORMACIÓN  | INDICADORES DE PRESIÓN                                                                                                                                                                                                                  | MOMENTO EN QUE SE HIZO EL REGISTRO.        |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Métodos geofísicos        | Sísmico (velocidad de la formación)<br>Gravedad.<br>Magnético.<br>Métodos eléctricos de prospección                                                                                                                                     | Antes de iniciar el pozo                   |
| Parámetros de perforación | Velocidad de perforación.<br>Exponente.<br>Exponente modificado.<br>Ecuaciones de la velocidad de perforación.<br>Registros de la presión de la formación y porosidad al perforar.<br>Registro al estar perforando.<br>Par<br>Arrastre. | Al estar perforando (sin tiempo de demora. |

TABLA 6.3 (CONT.)

| FUENTE DE LA INFORMACIÓN                | INDICADORES DE PRESIÓN                                                                                                                                                                                                                                                     | MOMENTO EN QUE SE HIZO EL REGISTRO.                                                      |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Parámetros del lodo de perforación.     | Introducción de lodo y gas.<br>Peso del lodo en la línea de flujo.<br>Arrancones<br>Temperatura de la línea de flujo.<br>Resistividad, ion de cloruro y otros conceptos nuevos.<br>Nivel del agujero y volumen total del mismo.<br>Llenado del agujero.<br>Gasto del lodo. | Al estar perforando (con demora por el tiempo que se necesita para que regrese el lodo). |
| Parámetros de los recortes de esquisto. | Densidad volumétrica.<br>Factor de esquisto.<br>Volumen, forma y tamaño<br>Diversos métodos nuevos.                                                                                                                                                                        | Al estar perforando (con demora por el tiempo que se necesita para que regrese el lodo). |
| Registro del pozo                       | Prospecciones eléctricas<br>resistividad<br>conductividad                                                                                                                                                                                                                  | Después de perforar.                                                                     |

TABLA 6.3 (CONT.)

| FUENTE DE LA INFORMACIÓN                                | INDICADORES DE PRESIÓN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | MOMENTO EN QUE SE HIZO EL REGISTRO.               |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Registro del pozo.                                      | <p>Factor de formación del esquis-<br/>to.</p> <p>Variaciones en la salinidad.</p> <p>Tiempo de tránsito en los in-<br/>tervalos.</p> <p>Densidad volumétrica.</p> <p>Indice de hidrógeno.</p> <p>Corte transversal de la captu-<br/>ra térmica del neutrón.</p> <p>Resonancia magnética nuclear.</p> <p>Información de la gravedad al<br/>fondo del pozo.</p> | <p>Cuando el pozo ya se probó<br/>o completó.</p> |
| <p>Dispositivos directos para<br/>medir la presión.</p> | <p>Bombas de presión.</p> <p>Prueba de la formación con el<br/>cable de alambre.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                   |



TABLA 6.4. MÉTODOS PARA DETECTAR PRESIONES AL ESTAR PERFORANDO.

MÉTODOS CUALITATIVOS.

Peleontología.  
Correlación del desplazamiento del pozo  
Anomalías en la temperatura.  
Conteo del gas.  
Resistividad del lodo o de los recortes,  
o de ambos.  
Cloruros delta.  
Naturaleza de los recortes.  
Condición del agujero.  
Contenido de los recortes.  
(factor de esquisto).

MÉTODOS CUANTITATIVOS.

Análisis del registro (detección de  
la porosidad)  
resistividad (conductividad)  
sónico  
Densidad volumétrica  
Ecuaciones de la perforación  
exponente " $d_c$ "  
modelos de perforación computarizados  
arrancones.

#### 6.6.24. PRESIONES DE PORO Y GRADIENTE DE FRACTURA EN EL GOLFO DE CAMPECHE.

##### INTRODUCCIÓN.

La perforación balanceada, la profundidad de asentamiento de tubería de revestimiento, el conocimiento de las presiones de poro y gradientes de fractura, son problemas básicos para la adecuada explotación de cualquier yacimiento, ya que el conocimiento de los factores mencionados nos da rapidez de perforación así como un adecuado control de las presiones.

Este trabajo tiene como objetivo la determinación de gráficas que permitan determinar las variables mencionadas, y mapas que faciliten un adecuado control de la perforación, presenta un método de medición continua de gradientes de fractura mediante la utilización de un registro VDL.

