



HDD  
CALCOLO DELLA PRESSIONE MASSIMA AMMISSIBILE NEL FORO  
AL FINE DI EVITARE IL FRAC-OUT, CIOE'  
LA ROTTURA DEL SUOLO

INDICE

- I. INTRODUZIONE
- II. EQUAZIONE DI DELFT
- III. PARAMETRI GEOTECNICI RESTITUITI DAI RILIEVI DEL PROF. MARCHETTI
- IV. DISCUSSIONE DELLA PROFONDITA' MEDIA DESIDERABILE IN FORMAZIONI LIMO-ARGILLOSE

I. INTRODUZIONE

Uno dei tipici problemi da risolvere nei calcoli di progetto di una perforazione orizzontale direzionale (HDD – Horizontal Directional Drilling) è la determinazione della pressione massima ammissibile all'interfaccia tra la parete del foro e il resto dell'ambiente di perforazione.

Nell'ultimo decennio è stato sviluppato un metodo di calcolo affidabile, che si basa sulla teoria di espansione delle cavità calcolando la pressione limite della formazione geologica (FLP – Formation Limit Pressure) con l' Equazione di Delft (università olandese, situata nell'omonima cittadina, vicino a The Hague), riportata nella pagina seguente. La FLP deve risultare maggiore della pressione anulare, cioè della pressione del fluido di perforazione, secondo un opportuno fattore di sicurezza /che tipicamente è pari a 2 e occasionalmente è uguale a 1,5.

Ebbene, come raccomandato ad abundantiam in tutta la letteratura tecnica internazionale del settore, condizione necessaria imprescindibile per ottenere risultati attendibili da detta equazione è che si disponga di parametri geotecnici ben valutati con prove in-situ. Riportiamo nel successivo capitolo, a titolo di esempio, la restituzione delle prove di campagna svolte dallo Studio del Prof. Marchetti, ideatore del dilatometro Marchetti (DMT).

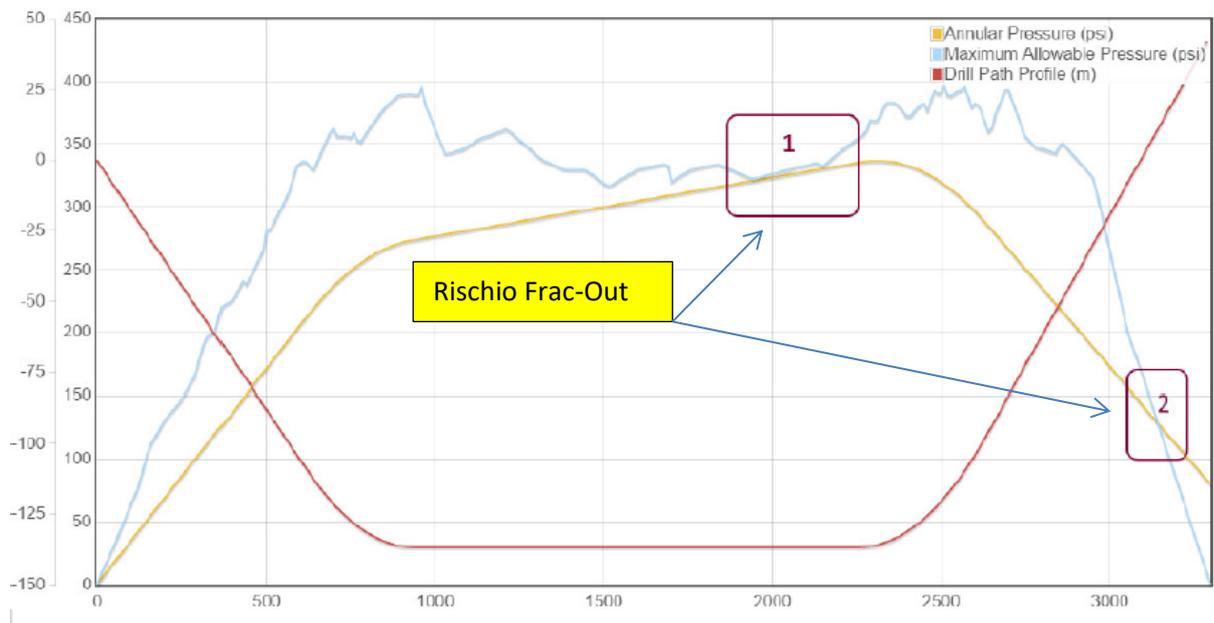
Nella tabella seguente, che illustra le cause di non riuscita di un lavoro in HDD, la qualità e la completezza delle indagini geognostiche sono al primo posto. Seguono l'incompletezza dei calcoli e l'esiguo valore della profondità del foro (overburden/cover). Questo, e gli altri fattori elencati, conducono alla rottura del terreno e dunque al Frac-Out (Hydro-fracture, ultima freccia rossa in basso).

