



UNIVERSITÀ  
POLITECNICA  
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
LAUREA TRIENNALE

in Ingegneria Edile

APPLICAZIONE DI UNA TEORIA DELLE  
GRANDI DEFORMAZIONI A DATI DI PROVE DI  
LABORATORIO

APPLICATION OF A LARGE DEFORMATION  
THEORY TO LABORATORY TEST DATA

*Candidato:*

*Gianluigi Simonetti*

*Relatore:*

*Prof.ssa: Evelina Fratolocchi*

A.A. 2019/2020



1	INDICE	
1	INDICE .....	2
2	INDICE DELLE FIGURE .....	4
3	INDICE DELLE TABELLE .....	9
1	OGGETTO E SCOPO DELLA TESI .....	11
1.1	Inquadramento planimetrico della zona .....	13
1.2	Descrizione della vasca di colmata.....	14
2	PROVE ESEGUITE IN LABORATORIO.....	15
2.1	SEDIMENTI OGGETTO DI STUDIO.....	15
2.2	CARATTERIZZAZIONE DEI SEDIMENTI.....	16
2.2.1	PROVA DI SEDIMENTAZIONE.....	17
2.2.2	PROVA EDOMETRICA AD INTERVALLI DI CARICO COSTANTE.....	21
2.2.2.1	Ipotesi teoriche alla base della prova.....	21
2.2.2.2	Apparecchiature necessarie.....	23
2.2.2.3	Esecuzione della prova in laboratorio.....	25
2.2.2.4	Analisi dei dati secondo la procedura di Casagrande .....	29
2.2.2.5	Analisi dei dati secondo il metodo di Taylor.....	31
2.2.2.6	Resoconto delle prove edometriche eseguite in laboratorio ....	32
3	APPLICAZIONE DELLA TEORIA DELLA CONSOLIDAZIONE MONODIMENSIONALE PROPOSTA DA M. MIKASA.....	54
3.1	TEORIA DELLA CONSOLIDAZIONE DI MIKASA .....	54
3.2	PROCEDURA DI DETERMINAZIONE DEL $C_v$ DI MIKASA E TAKADA.....	56
3.3	IMPLEMENTAZIONE DELLA PROCEDURA DI MIKASA E TAKADA.....	59

3.4	APPLICAZIONE AL CASO REALE.....	64
4	CONFRONTO DEI RISULTATI OTTENUTI E DISCUSSIONE.....	76
5	CONCLUSIONI.....	78
6	BIBLIOGRAFIA .....	80

## 2 INDICE DELLE FIGURE

<i>Figura 1: Aerofotogrammetrico vasca di colmata (google maps).....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2 Cilindri graduati: in primo piano il numero 5, in secondo piano, da sinistra, ci sono i numeri da 1 a 4. In tutti sono presenti differenti quantità di sedimento e acqua di mare.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3: Curva cedimento-tempo del provino n.1.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 4: Curva cedimento-tempo del provino n.2.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 5: Curva cedimento-tempo del provino n.3.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 6: Curva cedimento-tempo del provino n.4.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 7: Curva cedimento-tempo del provino n.5.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 8: Schema di funzionamento della prova edometrica ad intervalli di carico costante.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 9: Componenti della cella edometrica.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 10: Posizionamento della fustella con sedimento sulla pietra porosa all'interno della base .....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 11:Avvitamento del cilindro superiore alla base. ....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 12: Edometro scarico con inserita la fustella .....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 13: Comparatore, utilizzato per leggere ad intervalli di tempo prestabiliti l'evoluzione nel tempo del cedimento. ....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 14: Curva cedimento-log(t) relativa allo step di carico 6,25 kPa.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 15: Curva cedimento-log(t) relativa allo step di carico 12,5 kPa.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 16: Curva cedimento-log(t) relativa allo step di carico 25 kPa.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 17: Curva cedimento-log(t) relativa allo step di carico 50 kPa.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 18: Curva cedimento-log(t) relativa allo step di carico 100 kPa.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 19: Curva cedimento-log(t) relativa allo step di carico 200 kPa.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 20:Curva cedimento-log(t) relativa allo step di carico 400 kPa.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 21: Curva cedimento-log(t) relativa allo step di carico 800 kPa.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 22: Curva cedimenti tempo secondo la costruzione di Casagrande relative ai diversi incrementi di carico.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 23: Curva di compressibilità per il provino 1 "Isa Palumbo" .....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 24:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 6,25 kPa.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 25:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 400 kPa.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 26:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 800 kPa.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 27:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 6,25 kPa.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 28:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 12,5 kPa.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 29:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 25 kPa.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 30:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 50 kPa.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 31:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 100 kPa.....</i>	<i>40</i>

<i>Figura 32:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 200 kPa.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 33:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 400 kPa.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 34:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 800 kPa.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 35:Curva cedimenti tempo secondo la costruzione di Casagrande relative ai diversi incrementi di carico.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 36:Curva di compressibilità per il provino 1 "Marina Dorica.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 37:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 6,25 kPa.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 38:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 12,5 kPa.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 39:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 50 kPa.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 40:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 100 kPa.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 41:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 200 kPa.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 42:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 400 kPa.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 43:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 800.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 44:Curva cedimenti tempo secondo la costruzione di Casagrande relative ai diversi incrementi di carico.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 45:Curva di compressibilità per il provino 2 "Marina Dorica".....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 46:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 6,25 kPa.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 47:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 12,5 kPa.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 48:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 25 kPa.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 49:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 50 kPa.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 50:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 100 kPa.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 51:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 200 kPa.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 52:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 400 kPa.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 53:Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 800 kPa.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 54:Curva cedimenti tempo secondo la costruzione di Casagrande relative ai diversi incrementi di carico.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 55:Curva di compressibilità tensioni efficaci- indice dei vuoti.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 56: Esempio di curve fitting (Mikasa e Takada, 1985).....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 57: adattamento della curva che meglio approssima la sperimentale.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 58:parametri del terreno da inserire nel foglio di calcolo della sperimentale.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 59:fattorizzazioni di t=tempo, z=profondità dello strato all'istante t, fat.=fattore progressivo per il calcolo della soluzione.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 60:curva sol-Tv, curva tipo da esempio per una corretta fattorizzazione di t e z.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 61:integrale della soluzione progressivo, i numeri rappresentano i cedimenti corrispondenti ai tempi.....</i>	<i>61</i>

<i>Figura 62:prima colonna: discretizzazione del tempo, seconda colonna: fattore tempo adimensionale calcolato con i tempi della discretizzazione ed il <math>C_v</math> ricavato dall'analisi di Casagrande .....</i>	62
<i>Figura 63:Curva sperimentale e relativi valori del tempo. ....</i>	62
<i>Figura 64:valori per scalare la curva sperimentale in modo da ottenere la medesima scala per teorica e sperimentale.....</i>	62
<i>Figura 65:Prima colonna: sperimentale con valore unitario, in questa colonna va inserito sempre i valori della sperimentale non moltiplicato; seconda, terza, quarta colonna: coefficienti moltiplicativi della sperimentale .....</i>	63
<i>Figura 66:Grafico della sovrapposizione sul <math>t_{50}</math> tra sperimentale e le curve, aventi valore del coefficiente moltiplicativo diverso.....</i>	63
<i>Figura 67:Tabella decisionale, qui va inserito soltanto il numero dei punti che si vogliono considerare, i punti vengono contati dal primo all'ultimo, decidendo quanti degli ultimi punti vanno eliminati dalla valutazione .....</i>	64
<i>Figura 68:Questa è una tabella di output, qui vengono esplicitati tutti i risultati dell'analisi condotta secondo la curva scelta nel punto precedente. ....</i>	64
<i>Figura 69: Curve cedimento-tempo per la prova edometrica ad incremento di carico eseguita per il provino "Fincantieri" .....</i>	65
<i>Figura 70: Curva tempo-cedimento per lo step di carico 6.25 kPa ed interpretazione secondo Casagrande .....</i>	65
<i>Figura 71: "Curve fitting" eseguito con tre curve d'adattamento per lo step di carico 6.25kPa .....</i>	66
<i>Figura 72: Riassunto dell'algorithmo decisionale per lo step di carico 6.25 kPa, in verde la curva scelta. ....</i>	66
<i>Figura 73: Dati ricavati dalla curva teorica, in particolare si riportano: il <math>d_{100}</math> ed il <math>d_0</math> corretti il <math>d_{50}</math> ed il <math>t_{50}</math>, il <math>C_v</math> stimato in riferimento alla curva teorica, il <math>\Delta H_{100}</math> in riferimento alla teorica, il <math>\Delta H_{24h}</math> in riferimento ai dati sperimentali, <math>r</math> coefficiente di riduzione da applicare al <math>C_{v1}</math>, <math>C_v</math> coefficiente di consolidazione primario ottenuto dal <math>C_{v1}</math> e dall'applicazione di <math>r</math>, il <math>\Delta\sigma</math> applicato al provino, Eprim. Modulo edometrico stimato in riferimento alla curva teorica, la stima della permeabilità <math>k</math> eseguita in riferimento alla curva teorica, per lo step di carico 6.25 kPa .....</i>	66
<i>Figura 74:Curva tempo-cedimento per lo step di carico 12.5 kPa ed interpretazione secondo Casagrande .....</i>	67
<i>Figura 75: Adattamento delle curve ricavato per lo step di carico 12,5 kPa.....</i>	67
<i>Figura 76:Riassunto dell'algorithmo decisionale per lo step di carico 12.5 kPa, in verde la curva scelta. ....</i>	68
<i>Figura 77: Dati ricavati dalla curva teorica, in particolare si riportano: il <math>d_{100}</math> ed il <math>d_0</math> corretti il <math>d_{50}</math> ed il <math>t_{50}</math>, il <math>C_v</math> stimato in riferimento alla curva teorica, il <math>\Delta H_{100}</math> in riferimento alla teorica, il <math>\Delta H_{24h}</math> in riferimento ai dati sperimentali, <math>r</math> coefficiente di riduzione da applicare al <math>C_{v1}</math>, <math>C_v</math></i>	

<i>coefficiente di consolidazione primario ottenuto dal <math>C_{v1}</math> e dall'applicazione di <math>r</math>, il <math>\Delta\sigma</math> applicato al provino, Eprim. Modulo edometrico stimato in riferimento alla curva teorica, la stima della permeabilità <math>k</math> eseguita in riferimento alla curva teorica, per lo step di carico 12.5 kPa .....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 78: Curva tempo-cedimento per lo step di carico 25 kPa ed interpretazione secondo Casagrande .....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 79: Adattamento delle curve ricavato per lo step di carico 25 kPa .....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 80: Riassunto dell'algoritmo decisionale per lo step di carico 25 kPa, in verde la curva scelta. ....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 81: Dati ricavati dalla curva teorica, in particolare si riportano: il <math>d_{100}</math> ed il <math>d_0</math> corretti il <math>d_{50}</math> ed il <math>t_{50}</math>, il <math>C_v</math> stimato in riferimento alla curva teorica, il <math>\Delta H_{100}</math> in riferimento alla teorica, il <math>\Delta H_{24h}</math> in riferimento ai dati sperimentali, <math>r</math> coefficiente di riduzione da applicare al <math>C_{v1}</math>, <math>C_v</math> coefficiente di consolidazione primario ottenuto dal <math>C_{v1}</math> e dall'applicazione di <math>r</math>, il <math>\Delta\sigma</math> applicato al provino, Eprim. Modulo edometrico stimato in riferimento alla curva teorica, la stima della permeabilità <math>k</math> eseguita in riferimento alla curva teorica, per lo step di carico 25 kPa .....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 82: Curva tempo-cedimento per lo step di carico 50 kPa ed interpretazione secondo Casagrande .....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 83: Adattamento delle curve ricavato per lo step di carico 50 kPa .....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 84: Riassunto dell'algoritmo decisionale per lo step di carico 50 kPa, in verde la curva scelta. ....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 85: Dati ricavati dalla curva teorica, in particolare si riportano: il <math>d_{100}</math> ed il <math>d_0</math> corretti il <math>d_{50}</math> ed il <math>t_{50}</math>, il <math>C_v</math> stimato in riferimento alla curva teorica, il <math>\Delta H_{100}</math> in riferimento alla teorica, il <math>\Delta H_{24h}</math> in riferimento ai dati sperimentali, <math>r</math> coefficiente di riduzione da applicare al <math>C_{v1}</math>, <math>C_v</math> coefficiente di consolidazione primario ottenuto dal <math>C_{v1}</math> e dall'applicazione di <math>r</math>, il <math>\Delta\sigma</math> applicato al provino, Eprim. Modulo edometrico stimato in riferimento alla curva teorica, la stima della permeabilità <math>k</math> eseguita in riferimento alla curva teorica, per lo step di carico 50 kPa .....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 86: Curva tempo-cedimento per lo step di carico 100 kPa ed interpretazione secondo Casagrande .....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 87: Adattamento delle curve ricavato per lo step di carico 100 kPa .....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 88: Riassunto dell'algoritmo decisionale per lo step di carico 100 kPa, in verde la curva scelta. ....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 89: Dati ricavati dalla curva teorica, in particolare si riportano: il <math>d_{100}</math> ed il <math>d_0</math> corretti il <math>d_{50}</math> ed il <math>t_{50}</math>, il <math>C_v</math> stimato in riferimento alla curva teorica, il <math>\Delta H_{100}</math> in riferimento alla teorica, il <math>\Delta H_{24h}</math> in riferimento ai dati sperimentali, <math>r</math> coefficiente di riduzione da applicare al <math>C_{v1}</math>, <math>C_v</math> coefficiente di consolidazione primario ottenuto dal <math>C_{v1}</math> e dall'applicazione di <math>r</math>, il <math>\Delta\sigma</math> applicato al provino, Eprim. Modulo edometrico stimato in riferimento alla curva teorica, la stima della permeabilità <math>k</math> eseguita in riferimento alla curva teorica, per lo step di carico 100 kPa .....</i>	<i>73</i>