La perforación de los primeros pozos exploratorios en el área, determinó una zona de alta presión, la cual con el desarrollo del área se confirmó como una perturbación que abarca la totalidad de los campos perforados en la zona hasta la terminación, de este estudio.

El problema de geopresión ha sido muy estudiado, sobre todo en la costa del Golfo de México en Estados Unidos de Norteamérica, pero en México y hasta la publicación de este trabajo no se contaba con gráficas de gradientes de sobrecarga, todos los cálculos se efectuaban utilizando las gráficas encontrados para los yacimientos del Golfo de México antes señalados.

## COLUMNA ESTRATIGRÁFICA Y COMPORTAMIENTO DE PRESIONES.

El fondo marino está constituido por arenas y lutitas no consolidadas, en algunas áreas con gradientes de fractura muy bajos por arenas intercomunicadas, que van desde los 250 m. - hasta 450 m., más abajo se atraviesa una zona de presión normal y hacia su base que va de 800 a 1300 m., gradua a una zona de transición, para entrar a la zona geopresionada la cual está compuesta por lutitas principalmente y en el fondo por cuerpos de calcarenitas o de carbonatos, para pasar en forma casi siempre brusca a una zona de presión normal, la brecha del Paleoceno. (Cima del yacimiento productor).

La columna normal que se presenta es:

| FORMACION        | PRESION      |
|------------------|--------------|
| Plio-Pleistoceno | baja a       |
| Mioceno          | normal       |
| Oligoceno        | anormalmente |
| Eoceno           | alta         |
| Paleoceno        |              |
| Cretácico        | Normal       |
| Jurásico         |              |

## PRESIÓN NORMAL.

Es la presión ejercida por una columna de agua salada de las formaciones atravesadas. Algunos autores en la literatura relacionada (consultar la bibliografía), recomiendan medir la presión de poro de los acuíferos atravesados por medio de núcleos en la zona de presión normal y asociar estas presiones a las lutitas adyacentes; o bien a través del uso de la curva SP al pasar de zonas limpias de arcilla a arenisca.

En la Sonda de Campeche debido a la ausencia de acuíferos, aunado a la casi ausencia de registros con curva SP (debido a los ruidos de plataforma) no fue posible utilizar los métodos convencionales.

Ya que la zona de presión normal está compuesta casi exclusivamente de lutita, podemos suponer que está dividida en 2 componentes: coloides secos y agua salada por lo que podemos suponer con buena certeza que la saturación de agua es igual a uno y:

$$S_w^2 = \frac{F_1 \times R_w}{R_t}$$

$$R_{wa} = \frac{R_t}{F_1} \quad (2)$$

$$I = \frac{F \times R_{wa}}{R_t}$$

Es decir la resistividad aparente del agua congénita de la lutita, depende exclusivamente de la resistividad verdadera de la formación y de la porosidad en ese punto, ya que contamos con registros de inducción, sónico de porosidad y densidad, así como en algunos casos de neutrón compensado, estamos en posibilidad de determinar resistividades de agua aparente de la lutita vs. profundidad, conociendo los gradientes de temperatura podemos determinar finalmente una curva continua de presión



presión normal, ejercida por el agua que compone los estratos atrevesados y con ésta determinar curvas de gradientes de presión normal.

Utilizando el método arriba señalado se seleccionaron 2 - pozos por área y se obtuvieron registros Pwa vs. profundidad, estos con valores verticalizados y finalmente las curvas de  $(P/D)_n$  buscados, ver figs. N° 7, 8, 9, y 10.

#### PRESIONES DE PORO.

Para poder resolver la ecuación N° 1, se procedió de la siguiente manera: primero se verticalizaron todas las curvas de conductividad y  $t$  vs. profundidad y se graficaron en papel semilogarítmico, ver fig. N° 11, se trazaron las tendencias normales y finalmente con las lecturas de  $C_o$ ,  $C_n$ ,  $t_o$  y  $t_n$ ; se encontraron las presiones de poro buscadas, se determinaron cimas, bases y espesores de zonas geopresionadas para Cantarell, Abkatún y Pol.

Mediante una grilla de localización de pozos con control de desviación, se vaciaron los datos encontrados y se desarrollaron mapas de cimas, bases y espesores, ver figs. 13, 14, 15 y 16.