POTENTIAL HDD FAILURES	
Failure Source	Cause(s)
Geotechnical Exploration	Soil borings not deep enough
	Soil borings not frequent enough
	Soil borings located on top of proposed pipe alignment
	Insufficient soil information obtained
Design	Utility/structure conflicts (SUE locates)
	Inadequate staging area
	Staging too close to obstacle
	3D alignment proposed
	Drill calculations not completed
	Drill angle of attack too shallow
	Drill radius too small
	Drill depth at mixed face soil conditions
	Insufficient overburden/cover
	Soft soils
	Improper pipe specified
Flooded vs. unflooded installation	
Construction	Lack of constructability review
	Equipment in disrepair
	Wrong drill rig for the job
	Wrong drill head for soil conditions
	Drill change by contractor
	Improper drilling fluid used
	Hydro-fracture
Problematic soils causing the contractor to seek better soils	

Reference: Blake Peters, et al, "Can You See It Coming? Examining and Mitigating the Common Causes of HDD Failures", 2014 NASTT No-Dig Show, Orlando, FL



FIG.1  
CAUSE DI INSUCCESSO DI LAVORI IN HDD



**FIG.2**  
DIAGRAMMA DELLA PRESSIONE NELLO SPAZIO ANULARE DEL FORO E DELLA MASSIMA PRESSIONE AMMISSIBILE DEL TERRENO

## II. EQUAZIONE DI DELFT

The Delft equation for the maximum formation limit pressure is shown in Equation 1.

$$P_{max} = u + (\sigma'_o \circ (1 + \sin\phi) + c \circ \cos\phi + c \circ \cot\phi) \circ \left\{ \left( \frac{R_o}{R_p} \right)^2 + \left\{ \frac{\sigma'_o \circ \sin\phi + c \circ \cos\phi}{G} \right\} \right\}^{\frac{-\sin\phi}{1+\sin\phi}} - c \circ \cot\phi \quad [1]$$

Where:

$P_{max}$	Formation Limit Pressure – Theoretical maximum pressure or total stress the soil can withstand before hydraulic fracture occurs
$\phi$	Angle of internal friction, degrees
$c$	Cohesion, psf
$\sigma'_o$	Effective vertical stress, psf
$G$	Shear Modulus, psf
$R_o$	Radius of drilled hole, ft
$R_p$	Maximum radius of plastic deformation of drilled hole, ft
$u$	initial pore water pressure (psf)

Below we will provide a geotechnical engineering basis for understanding the input parameters and applying the Delft equation. We do not have the space to treat each subject rigorously, only summaries can be provided, and the reader should allow for exceptions and the use of engineering judgment, as with any geotechnical engineering practice.

### 3.3.1 Soil Strength Application to Hydraulic Fracture Calculation

Applying the soil shear strength concepts to the Delft equation, consider the following:

1. Coarse-grained soils will have a  $\phi$  angle that can be estimated from field and laboratory testing data. Coarse-grained soils should be considered to have a  $c$  of 0. So, for a coarse-grained soil, the Delft equation for total allowable stress reduces to (equation 2):

$$P_{max} = u + (\sigma'_o \circ (1 + \sin\phi)) \circ \left\{ \left( \frac{R_o}{R_p} \right)^2 + \left\{ \frac{\sigma'_o \circ \sin\phi}{G} \right\} \right\}^{\frac{-\sin\phi}{1+\sin\phi}} \quad [2]$$

2. Fine-grained soils will have a  $c$  estimated from field and laboratory testing data. There should be no  $\phi$  assigned to fine-grained soils for the rapid loading hydraulic fracture scenario. So, for a fine-grained soil, the Delft equation for total allowable stress reduces to (equation 3):

$$P_{max} = u + \sigma'_o + c \quad [3]$$

Come si può vedere, la FLP, cioè la pressione massima ammissibile nella formazione geologica, dipende da due fattori geometrici:  $R_o$  (raggio del foro) e  $R_p$  (raggio massimo della zona a deformazione plastica circostante il foro). Per il resto, tutto dipende, naturalmente, dai parametri geotecnici del terreno: “phi” (angolo di attrito interno), “c” (coesione), “sigma zero” (sforzo verticale effettivo), “G” (modulo di taglio), “u” (pressione interstiziale iniziale).