<i>Figura 90:Curva tempo-cedimento per lo step di carico 200 kPa ed interpretazione secondo Casagrande .....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 91:Adattamento delle curve ricavato per lo step di carico 200 kPa.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 92:Riassunto dell'algoritmo decisionale per lo step di carico 200 kPa, in verde la curva scelta. ....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 93: Dati ricavati dalla curva teorica, in particolare si riportano: il <math>d_{100}</math> ed il <math>d_0</math> corretti il <math>d_{50}</math> ed il <math>t_{50}</math>, il <math>C_v</math> stimato in riferimento alla curva teorica, il <math>\Delta H_{100}</math> in riferimento alla teorica, il <math>\Delta H_{24h}</math> in riferimento ai dati sperimentali, <math>r</math> coefficiente di riduzione da applicare al <math>C_{v1}</math>, <math>C_v</math> coefficiente di consolidazione primario ottenuto dal <math>C_{v1}</math> e dall'applicazione di <math>r</math>, il <math>\Delta\sigma</math> applicato al provino, <math>E_{prim}</math>. Modulo edometrico stimato in riferimento alla curva teorica, la stima della permeabilità <math>k</math> eseguita in riferimento alla curva teorica, per lo step di carico 200 kPa .....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 94::confronto dei <math>C_v</math> ottenuti con le varie metodologie d'interpretazione .....</i>	<i>76</i>

### 3 INDICE DELLE TABELLE

<i>Tabella 1: Tabella 1 Sintesi della classificazione dei sedimenti marini dragati, con G= ghiaia, S= sabbia, M= limo, C=argilla, w<sub>L</sub>= limite liquido, w<sub>P</sub>= limite plastico, I<sub>P</sub>= indice di plasticità.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabella 2:Tabella relativa al provino 1 derivante dai sedimenti "Isa Palumbo", in cui <math>\Delta H</math> identifica la variazione di altezza del provino, <math>E_{ed}</math> è il modulo di deformazione in condizioni edometriche, e rappresenta l'indice dei vuoti .....</i>	<i>35</i>
<i>Tabella 3: 5 Dati ricavati per mezzo della curva cedimento tempo per ogni incremento di carico per il provino 1 ricavato dai sedimenti "Isa Palumbo", in cui Cr= indice di ricomprensione, Cc= indice di compressione vergine, Cs= indice di scarico, Cv= coefficiente .....</i>	<i>36</i>
<i>Tabella 4: Tabella relativa al provino 1 derivante dai sedimenti "Marina Dorica", in cui <math>\Delta H</math>= variazione di altezza del provino, <math>E_{ed}</math>= modulo di deformazione in condizioni edometriche, e=indice dei vuoti .....</i>	<i>41</i>
<i>Tabella 5: Dati ricavati per mezzo della curva cedimento tempo per ogni incremento di carico per il provino 1 ricavato dai sedimenti "Marina Dorica", in cui Cr= indice di ricomprensione, Cc= indice di compressione vergine, Cs= indice di scarico, Cv= coefficiente.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabella 6: Tabella relativa al provino 2 derivante dai sedimenti "Marina Dorica", in cui <math>\Delta H</math>= variazione di altezza del provino, <math>E_{ed}</math>= modulo di deformazione in condizioni edometriche, e=indice dei vuoti .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabella 7:Dati ricavati della curva cedimento tempo ad ogni incremento di carico ricavato dai sedimenti "Marina Dorica", in cui Cr= indice di ricomprensione, Cc= indice di compressione vergine, Cs= indice di scarico, Cv= coefficiente di consolidazione .....</i>	<i>47</i>
<i>Tabella 9:Tabella relativa al provino derivante dai sedimenti "Fano", in cui <math>\Delta H</math>= variazione di altezza del provino, <math>E_{ed}</math>= modulo di deformazione in condizioni edometriche, e=indice dei vuoti.</i>	<i>51</i>
<i>Tabella 10:Dati ricavati per mezzo della curva cedimento tempo per ogni incremento di carico per il provino ricavato dai sedimenti "Fano", in cui Cr= indice di ricomprensione, Cc= indice di compressione vergine, Cs= indice di scarico, Cv= coefficiente di consolida.....</i>	<i>52</i>



## 1 OGGETTO E SCOPO DELLA TESI

La seguente tesi tratta di sedimenti detti di dragaggio, ovvero provenienti da opere di scavo e asportazione di materiale dal suolo marino.

Tali opere vengono eseguite con macchine escavatrici dette draghe (da cui il termine dragaggio) posizionate su chiatte o pontoni, allo scopo di asportare materiale dal fondale marino per ripristinare la navigabilità degli spazi portuali salvaguardando così le attività commerciali.

Altre opere per cui è richiesto il dragaggio di sedimenti sono l'ampliamento delle strutture portuali e la posa in opera di condotte sottomarine, per le quali queste lavorazioni sono preventive alla realizzazione delle fondazioni necessarie.

La sempre crescente necessità di ampliare gli spazi portuali, effetto della crescita del trasporto di persone e merci via mare, nonché del fenomeno di interrimento a cui sono soggetti tali bacini, rende indispensabile dragare questi sedimenti.

A causa delle grandi quantità del materiale di risulta delle operazioni di dragaggio, la loro gestione rappresenta una problematica non semplice e di impatto ambientale significativo, in particolar modo laddove il materiale sia caratterizzato da un livello di contaminazione non trascurabile.

Il lavoro si inserisce nell'ambito dell'esperienza di gestione dei sedimenti dragati nei porti della Regione Marche che nel 2008 ha sottoscritto l'Accordo di Programma "Per i dragaggi e lo sviluppo sostenibile delle aree portuali presenti nella Regione Marche", con il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, l'ISPRA, l'Autorità Portuale di Ancona, i Comuni di Senigallia, Fano, Numana, e Civitanova Marche.

La maggior parte dei porti marchigiani, infatti, versava in una situazione di cronico interrimento dei fondali, effetto del crescente accumulo di sedimenti marini lungo la fascia costiera e nei pressi degli scali portuali. L'Accordo ha quindi il fine di sopperire a due necessità: da una parte gli interventi di dragaggio e l'approfondimento dei fondali dei porti di cui sopra e, dall'altra, la progettazione e

la realizzazione di un ampliamento delle strutture portuali adibite allo stoccaggio dei container nel porto di Ancona.

L'obiettivo perseguito è quello di elaborazione di un piano gestionale dei sedimenti di escavo, che sia adeguato alle esigenze dei porti e coerente con i regolamenti ambientali vigenti, mediante la gestione integrata delle diverse esigenze del territorio. Il Piano ha previsto, in particolare, la caratterizzazione dei sedimenti e la conseguente gestione degli stessi in funzione delle classi di qualità ambientale. I sedimenti esenti da contaminazione sono stati destinati per il ripascimento degli arenili, mentre per la gestione dei sedimenti caratterizzati da alti livelli di contaminazione è stata realizzata una vasca di colmata nel porto commerciale di Ancona con caratteristiche di impermeabilità tali da consentire il confinamento dei sedimenti con livello di contaminazione medio-alto. Da tale coordinazione scaturiscono grandi benefici ambientali, in quanto il quantitativo di materiale da conferire in discarica è minimo.

La vasca di colmata nel porto di Ancona, realizzata nel luglio 2014 e collaudata nel marzo 2015, conta una capacità di 180,000 m<sup>3</sup>, e una volta terminato il riempimento e la consolidazione dei sedimenti, costituirà un ampliamento di circa 90,000 m<sup>2</sup> dell'area attualmente destinata allo stoccaggio e alla movimentazione dei container, alla viabilità e alla banchina laterale, necessarie ad incrementare il potenziale commerciale dello scalo dorico.

Le problematiche geotecniche connesse con tale progetto sono relative sia alla fase di riempimento della vasca sia alla loro successiva consolidazione necessaria al fine di poter rendere fruibile l'area per le destinazioni d'uso previste. Per ogni sedimento che andrà inserito nella vasca sono state eseguite prove di laboratorio allo scopo di indagarne le caratteristiche meccaniche ed idrauliche utili alla progettazione delle diverse fasi realizzative.

In particolare, questo lavoro di tesi si inserisce nell'ambito della progettazione dell'intervento di consolidamento dei sedimenti della vasca e ha riguardato lo studio del comportamento dei sedimenti marini durante i processi di consolidazione. Nello specifico, sono state eseguite prove di compressione edometrica e di permeabilità in consolidometro allo scopo di determinare i parametri di conducibilità idraulica e

di compressibilità propri dei sedimenti, necessari per stimare i tempi di consolidazione ed i cedimenti da attendersi.

Il presente lavoro approfondisce, nello specifico, l'interpretazione dei dati ottenuti dalle prove di laboratorio, proponendo un confronto fra i risultati ottenuti mediante l'utilizzo di metodi di interpretazione delle prove edometriche comunemente utilizzati per stimare il coefficiente di consolidazione per i terreni (Metodo di Casagrande, 1936 [1]; metodo di Taylor 1942[2]) ed un altro metodo consigliato per l'interpretazione delle prove eseguite su sedimenti di dragaggio (Metodo di Mikasa e Takada 1986 [3]).

## 1.1 Inquadramento planimetrico della zona

La zona in cui è stata realizzata la vasca di colmata è raffigurata in Figura 1.

Essa è delimitata dai seguenti confini:

- a Nord-Ovest dal molo di protezione del vecchio Porto Turistico, che contiene riempimenti realizzati durante i lavori di ammodernamento e potenziamento del Porto di Ancona;
- a Nord-Est dalla strada costeggiante le aree portuali destinate al servizio della Nuova Darsena per la movimentazione delle merci;
- a Sud-Est dall'area che si estende fino a ridosso della foce del fosso "Conocchio", (di recente tale area è stata oggetto di riempimento e seguente addensamento);
- a Sud-Ovest dalla scogliera di contenimento realizzata durante gli ampliamenti.



*Figura 1: Aerofotogrammetrico vasca di colmata (google maps)*

## 1.2 Descrizione della vasca di colmata

La capacità volumetrica della vasca di colmata è di 180.000 m<sup>3</sup>.

Il paramento perimetrale delimitante la stessa è costituito da un palancolato metallico continuo, infisso ad una profondità di 20 metri fino ad incontrare il substrato argilloso.

Il palancolato posto sul lato adiacente al terreno non ha funzione portante principale in quanto le spinte tra interno ed esterno della vasca sono pressoché uguali, ma svolge la funzione di tenuta idraulica. Le palancole poste sul lato mare, invece, hanno anche una funzione strutturale di contenimento delle spinte del materiale interno alla vasca.