#### GRADIENTE DE FRACTURA.

Recordemos a Eaton

$$F = \frac{P}{D} + \left( \frac{S}{D} - \frac{P}{D} \right) \frac{\mu}{1-\mu} \quad (3)$$

donde  $\mu$  es la relación de Poisson, la cual se sugiere determinar de datos de laboratorio a partir de núcleos. Lo anterior

es muy difícil de lograr, ya que resulta incostcable, cortar una gran cantidad de núcleos para poder determinar en el laboratorio una gráfica de variación de la relación de Poisson vs. profundidad.

Otro método consiste en partir a la inversa es decir conociendo datos de gradiente y presión de poro de fractura encontrar  $\frac{u}{1 - u}$

El método propuesto en este trabajo consiste en encontrar valores de u a través de medios indirectos.

El registro VDL (densidad variable), corrido en agujero -- descubierto, es capaz de proporcionar un análisis completo de la onda elástica propagada en un medio poroso; así mismo, nos muestra una gran cantidad de parámetros de la formación del - pozo y como afectan estos al tren de ondas.

Por lo expuesto arriba, si corremos un registro VDL en agujero descubierto en la zona geopresionada, ésta nos dará la - información buscada.

### 6.6.3. ZONAS DE PÉRDIDA.

#### A) FORMACIONES POROSAS.

Las pérdidas en formaciones porosas, tales como capas de grava, capas de restos de moluscos y ciertas calizas, se presentan generalmente a profundidades someras y se caracterizan por una rapidez en la pérdida, la localización de la zona de pérdida depende del conocimiento que se tenga de las formaciones que se han perforado; el mejor tratamiento para este tipo de pérdidas es un squeeze (bombeo a presión) de Diesel Bentonita, este procedimiento se detalla en un párrafo próximo.

#### B) ARENAS CON ALTA PERMEABILIDAD.

Este tipo de pérdida aparece en formaciones en las cuales la abertura de los poros son más grandes que las partículas del lodo, son más difíciles de diagnosticar porque la pérdida es generalmente de una rapidez gradual, la localización de la zona de pérdida depende del conocimiento de las formaciones, su tratamiento consistirá en la adición de obturantes granulares al lodo o el aumento de material coloidal (bentonita o polímero) al mismo tiempo, si se localiza la zona de pérdida se colocará un tapón suave (un bache de lodo viscoso conteniendo material obturante generalmente polímeros).

#### C) FORMACIONES CAVERNOSAS.

Este tipo de pérdidas aparecen generalmente en forma inmediata y completa, ocurre en cavernas y grietas y es fácil de diagnosticar porque la barrena caerá varias pulgadas o pies -

"Squeeze" de atapulguita-barita. La razón de la inyección -- forzada ("squeeze") es la colocación de materiales sólidos -- dentro de las fracturas para evitar la transmisión de las variaciones de presión hidráulica y el agrandamiento de la fractura.

#### 6.6.3.1. TIPOS Y CAUSAS DE PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN.

Los tipos de pérdidas de circulación se clasifican de -- acuerdo con la formación.

Es importante determinar el tipo de pérdida que se tenga en algún caso en particular para determinar el procedimiento de control más adecuado.

Las condiciones favorables que pueden causar pérdidas de circulación son las siguientes:

- a) Cuando el tamaño de los poros sea más de tres veces el tamaño máximo de las partículas del fluido de perforación después de pasar por la temblorina.
- b) Cuando se atraviesan formaciones no consolidadas que -- pueden fracturarse fácilmente o aquellas que tengan -- una permeabilidad mayor de 14 darcys.
- c) Cuando se perforen formaciones cavernosas.
- d) Cuando se tengan fracturas inducidas debidas a una alta presión de circulación de fluidos con altas densidades. La presión hidrostática de los fluidos de perforación en reposo, raras veces ocasionan pérdidas de -- circulación; sin embargo, los efectos de pistoneo al -



bajar la tubería pueden causar fracturas.

- e) Al atravesar fracturas naturales y fallas grandes se pueden tener pérdidas debido a que la presión de fractura es baja comparada con la de formaciones sin fractura.

#### 6.6.4. DETECCIÓN DE LAS ZONAS DE PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN.

Para evitar serios problemas, se debe identificar el tipo de pérdidas y localizar la profundidad de la zona de pérdida de circulación.

La pérdida de circulación no siempre será en el fondo del pozo dado que puede ocurrir en cualquier momento.