III. PARAMETRI GEOTECNICI FORNITI DAI RILIEVI IN SITU DEL PROF. MARCHETTI



Lacedonia, Avellino (AV) - DMT WTG-10, June 30<sup>th</sup> - July 16<sup>th</sup> 2015

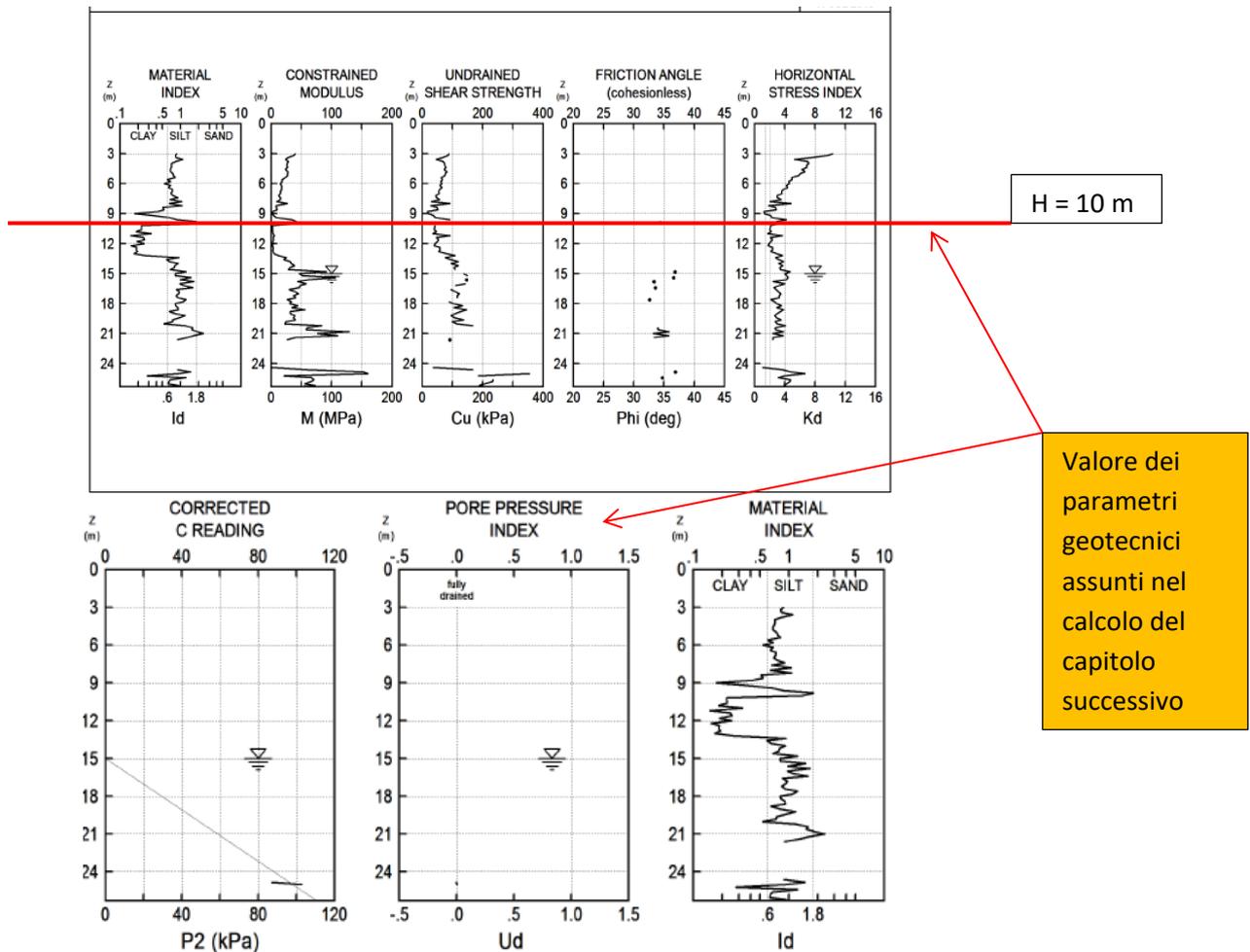
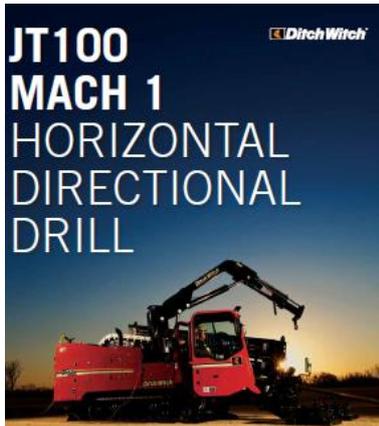