Ovviamente, il punto in cui si può presentare una deficienza di tenuta è la giunzione fra due palancole contigue. Per evitare tale mancanza si è optato per utilizzare, nella giunzione di due palancole, una resina idro-espandente in grado di garantire l'impermeabilità del giunto a sostanze inquinanti quali cloruri, solfati e nitrati, nonché adesione e resistenza dello stesso.

## 2 PROVE ESEGUITE IN LABORATORIO

### 2.1 SEDIMENTI OGGETTO DI STUDIO

I sedimenti che sono stati oggetto d'indagine, andranno inseriti nella vasca di colmata, altri invece sono già stati depositati all'interno della stessa.

Tali sedimenti provengono da diverse zone e porti della Regione Marche, nello specifico:

- provenienti dal porto di Fano, denominati di seguito “Fano”.
- provenienti da cantieri del porto di Ancona in particolare da Fincantieri denominati “Fincantieri” e dal cantiere di Isa Palumbo denominati “Isa Palumbo”.
- provenienti dalla zona di Marina Dorica, denominati “Marina Dorica”.

I sedimenti sono stati precedentemente classificati nei laboratori del SIMAU [4][5], mediante prove eseguite prendendo a riferimento la normativa ASTM, riportate nel seguito:

- setacciatura per via umida e aerometria per il passante al setaccio #200 (ASTM D7928-17) [6]
- determinazione del peso di volume dello scheletro solido (ASTM D854-10) [7]
- contenuto in massa del materiale organico (ASTM D2974-14) [8]
- contenuto d'acqua iniziale (ASTM D2216-19) [9]
- limiti di consistenza (ASTM D4318-10) [10]

<b>CLASSIFICAZIONE</b>	<b>SEDIMENTI</b>						
		<b>FINCANTIERI</b>	<b>FANO</b>	<b>ISA PALUMBO</b>	<b>MARINA DORICA</b>		
<b>Granulometria</b>	<i>G [%]</i>	0	2	1	10	1	0
	<i>S [%]</i>	7	6	3	59	44	32
	<i>M [%]</i>	57	56	66	20	40	52
	<i>C [%]</i>	36	36	30	11	15	16
<b>Peso specifico dello scheletro solido</b>	$\gamma_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,736	2,788	2,684	2,699		



<b>Contenuto Organico in massa</b>	$O$ [%]	4	-	-	14		
<b>Contenuto d'acqua naturale del campione</b>	$w$ [%]	95	85	41	134		
<b>Limiti di consistenza</b>	$w_L$ [%]	52	44	55	26	40	37
	$w_P$ [%]	30	27	30	21	33	33
	$I_P$ [%]	22	18	25	5	7	4

Tabella 1: Tabella 1 Sintesi della classificazione dei sedimenti marini dragati, con G= ghiaia, S= sabbia, M= limo, C=argilla,  $w_L$ = limite liquido,  $w_P$ = limite plastico,  $I_P$ = indice di plasticità

Nell'ambito del seguente studio sono state eseguite diverse prove in condizioni edometriche ad incrementi di carico costante, nello specifico sono state eseguite 5 prove: 1 provino "Fano", 2 provini "Isa Palumbo", 2 provini "Marina Dorica"; sono state eseguite anche una prova di permeabilità in consolidometro e delle prove di sedimentazione su 5 provini "Fincantieri".

Di seguito saranno riportati solamente i risultati ottenuti da tali prove e le procedure standard consigliate e definite dalle specifiche norme ASTM sopra indicate, prese come riferimento normativo per la loro esecuzione.

## 2.2 CARATTERIZZAZIONE DEI SEDIMENTI

Le prove sono state eseguite con lo scopo di caratterizzare i sedimenti nell'ambito della compressibilità anche a bassi valori di carico e di conducibilità idraulica. A tale scopo sono state eseguite le seguenti prove:

- prove di sedimentazione in cilindri, in condizioni non drenate sul fondo (Imai G. 1980, 1981) [11]
- prove di compressibilità edometrica a intervalli di carico costanti (ASTM D2435-04) [12]
- prove di misura diretta della conducibilità idraulica in permeametro a pareti rigide (ASTM 5856-95) [13]

### 2.2.1 PROVA DI SEDIMENTAZIONE

Scopo della prova di sedimentazione è stata la determinazione della compressibilità del sedimento a bassissimi livelli tensionali e della relativa conducibilità idraulica.

In questa prova la consolidazione avviene grazie al peso proprio del materiale, e si misura il grado di addensamento medio del sedimento.

La prova consiste nell'inserire una miscela acqua-terreno in un cilindro graduato consecutivamente agitato e nel lasciarla poi sedimentare.

La prova è stata eseguita con acqua di mare, avente peso specifico maggiore a causa della presenza di sali disciolti in essa.

La scelta di utilizzare l'acqua di mare al posto di acqua "di rubinetto" risiede nella non trascurabilità del contributo che questa ha nella sedimentazione e consolidazione del campione sotto peso proprio, come descritto in letteratura da Imai (1980).

Nella prima fase della prova si osserva il fenomeno della flocculazione che generalmente consiste in un processo chimico-fisico riguardante un sistema colloidale in cui la fase solida tende a creare dei fiocchi in sospensione nel sistema.

In questa fase, l'altezza della sospensione rimane costante; solo in una fase successiva la parte solida, più pesante, tende a depositarsi sul fondo.

La velocità di sedimentazione libera può essere calcolata con la legge di Stokes, secondo la formula:

$$V_{\omega} = \frac{(\rho_p - \rho_f)r^2g}{9\mu}$$

dove  $\rho_p$  e  $\rho_f$  indicano la densità delle particelle e del fluido rispettivamente.

$r^2$  è il raggio medio della particella

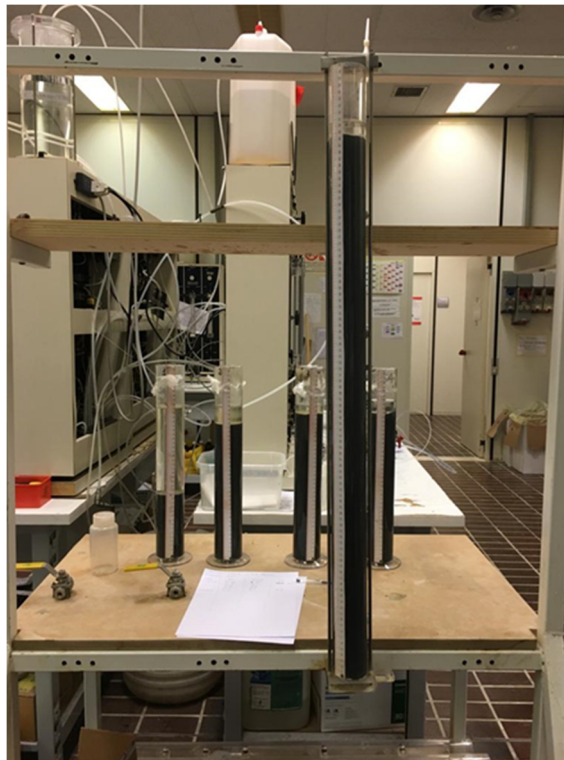
$g$  è l'accelerazione gravitazionale

$\mu$  è la viscosità del fluido.

Nel caso reale la sedimentazione non è libera, ma “ostacolata” dalle particelle circostanti che interagiscono con le altre per via fisica (regime di moto turbolento locale infinitesimo), e per via chimica (polarizzazione dei singoli grani).

In questo caso, più simile al caso reale in esame, la velocità di sedimentazione è ricavata tramite le curve di abbassamento dell’interfaccia tra il solido e il liquido nel tempo (H-logt).

Nell’ambito del presente lavoro sono state eseguite 5 prove di sedimentazione tutte riguardanti il sedimento “Fano”. Di seguito (Figure dalla 2 alla 7) vengono riportate le curve tempo-altezza (log t-H) delle varie prove eseguite.



*Figura 2 Cilindri graduati: in primo piano il numero 5, in secondo piano, da sinistra, ci sono i numeri da 1 a 4. In tutti sono presenti differenti quantità di sedimento e acqua di mare.*