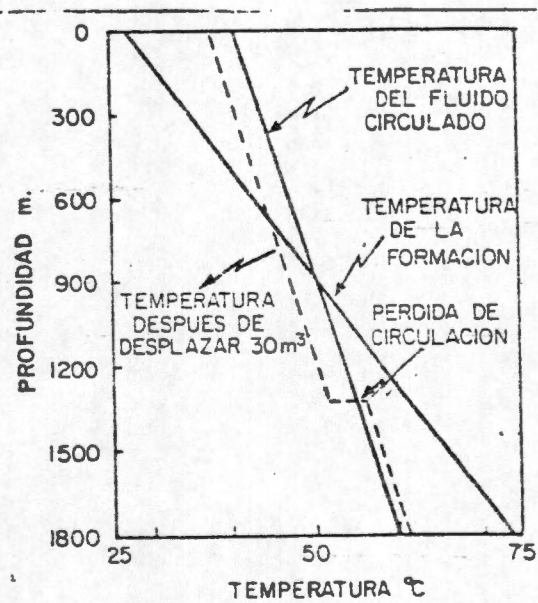
Los métodos más conocidos para encontrar el punto de la pérdida son los siguientes:

- a) Registros de temperatura.

Se utilizan para localizar exactamente las zonas de -- pérdidas en donde los gradientes de temperatura sean -- del orden de (1°F/100 pies)(3°C/100 m.)

El procedimiento es el siguiente: Se toma un registro de temperatura para establecer el gradiente, se bombea fluido al pozo y se toma otro registro. La zona de -- pérdida será en donde se observe un cambio repentino -- en la diferencia de temperatura de ambos registros.

Esto puede observarse en la gráfica siguiente:



Gráfica II - Zona de pérdida de circulación localizada con registro de temperatura..

#### B) MOLINETES HIDRÁULICOS.

Este registro no es adecuado para casos en los que se tengan grandes cantidades de materiales obturantes en el fluido. El método con iste en introducir un molinete con un cable en el pozo, de forma que el fluido en movimiento lo hará girar.

Se registra la velocidad del rotor en rpm y en las profundidades en donde mayores velocidades se registren, serán las posibles zonas de pérdidas.

#### C) TRAZADORES RADIOACTIVOS.

El método del registro de trazadores radioactivos se basa en la medición de la radioactividad de las formaciones.

Primeramente se hace un registro de rayos gamma, luego se desplaza en el pozo un bache de fluido con material radioacti

vo y se toma otro registro de rayos gamma para compararlo con el primero. Una disminución en la radioactividad indicará el punto de la pérdida como resultado de la pérdida del material radioactivo hacia la formación. Este método es caro pero es exacto.

#### 6.6.5. MÉTODOS PREVENTIVOS Y CORRECTIVOS DE PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN.

##### MÉTODOS PREVENTIVOS.

- a) Reducir la densidad del fluido hasta donde sea posible, manteniendo controlada la presión de la formación.
- b) Bajar la viscosidad y gelatinosidad del fluido.
- c) Evitar pistoneos al mover rápidamente la sarta.
- d) Evitar meter la flecha rápidamente cuando estén funcionando las bombas.
- e) Prevenir el embolamiento de la barrena y de los estabilizadores.
- f) Utilizar las estimaciones de fracturas verticales y horizontales y los gradientes de presión de poro.

Es importante considerar las diferencias entre la densidad del fluido medida en la superficie y la densidad equivalente de circulación (densidad en el fondo el pozo), cuando se perfora una formación débil y principalmente cuando se tengan velocidades de perforación y propiedades reológicas muy elevadas.



Algunas veces la circulación se restablece después de perforar en esta forma.

La inyección de aire al fluido de perforación es otro método que se ha utilizado para combatir los problemas de pérdidas pero presenta muchos inconvenientes.