FIG.3  
PARAMETRI GEOTECNICI FONDAMENTALI RESTITUITI DA TEST IN-SITU DMT  
(Marchetti, Impianto Eolico nel Comune di Lacedonia (AV), 2015)

IV. PROFONDITA' MEDIA PER HDD IN FORMAZIONI LIMO-ARGILLOSE



Applichiamo ora le considerazioni precedenti all'utilizzo in terreni limoso-argillosi di una perforatrice DITCH WITCH JT100, capace di sviluppare una pressione massima del fluido di perforazione pari a 69 bar.



**DRILLING FLUID SYSTEM (ON BOARD)**

Drilling fluid pressure, max	1,000 psi	69 bar
Drilling fluid flow, max	230 gpm	870 l/min

**FLUID CAPACITIES**

Hydraulic reservoir	47 gal	180 L
Fuel tank	97 gal	370 L

Utilizzando l' Equazione di Delft inserendo per i parametri geotecnici i valori ricavati da Marchetti di cui al capitolo precedente, otteniamo una FLP (Formation Limit Pressure) dell'ordine dei 120 bar solo a partire dai 7 o 8 metri di profondità.

$$P_{max} = u + (\sigma'_o \circ (1 + \sin\phi) + c \circ \cos\phi + c \circ \cot\phi) \circ \left\{ \left( \frac{R_o}{R_p} \right)^2 + \left\{ \frac{\sigma'_o \circ \sin\phi + c \circ \cos\phi}{G} \right\}^{\frac{-\sin\phi}{1+\sin\phi}} \right\} - c \circ \cot\phi \quad [1]$$

Considerato che, come sottolineato nelle "RECOMMENDATIONS FOR DESIGN" riportate nel capitolo successivo, il fattore di sicurezza per terreni "coesivi" in cui le condizioni di carico vanno obbligatoriamente considerate "non drenate", il fattore di sicurezza deve essere almeno pari a 2, si conclude che:

**Perforazioni in terreni coesivi con la sonda Ditch Witch JT100 dovrebbero sempre essere previste a profondità minime dell'ordine dei 7m, pena il verificarsi di elevato rischio di Frac-Out.**

V. RACCOMANDAZIONI PER IL PROGETTO DI HDD

**4. RECOMMENDATIONS FOR DESIGN**

During the design stage of a project, the geotechnical engineer should carefully consider several factors to better understand and characterize the subsurface conditions and thereby reduce the risk of hydraulic fracture and IR during construction.

The designer needs to consider whether the geotechnical conditions warrant modelling the soils under drained or undrained conditions. For relatively clean (low fines content) granular soils, utilizing drained soils strength parameters is warranted. We recommend that if using the Delft Equation, undrained soil conditions be utilized for fine-grained soils (silt and clay) and that it may also be prudent for coarse-grained soils with significant fines content (perhaps greater than 40 percent). At this point it's not clear how quickly pore pressures dissipate in granular soils with significant fines content and that future research may lead to a procedure that allows the use of drained conditions and a reduced or "effective" friction angle that can be relied upon for predictive purposes.

If the Delft Equation is being used for drained conditions with the Delft recommended  $R_p$  value, a factor of safety of at least 2.0 is recommended when calculating allowable pressures for crossings where IRs would be detrimental to the project. If the  $R_p$  value is limited to two- or three-hole diameters, we suggest a factor of safety of 1.5 could be appropriate. To calculate allowable pressures for undrained conditions, a factor of safety of 2.0 or greater is