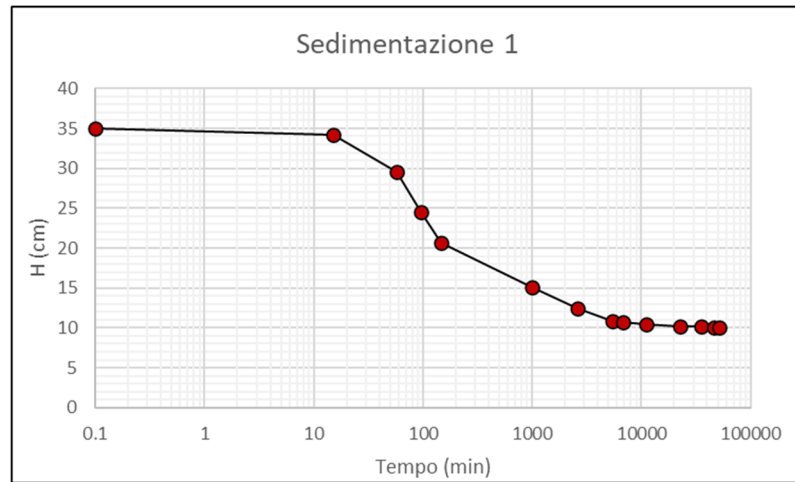


Figura 3: Curva cedimento-tempo del provino n.1

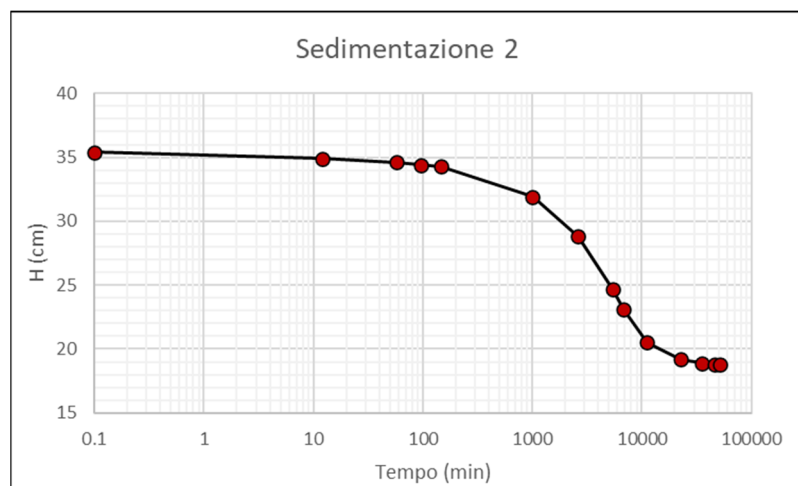


Figura 4: Curva cedimento-tempo del provino n.2

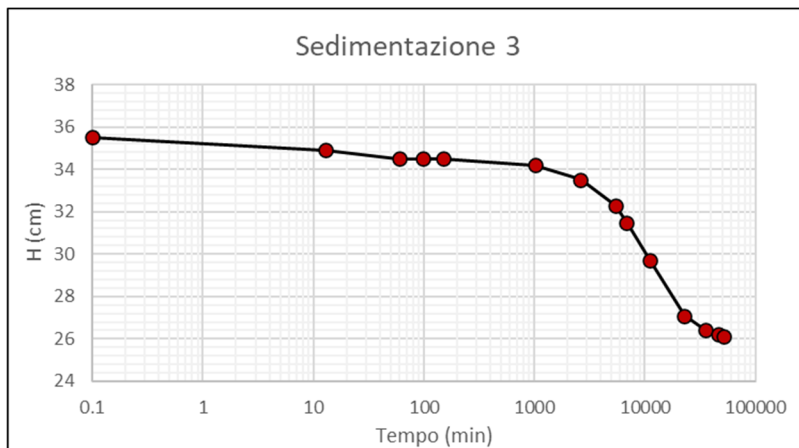


Figura 5: Curva cedimento-tempo del provino n.3

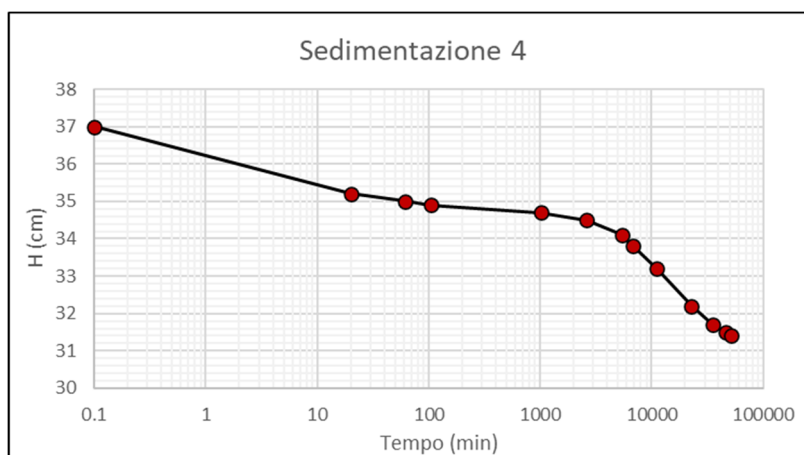


Figura 6: Curva cedimento-tempo del provino n.4

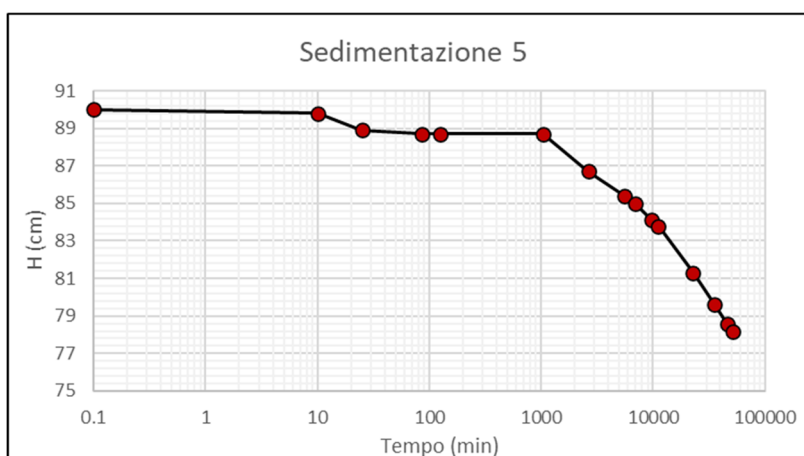


Figura 7: Curva cedimento-tempo del provino n.5

## 2.2.2 PROVA EDOMETRICA AD INTERVALLI DI CARICO COSTANTE

### 2.2.2.1 Ipotesi teoriche alla base della prova

Oltre la prova di sedimentazione prima descritta, sono state eseguite diverse prove edometriche ad incremento di carico [14] su diversi tipi di sedimento con lo scopo di determinare la compressibilità in condizioni di deformazione radiale impedita.

L'ipotesi di condizione edometrica implica che le deformazioni orizzontali siano impedita e che le tensioni tangenziali siano pressoché nulle in modo che il piano orizzontale e verticale del provino siano i piani corrispondenti alla giacitura delle tensioni principali.

L'applicazione di un carico in condizioni edometriche induce delle deformazioni verticali la cui entità dipende dalle caratteristiche meccaniche ed idrauliche del terreno. Essendo il terreno un materiale multifase, le deformazioni sono associate ad una variazione di volume dei singoli costituenti, quali:

1. compressibilità delle particelle solide,
2. compressibilità dell'acqua e/o dell'aria all'interno dei vuoti,
3. variazione del volume dei vuoti con seguente espulsione di acqua e/o aria.

In condizioni edometriche quindi, il terreno subirà deformazioni volumetriche che saranno soltanto verticali in quanto la deformazione orizzontale è impedita.

Queste deformazioni sono quantificate dalla seguente espressione:

$$\varepsilon_V = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta H}{H_0} = \varepsilon_a$$

essendo  $V_0$  e  $H_0$  rispettivamente il volume iniziale e l'altezza iniziale del provino,  $\Delta V$  e  $\Delta H$  le variazioni dovute al carico in condizioni edometriche del volume e dell'altezza del provino.

Si può inoltre correlare l'espressione della deformazione volumetrica con l'indice dei vuoti  $e = \frac{V_v}{V_s}$ :

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} = \frac{\Delta H}{H_0}$$

dove  $e_0$  indica l'indice dei vuoti iniziale (prima dell'applicazione del carico) e  $\Delta e$  indica la variazione dello stesso a fine processo.

La prova di compressibilità in condizioni edometriche si basa sulla teoria monodimensionale della consolidazione di Terzaghi che permette di conoscere l'entità del cedimento del provino nonché il tempo in cui questo avverrà.

Il campo di validità di questa teoria monodimensionale è dettato dalle seguenti ipotesi:

- filtrazione e cedimento avvengono solo lungo la direzione verticale, sono cioè monodimensionali,
  - liquido interstiziale e particelle solide sono incompressibili,
- validità della legge di Darcy:

$$Q = k \frac{\Delta H}{L} A = kiA$$

essendo Q la portata filtrante; k il coefficiente di permeabilità idraulica del terreno;  $\Delta H$  è la differenza rispetto al piano di riferimento prefissato raggiunta dall'acqua in un piezometro ubicato in corrispondenza della testa del campione e l'altezza raggiunta dall'acqua in un piezometro ubicato in corrispondenza della base del campione; L la lunghezza del campione; A l'area totale della sezione trasversale del campione;  $i = \Delta H/L$  è il gradiente idraulico.

Nel caso di liquidi la legge di Darcy non è valida se la velocità di filtrazione è molto alta, mentre per i gas essa cade in difetto per velocità di filtrazione molto basse o molto alte; terreno saturo e con proprietà omogenee; legame costitutivo sforzo-deformazioni elastico lineare; validità del principio delle tensioni efficaci.

L'espressione analitica per la consolidazione monodimensionale, date le suddette ipotesi, fu ricavata da Terzaghi:

$$\frac{k(1+e)}{\gamma_w a_v} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = - \frac{\partial \bar{\sigma}_v}{\partial t}$$

Ponendo  $\frac{k(1+e)}{\gamma_w a_v} = \frac{k}{\gamma_w m_v} = C_v$  dove  $m_v$  rappresenta il coefficiente di compressibilità volumetrica e  $C_v$  il coefficiente di consolidazione primaria:

$$C_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_v}{\partial t}$$

In condizioni edometriche e nel caso in cui il carico applicato rimanga costante (come nel caso in esame, in cui la prova è stata eseguita con incrementi che rimangono costanti nel tempo all'interno dello step di carico), il termine  $-\frac{\partial \sigma_v}{\partial t}$  si annulla in quanto derivata di una costante ottenendo così l'espressione [15]:

$$C_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t}$$

dove:

$k$  = coefficiente di conducibilità idraulica del materiale

$\gamma_w$  = peso di volume dell'acqua interstiziale, nel caso in esame essendo il materiale proveniente da ambiente marino e tenendo presente che lavorerà ancora in ambiente marino è stata utilizzata acqua di mare dal peso di volume di  $1.025 \text{ kg/m}^3$

$u_e$  = eccesso di pressione interstiziale

$C_v = \frac{k}{\gamma_w m_v}$  = coefficiente di consolidazione primaria

La prova edometrica ad incrementi di carico si esegue applicando un carico assiale costante tramite un pistone posto al di sopra del provino. Tra il pistone ed il provino viene posta una pietra porosa che permette la fuoriuscita dell'acqua; un'altra pietra porosa è stata posta sul fondo della cella edometrica per lo stesso motivo. Al termine della consolidazione la prova viene ripetuta applicando un carico maggiore.

#### 2.2.2.2 *Apparecchiature necessarie.*

La norma ASTM D2435-04 raccomanda le seguenti componentistiche per l'esecuzione della prova di consolidazione monodimensionale:

1. CONSOLIDOMETRO: strumento per bloccare il campione in un anello che può essere fissato alla base o galleggiante (bloccaggio per attrito con le pareti del provino), con pietre porose su ogni faccia del provino. Il diametro interno dell'anello metallico deve avere una tolleranza minore o al più uguale a



0.075mm. Il consolidometro deve inoltre fornire un mezzo, per immergere il campione, per trasferire il carico centrato alle pietre porose e deve essere fornito di uno strumento in grado di misurare gli abbassamenti verificatisi.

- 1.1. DIAMETRO MINIMO DEL CAMPIONE: il diametro minimo del campione è 5cm
  - 1.2. ALTEZZA MINIMA DEL CAMPIONE: l'altezza minima iniziale del campione deve essere non inferiore a 12mm e comunque non minore di dieci volte il diametro massimo delle particelle
  - 1.3. RAPPORTO MINIMO D/H<sub>0</sub>: il rapporto deve essere superiore a 2.5
  - 1.4. RIGIDEZZA DELL'ANELLO DI CONFINAMENTO: quando il campione è sotto gradiente idraulico, la deformazione dell'anello non deve eccedere lo 0.03% sotto carico massimo
  - 1.5. MATERIALE DELL'ANELLO METALLICO: l'anello metallico non deve essere passibile di corrosione in relazione al campione sotto esame, la superficie interna deve essere lucida, o rivestita di un materiale a bassissimo coefficiente d'attrito, in modo che l'attrito fra la superficie interna e d il campione sia trascurabile. Sono raccomandati materiali quali grasso al silicone e disolfuro di molibdeno. Per terreni non sabbiosi si consiglia il politetrafluoroetilene.
2. PIETRE POROSE: le pietre porose devono essere di carburo di silicio, ossido di alluminio o comunque di materiale non corrosivo. I pori devono essere abbastanza piccoli da non consentire l'intrusione delle particelle di terreno al loro interno, se necessario, può essere interposta, tra campione e pietra porosa, della carta filtro. Comunque, la permeabilità della pietra porosa e della carta filtro, se usata, deve essere almeno un ordine di grandezza maggiore della permeabilità del campione
- 2.1. DIAMETRO: il diametro del disco superiore deve essere almeno 0.2-0.5 mm inferiore al diametro del disco. Nel caso si usi un anello galleggiante allora il disco inferiore deve avere lo stesso diametro di quello superiore.
  - 2.2. SPESSORE: lo spessore dei dischi deve essere sufficiente per evitare rotture. Il disco superiore deve essere caricato attraverso una piastra

resistente alla corrosione con rigidità sufficiente per impedire la rottura del disco.

- 2.3. MANUTENZIONE: i dischi devono essere puliti e privi di crepe, scheggiature e non uniformità. Prima di un nuovo utilizzo, i dischi porosi devono essere fatti bollire per almeno 10 minuti e lasciati raffreddare in acqua a temperatura ambiente. Dopo ogni utilizzo, pulire i dischi porosi con una spazzola non abrasiva e far bollire per rimuovere le particelle di argilla che potrebbero ridurre la permeabilità. Si consiglia di conservare i dischi porosi in un barattolo con acqua distillata.
3. DISPOSITIVO PER TAGLIARE IL CAMPIONE: un piatto girevole o un anello di taglio cilindrico possono essere usati per tagliare il campione fino al diametro interno dell'anello del consolidometro con un minimo disturbo. Una taglierina con lo stesso diametro interno dell'anello del campione deve attaccarsi o essere solidale con l'anello del campione. La taglierina deve avere un bordo affilato, una superficie lucidata e rivestita con materiale a basso attrito. In alternativa, è possibile utilizzare un tornio o un tornio di rifilatura. L'utensile da taglio deve essere correttamente allineato per formare un campione dello stesso diametro di quello dell'anello.
4. COMPARATORE: per misurare la variazione di altezza del campione, con una scala di 0.0025 mm.
5. AMBIENTE: il test deve essere condotto in un ambiente la cui temperatura cambia al massimo nell'intervallo di 4°C rispetto alla temperatura ambiente.