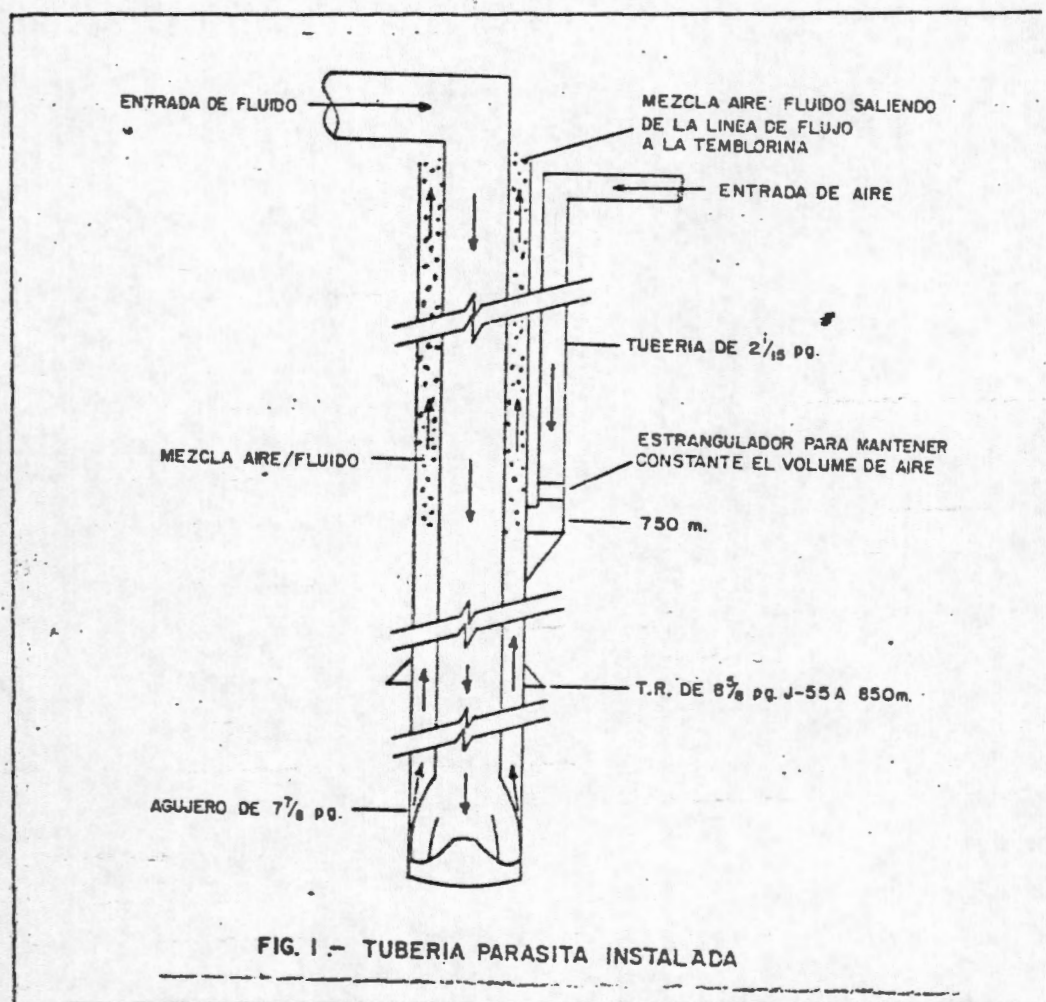
También se han aplicado espumas estables en zonas en donde las condiciones del pozo lo permiten, debido a la baja densidad que se tendría.

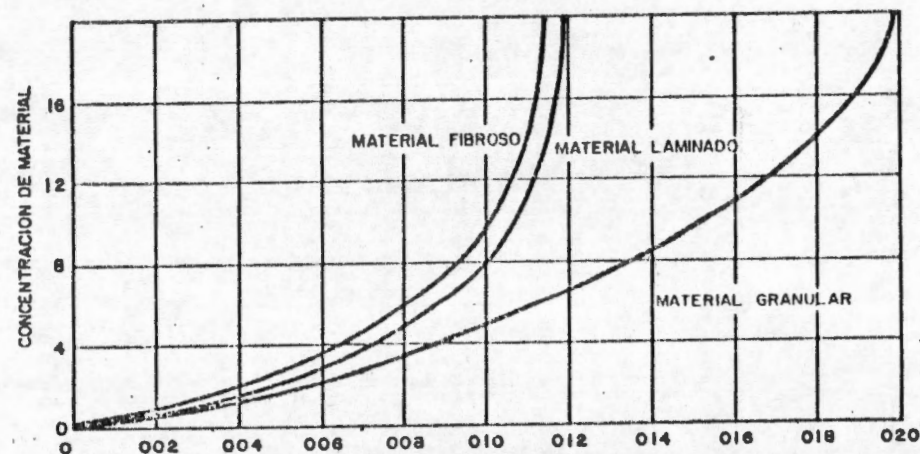
Los métodos mecánicos para reducir la presión del fluido de perforación se han utilizado cuando se sabe que a cierta profundidad se encontrará una pérdida. Un método consiste en fijar una tubería denominada parásita, en la tubería de revestimiento anterior a la zona esperada de pérdida. A través de dicha tubería parásita se inyecta aire para aligerar la columna del fluido cuando se llegue a la zona esperada. Este arreglo de tuberías se ilustra en la figura 1.