#### 2.2.2.3 Esecuzione della prova in laboratorio

La procedura seguita nell'ambito di queste prove di laboratorio, può essere così riassunta:

1. Setacciatura del sedimento per depurarlo da grani o inquinanti di grandi dimensioni che possono determinare la non buona riuscita della prova (pietrisco, conchiglie...)
2. Peso dell'anello metallico usato per confinare il provino, e della cella edometrica
3. Inserimento del sedimento all'interno dell'anello metallico e seguente inserimento nella cella edometrica

4. Misura del peso della cella edometrica con il campione inserito, per differenza si ricava il peso umido del campione oggetto d'indagine
5. Chiusura e serraggio delle viti della cella edometrica ed inserimento dell'acqua necessaria alla successiva saturazione del campione durante la fase di carico.
6. Inserimento della cella all'interno dell'edometro e conseguente primo carico.
7. Incremento di carico a cadenza giornaliera.
8. Fine della prova.

L'edometro utilizzato ha un sistema a leva con carico posteriore ed è dotato di un comparatore che consente di leggere i cedimenti ai suddetti intervalli di tempo.

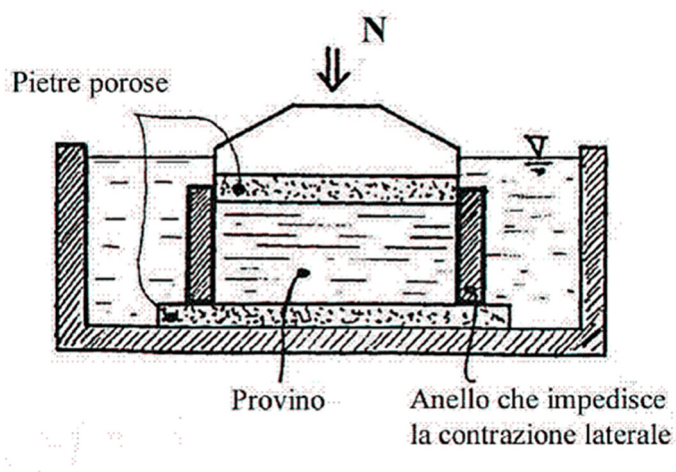


Figura 8: Schema di funzionamento della prova edometrica ad intervalli di carico costante.

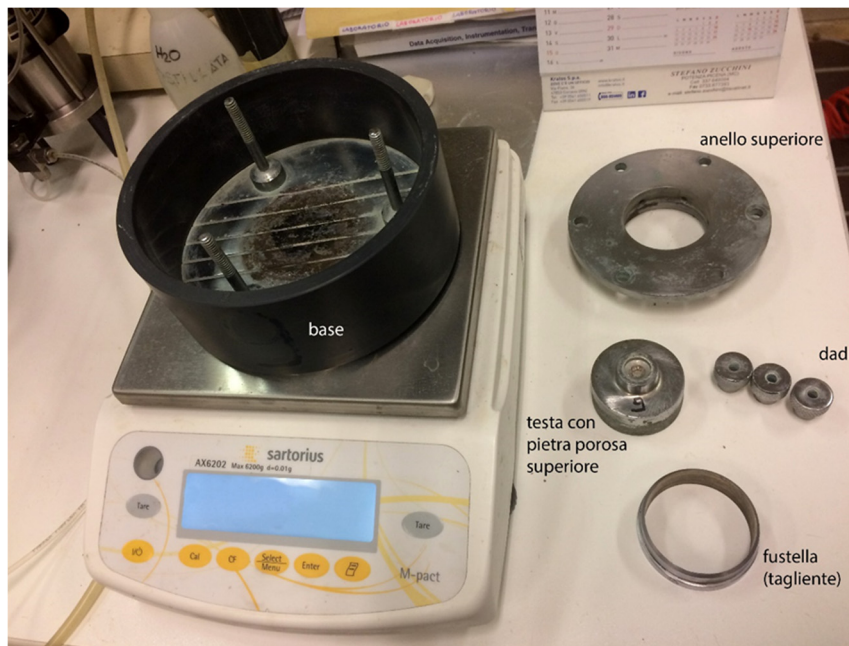
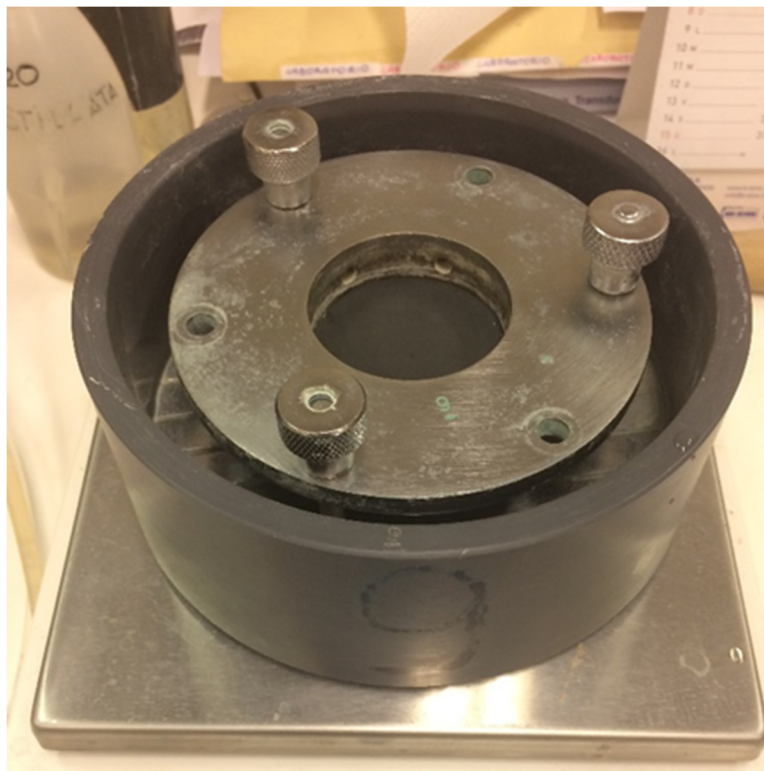


Figura 9: Componenti della cella edometrica.



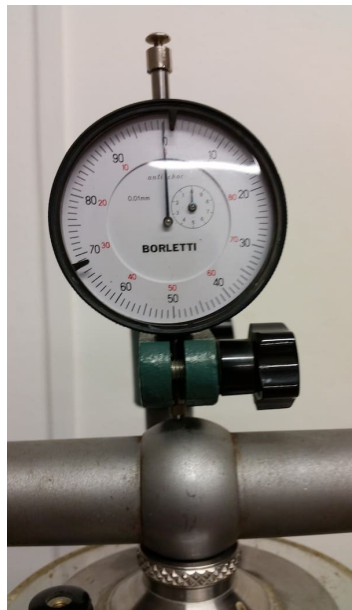
Figura 10: Posizionamento della fustella con sedimento sulla pietra porosa all'interno della base



*Figura 11: Avvitamento del cilindro superiore alla base.*



*Figura 12: Edometro scarico con inserita la fustella*



*Figura 13: Comparatore, utilizzato per leggere ad intervalli di tempo prestabiliti l'evoluzione nel tempo del cedimento.*

#### *2.2.2.4 Analisi dei dati secondo la procedura di Casagrande*

In sintesi, la prova edometrica ad incremento di carico consiste nell'applicazione di un carico verticale  $N$  che, mantenuto per un tempo tale da sviluppare l'intero cedimento, provoca il cedimento del campione.

Gli step di carico generalmente sono: 6.25 kPa, 12.5kPa, 25kPa, 50kPa, 100kPa, solitamente qui si procede allo scarico del provino a 50kPa e 25kPa, per poi procedere al ricarico 50kPa, 100kPa, 200kPa, 400kPa, 800kPa, 1600kPa, 3200kPa.

Negli step di scarico del provino si deve leggere il rigonfiamento che il campione restituisce nell'arco di 24 ore.

All'interno del singolo step di carico si programmano letture del cedimento ad intervalli di tempo stabiliti, nel caso della prova eseguita gli intervalli di tempo sono stati: 6s, 15s, 30s, 1min, 2min, 4min, 8min, 15min, 30min, 1h, 2h, 4h, 8h, 24h.

Con le letture precedentemente citate si può costruire una curva tempo-cedimento per ogni singolo step di carico, utile per valutare le varie fasi del cedimento nonché per ricavare grandezze fisiche che caratterizzano il terreno da un punto di vista geotecnico quali:

- $E_{cd}$ = Modulo di deformazione edometrico

- $C_v$ = Coefficiente di consolidazione primaria
- $C_{\alpha\varepsilon}$ = Coefficiente di consolidazione secondaria
- $\varepsilon_a$ = Deformazione di consolidazione
- $k$ = Coefficiente di conducibilità idraulica ( $C_v \frac{\gamma_w}{E_{ed}}$ )

Per l'interpretazione di queste curve si ricorre a due costruzioni grafiche, quella di Casagrande e quella di Taylor.

L'interpretazione di Casagrande, più precisa per gli step di carico fino ai 400kPa, consente di ricavare il  $t_{100}$ , ovvero il valore del tempo che corrisponde alla fine della consolidazione primaria. In realtà ha più senso dire che consente di trovare il punto ( $t_{100}$ ;  $d_{100}$ ), punto che distingue il cedimento associato alla consolidazione primaria quello associato ai fenomeni di tipo viscoso (consolidazione secondaria). Ovviamente i due cedimenti non sono divisi da una linea ma, nella fase finale dell'intero processo di consolidazione il cedimento dovuto alla consolidazione secondaria diviene non trascurabile.

Il metodo per la determinazione del coefficiente di consolidazione primaria secondo Casagrande prevede:

- la curva tempo-cedimento sia rappresentata in  $\log t$  in modo che questa assuma la tipica forma "ad esse"; il primo tratto, con concavità verso il basso, ed il secondo tratto con concavità verso l'alto, separate da un punto di flesso.
- Si devono disegnare due rette, la prima rappresentativa delle letture finali, che abbia coefficiente angolare diverso da 0 altrimenti si ammetterebbe che non ci sia consolidazione secondaria, ipotesi irrealistica.
- La seconda retta deve passare per i due punti che individuano il segmento con maggior pendenza.
- Il punto d'intersezione delle due rette rappresenta avrà coordinate ( $t_{100}$ ;  $d_{100}$ ); per tempi minori di  $t_{100}$  si avrà quindi cedimento dovuto a consolidazione primaria, mentre per tempi maggiori di  $t_{100}$  il cedimento sarà associato alla consolidazione secondaria, dovuta principalmente allo scorrimento viscoso delle particelle l'una sull'altra.

- Si deve ora determinare la deformazione corrispondente allo 0% della consolidazione; si prendono quindi due punti arbitrari  $t_1$  e  $t_{1/4}$  con  $t_1$  minore della metà del cedimento di consolidazione primaria, la deformazione sarà quella corrispondente al  $t$  minore a meno della differenza delle due deformazioni dei punti scelti arbitrariamente.
- Noti ora gli estremi della consolidazione  $U=0\%$  e  $U=100\%$ , si determina il  $t_{50}$ , tempo relativo a metà del tempo di fine consolidazione.
- Avendo, nei punti sopra, determinato  $t_{50}$  e calcolando il tempo adimensionale  $T_v$  a questo associato, assumendo inoltre  $H_d$  pari alla metà di  $H$  del campione (lecito in quanto siamo in condizione di doppio drenaggio), si può ricavare il  $C_v$  con la seguente espressione:

$$C_v = \frac{T_v H_d^2}{t}$$

#### 2.2.2.5 *Analisi dei dati secondo il metodo di Taylor*

Per quanto riguarda la determinazione del coefficiente di consolidazione primaria con la metodologia di Taylor, si può affermare che questa diviene molto più precisa per gli step di carico maggiori quali 800kPa, 1600kPa e 3200kPa.

Tale metodologia può essere sintetizzata come segue:

- La curva viene rappresentata nel sistema cartesiano dove sulle ascisse si riporta la radice del tempo e sulle ordinate il cedimento. Si costruisce una retta che passa per i punti iniziali della curva, rappresentativa delle fasi iniziali della consolidazione. Si costruisce un'altra retta i cui punti abbiano ascissa pari a 1.15 volte l'ascissa della retta precedente.
- Dall'intersezione di questa seconda retta, con ascissa maggiorata del 15% rispetto a quella rappresentativa degli attimi iniziali della consolidazione, con la curva si ricava il  $t_{90}$ , a cui corrisponderà un  $d_{90}$ .
- Il cedimento di fine consolidazione è 1/9 maggiore della differenza tra il cedimento tra  $U=0\%$  e  $U=90\%$
- Si potrà ora determinare il tempo adimensionalizzato  $T_v$  e quindi seguentemente il valore del coefficiente di consolidazione primaria  $C_v$ .



Di seguito vengono riportate le interpretazioni secondo il metodo di Casagrande delle varie prove edometriche effettuate su sedimenti provenienti da differenti zone delle Marche citati nel precedente capitolo.

I valori della deformazione assiale e/o dell'indice dei vuoti corrispondenti al termine del processo di consolidazione primaria per ciascun gradino di carico vengono diagrammati in funzione della corrispondente pressione verticale media

$$\text{efficace: } \sigma'_v = \frac{N}{A} = \frac{4N}{\pi D^2} .$$

Dalla costruzione della curva indice dei vuoti–tensioni efficaci è possibile ricavare:

- Parametri di compressibilità (in funzione dello step di carico/scarico considerato):
  - $c_c$  (indice di compressione vergine)
  - $c_r$  (indice di ricomprensione)
  - $c_s$  (indice di scarico);
- $\sigma'_p$  = pressione di pre-consolidazione;

#### 2.2.2.6 Resoconto delle prove edometriche eseguite in laboratorio

I seguenti grafici e tabelle (figura dalla 14 alla 23 e tabelle 2 e 3) sono riferiti al provino 1 del sedimento denominato ISAPALUMBO.

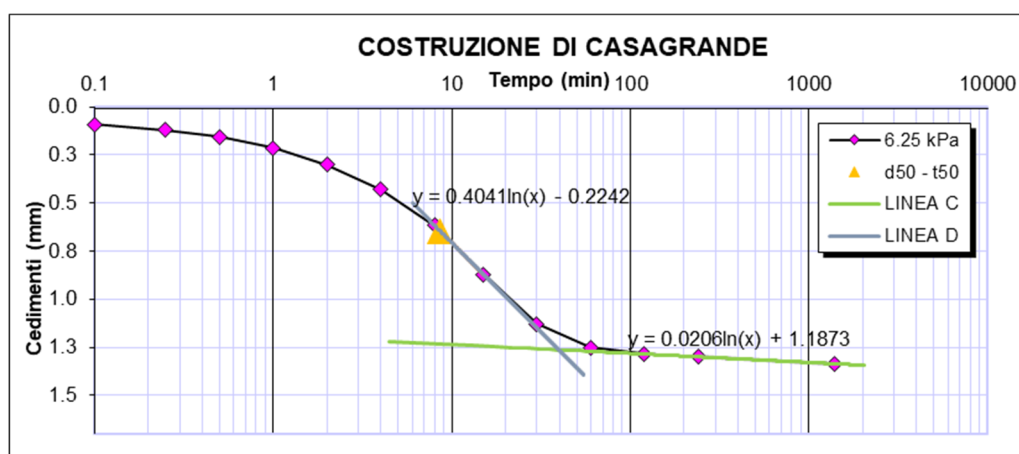


Figura 14: Curva cedimento-log(t) relativa allo step di carico 6,25 kPa

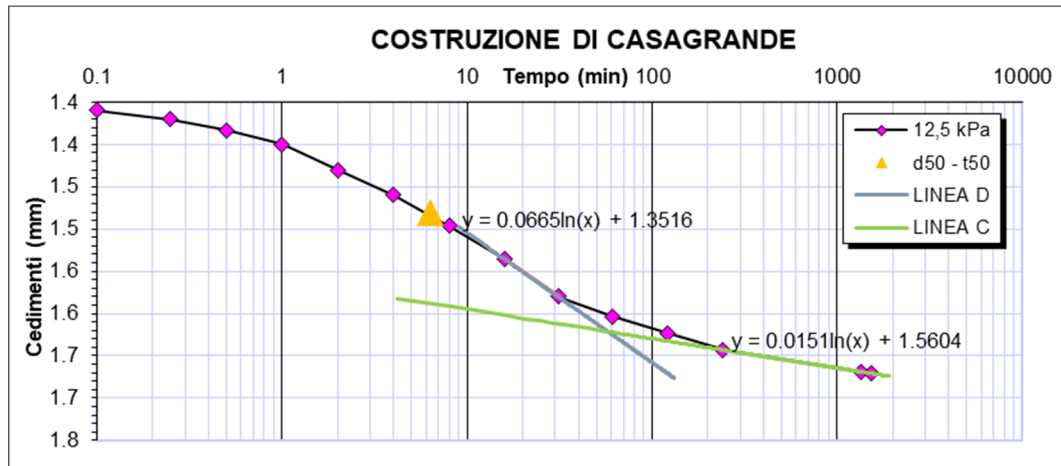


Figura 15: Curva cedimento- $\log(t)$  relativa allo step di carico 12,5 kPa

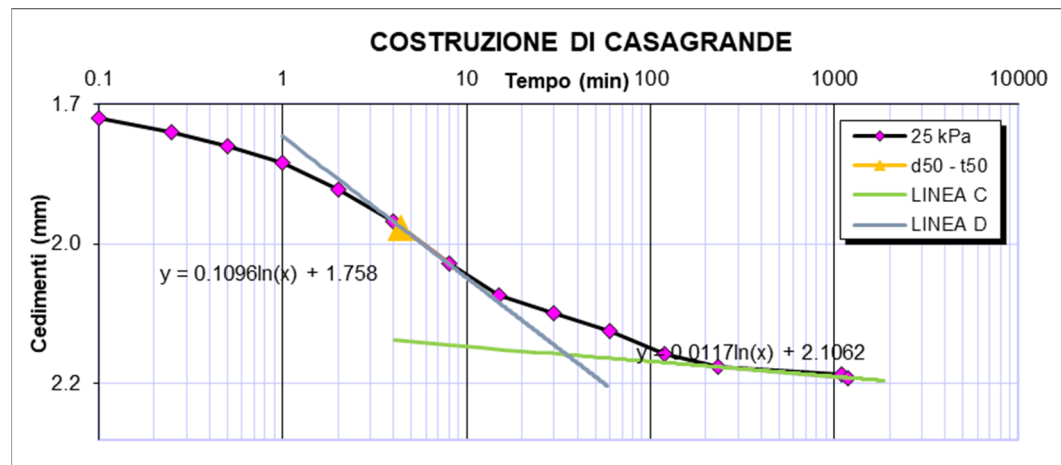


Figura 16: Curva cedimento- $\log(t)$  relativa allo step di carico 25 kPa

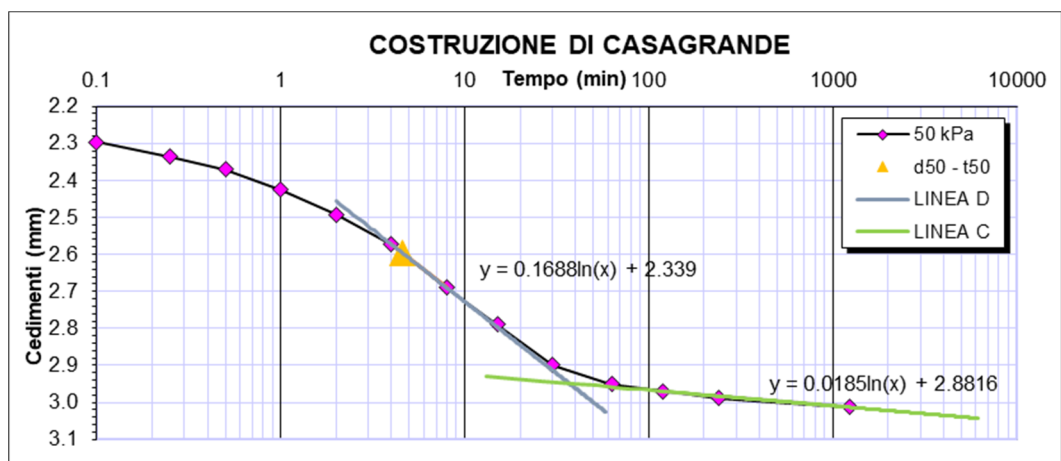


Figura 17: Curva cedimento- $\log(t)$  relativa allo step di carico 50 kPa

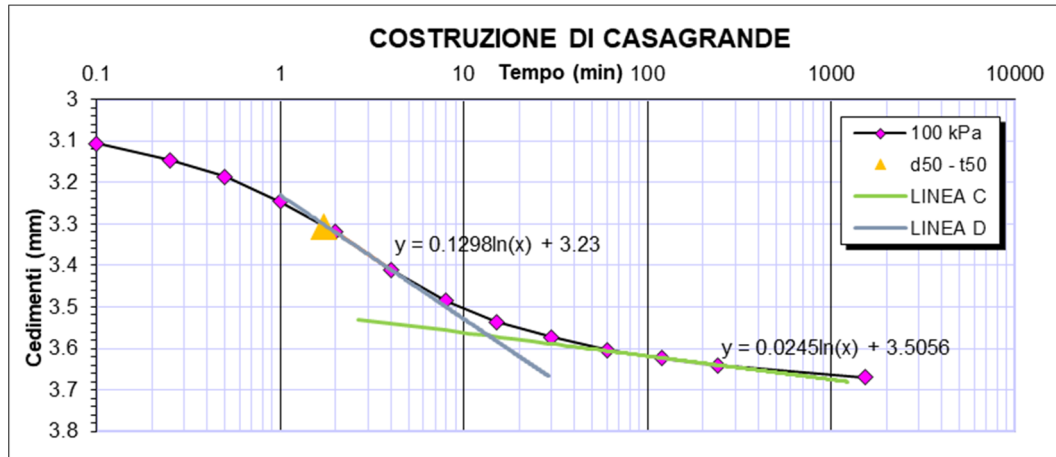


Figura 18: Curva cedimento-log(t) relativa allo step di carico 100 kPa

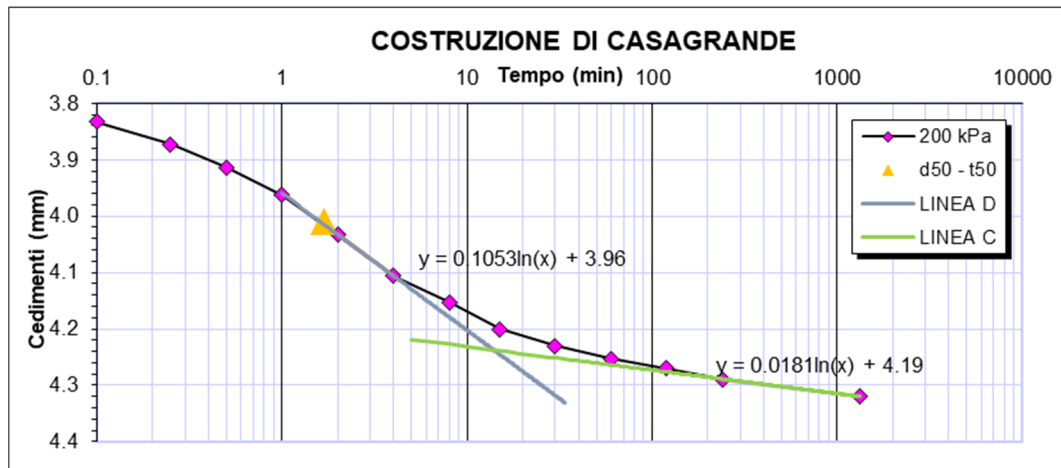


Figura 19: Curva cedimento-log(t) relativa allo step di carico 200 kPa

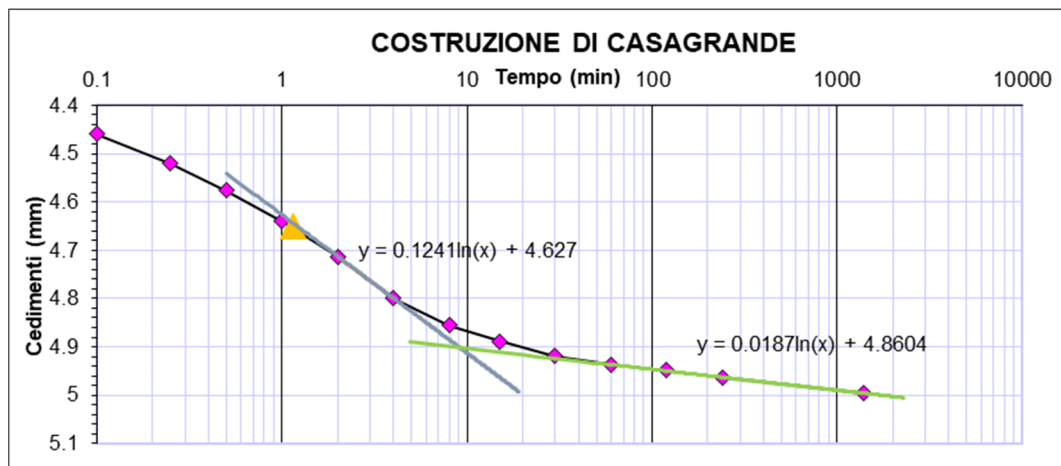


Figura 20: Curva cedimento-log(t) relativa allo step di carico 400 kPa

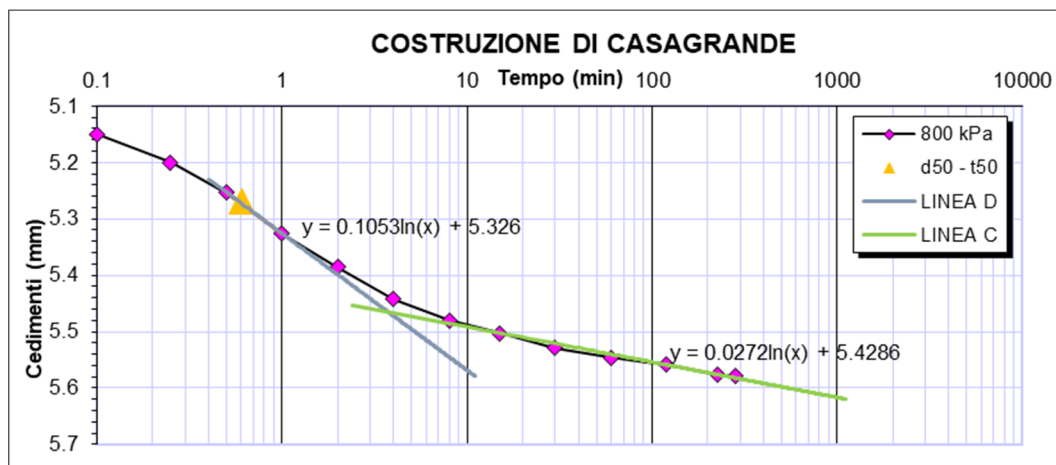


Figura 21: Curva cedimento-log(t) relativa allo step di carico 800 kPa