#### 6.6.6. SELECCIÓN DEL MÉTODO PARA CONTROLAR UNA PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN

De acuerdo con las observaciones de velocidad de pérdida del fluido con la operación que estaba efectuando cuando se observó la pérdida, será el método que se seleccione para establecer la circulación del fluido. La tabla II es útil para decidir el método a utilizar.

FIG. 1 TUBERIA PARASITA INSTALADA.





GRAF. III.- EFECTO DE LA CONCENTRACION DE MATERIALES PARA PERDIDAS DE CIRCULACION EN EL SELLADO DE FRACTURAS

TABLA I DIFERENTES MATERIALES OBTURANTES EVALUADOS EN FRAC  
TURAS SIMULADAS.

| MATERIAL           | TIPO     | DESCRIPCIÓN                             | CONCENTRACIÓN**<br>(KG/M <sup>3</sup> ) |
|--------------------|----------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Cáscara de Nuez    | Granular | Mallas 50%-3/16+10                      | 60                                      |
| Plástico           | Granular | Mallas 50%-10+100                       | 60                                      |
| Caliza             | Granular | "                                       | 120                                     |
| Azufre             | Granular | "                                       | 340                                     |
| Cáscara de Nuez    | Granular | Mallas 50%-10+16<br>Mallas 50%-10+100   | 60                                      |
| Perlita expandida  | Granular | Mallas 50%-3/16+10<br>Mallas 50%-10+100 | 180                                     |
| Celofán            | Laminar  | Escamas de 3/4"                         | 20                                      |
| Serrín             | Fibroso  | Partículas de 1/4"                      | 30                                      |
| Paja               | Fibroso  | Fibras de 1/2"                          | 30                                      |
| Corteza            | Fibroso  | Fibras de 3/8"                          | 30                                      |
| Semilla de Algodón |          |                                         |                                         |
| Cáscaras           | Granular | Finas                                   | 30                                      |
| Paja               | Fibroso  | Partículas de 3/8"                      | 35                                      |
| Celofán            | Laminar  | Escamas de 1/2"                         | 20                                      |
| Madera desmenuzada | Fibroso  | Fibras de 1/4"                          | 20                                      |
| Serrín             | Fibroso  | Partículas de 1/16"                     | 60                                      |

\*\* Tamaño de fractura sellada.



TABLA II

TECNICAS RECOMENDADAS PARA COMBATIR PERDIDAS DE CIRCULACION DE ACUERDO CON SU MANIFESTACION.

| Manifestación                                                                                                                                                                     | Técnica recomendada                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pérdida por filtración<br>(160 a 1600 l/h)                                                                                                                                        | Levantar la sarta y esperar durante 4 a 8 horas. Inyectar a presión fluido o un tapón de alta filtración, con mica-fina, cáscaras de nuez o almendras molidas, celofán fino y fibras de cuero.                                                                                       |
| Pérdida parcial<br>(1.6 a 80 m <sup>3</sup> /h)                                                                                                                                   | Levantar la sarta y esperar de 4 a 8 horas. Inyectar a presión fluido o un tapón de alta filtración, con obturantes medianos (aserrín, cáscaras de nuez o almendras, celofán y fibras).                                                                                              |
| Pérdida parcial o total en fracturas inducidas profundas.                                                                                                                         | Levantar la sarta y esperar de 4 a 8 horas. Inyectar tapones suaves.                                                                                                                                                                                                                 |
| Pérdida total severa (nivel del fluido a 150-300 m de la superficie). Se presenta con grandes intervalos de pérdidas o fracturas y agua circulando en o hacia la zona de pérdida. | Inyectar a presión un tapón de alta filtración con obturantes granulares de 1/4 a 1/2 pulg., hojuelas grandes de celofán y fibras grandes. Inyectar tapones de diesel-bentonita-cemento.<br>Continuar con perforación ciega, con fluido aerado y programar tubería de revestimiento. |

225