pressione verticale [kPa]	$\Delta H$ [mm]	cedimento progressivo [mm]	deformazione assiale [%]	$E_{ed}$ [Mpa]	$e$ (primario)
6,25	1,236	1,236	6,611	0,095	0,945
12,5	0,282	0,282	1,653	0,378	0,865
25	0,454	0,735	4,319	0,469	0,815
50	0,702	1,438	8,443	0,606	0,736
100	0,524	1,961	11,519	1,625	0,678
200	0,455	2,416	14,190	3,745	0,627
400	0,502	2,918	17,137	6,785	0,572
800	0,390	3,308	19,430	17,445	0,528

Tabella 2: Tabella relativa al provino 1 derivante dai sedimenti "Isa Palumbo", in cui  $\Delta H$  identifica la variazione di altezza del provino,  $E_{ed}$  è il modulo di deformazione in condizioni edometriche, e rappresenta l'indice dei vuoti

pressione verticale [kPa]	$C_r/C_c/C_s$	$D_{50}$	$t_{50}$	Casagrande	
				$C_v$ [cm <sup>2</sup> /s]	$K$ [m/s]
6,25	0,000	0,645	8,623	3,1E-04	3,3E-09
12,5	0,265	1,481	6,306	3,1E-04	8,4E-10
25	0,168	1,921	4,382	4,3E-04	9,2E-10
50	0,260	2,597	4,603	3,7E-04	6,2E-10

100	0,194	3,308	1,731	8,9E-04	5,5E-10
200	0,168	4,010	1,676	8,3E-04	2,2E-10
400	0,186	4,651	1,150	1,1E-03	1,6E-10
800	0,144	5,269	0,611	1,9E-03	1,1E-10

Tabella 3: 5 Dati ricavati per mezzo della curva cedimento tempo per ogni incremento di carico per il provino 1 ricavato dai sedimenti "Isa Palumbo", in cui  $C_r$ = indice di ricomprensione,  $C_c$ = indice di compressione vergine,  $C_s$ = indice di scarico,  $C_v$ = coefficiente

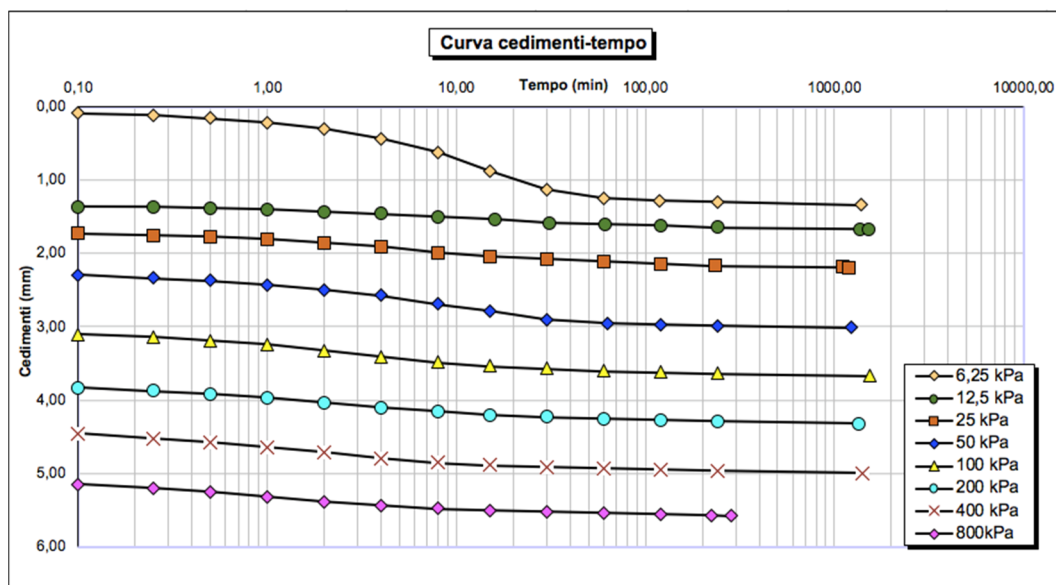


Figura 22: Curva cedimenti tempo secondo la costruzione di Casagrande relative ai diversi incrementi di carico

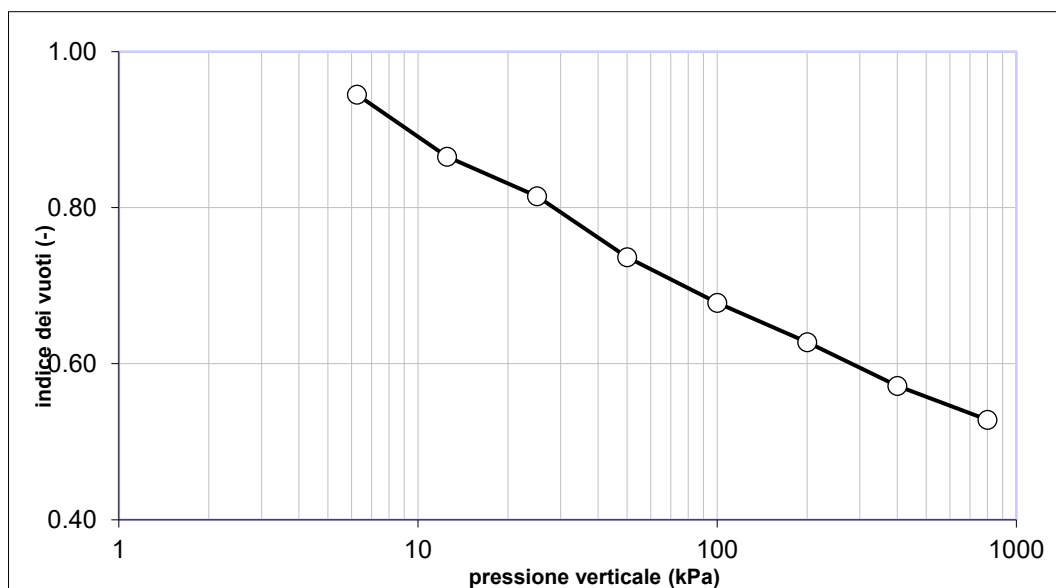


Figura 23: Curva di compressibilità per il provino 1 "Isa Palumbo"

I seguenti grafici e tabelle (figura dalla 24 alla 26 e tabelle 6 e 7) sono riferiti al provino 2 del sedimento denominato ISAPALUMBO.

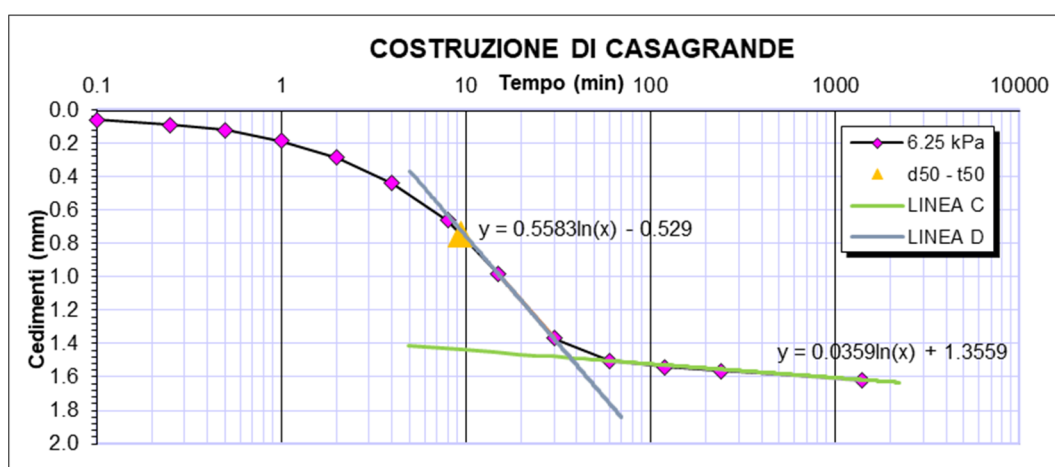


Figura 24: Curva cedimenti- $\log(t)$  con carico applicato di 6,25 kPa

Durante il corso della prova purtroppo, il comparatore si è bloccato e le curve di carico dalla 12,5 kPa a 200 kPa (comprese) sono delle rette, si è quindi deciso di non inserirle in quanto non danno alcun contributo alla conoscenza del terreno.

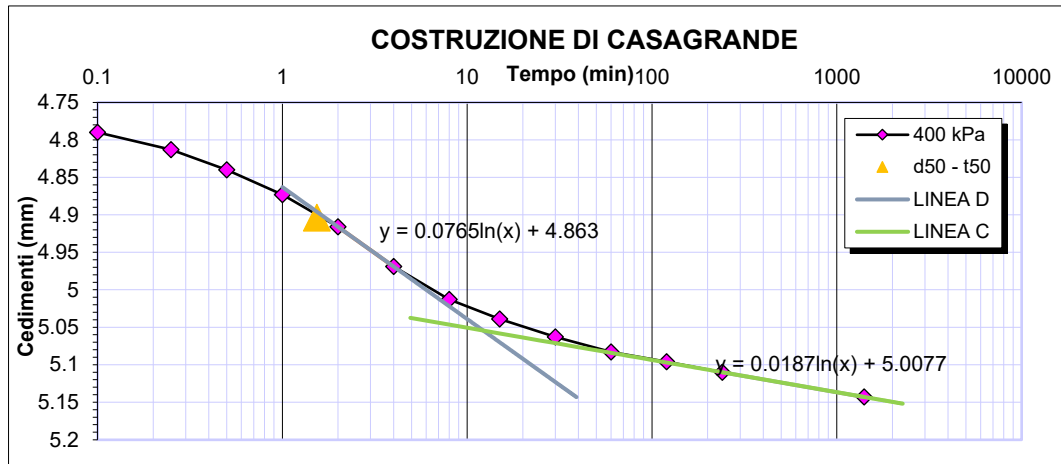


Figura 25: Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 400 kPa

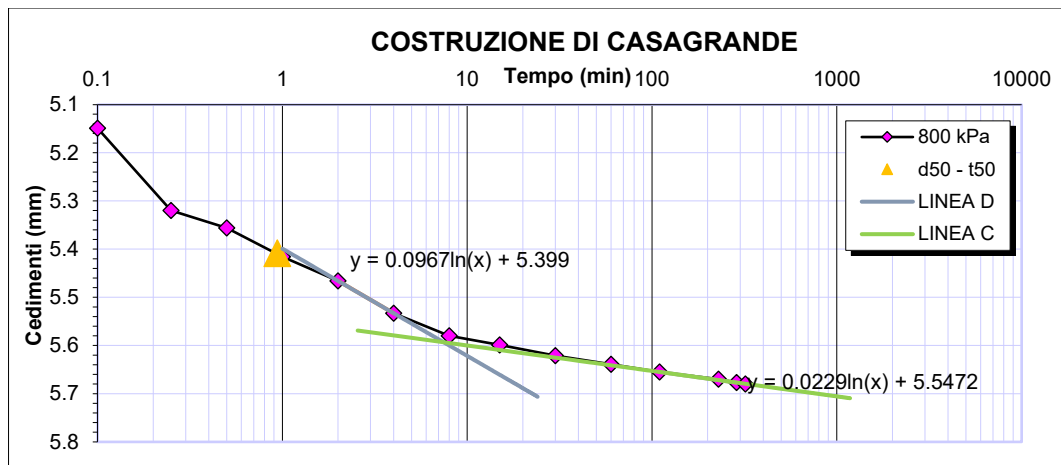


Figura 26: Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 800 kPa

I seguenti grafici e tabelle (figura 27 dalla 36 alla e tabelle 4 e 5) sono riferiti al provino 1 del sedimento denominato MARINA DORICA.

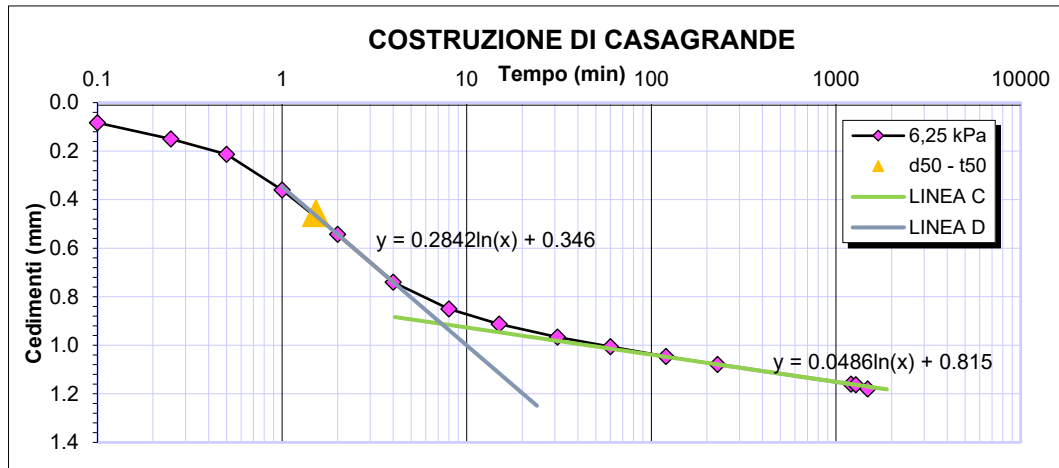


Figura 27: Curva cedimenti- $\log(t)$  con carico applicato di 6,25 kPa

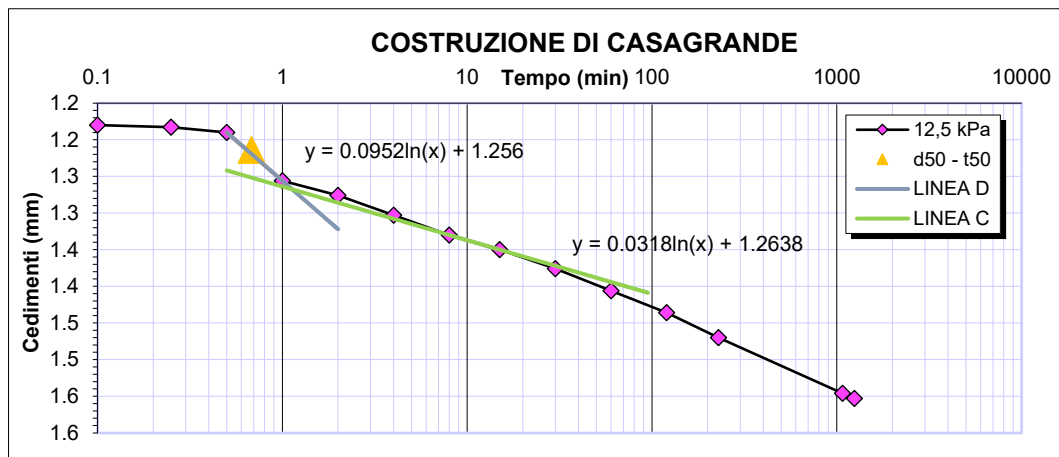


Figura 28: Curva cedimenti- $\log(t)$  con carico applicato di 12,5 kPa

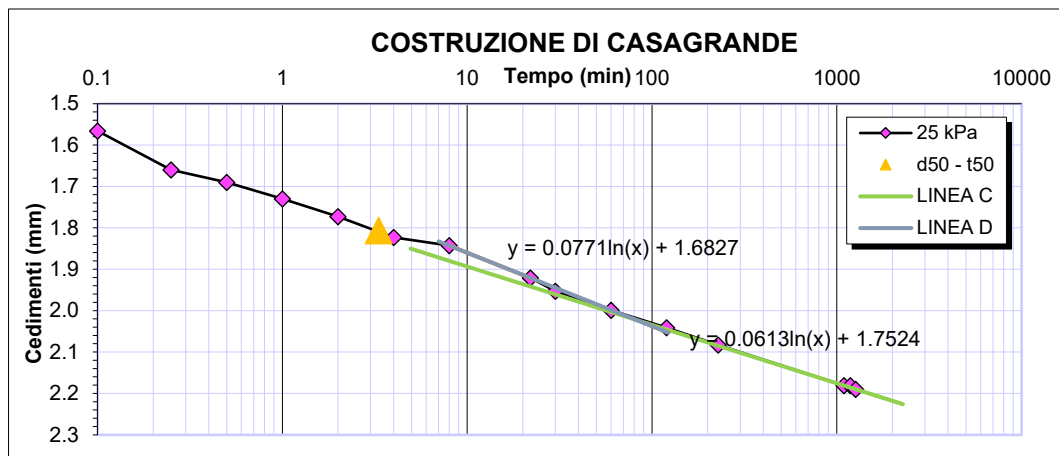


Figura 29: Curva cedimenti- $\log(t)$  con carico applicato di 25 kPa



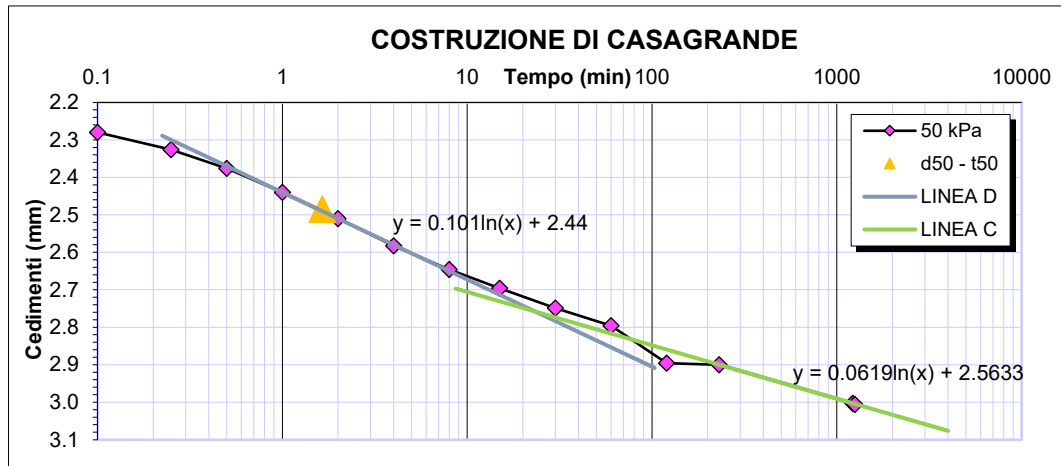


Figura 30: Curva cedimenti- $\log(t)$  con carico applicato di 50 kPa

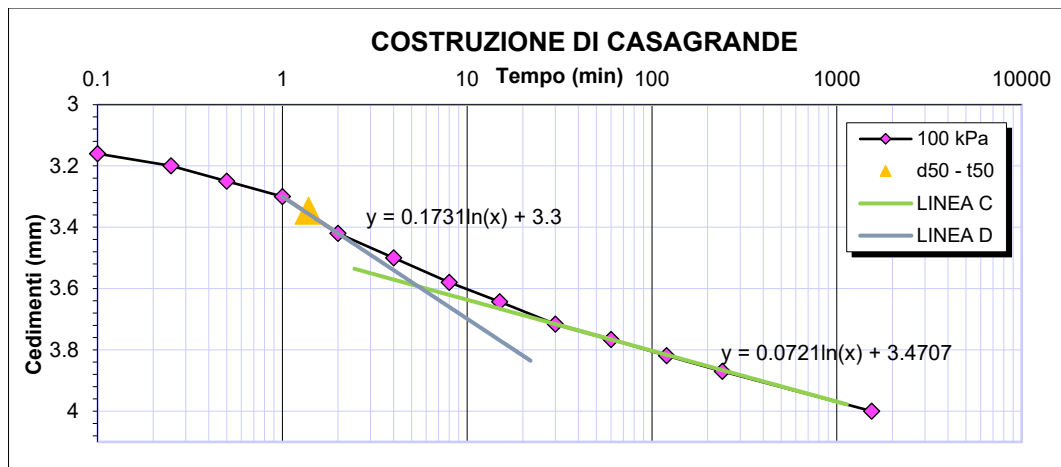


Figura 31: Curva cedimenti- $\log(t)$  con carico applicato di 100 kPa

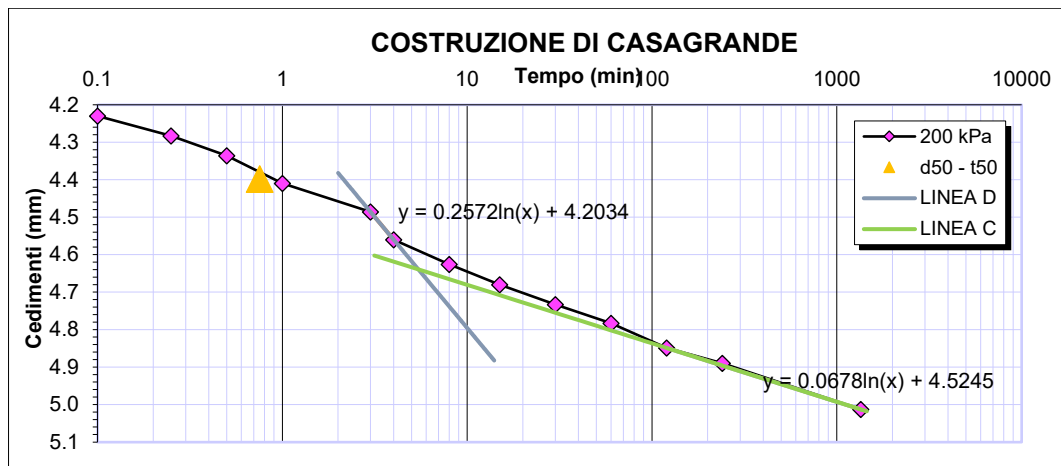


Figura 32: Curva cedimenti- $\log(t)$  con carico applicato di 200 kPa

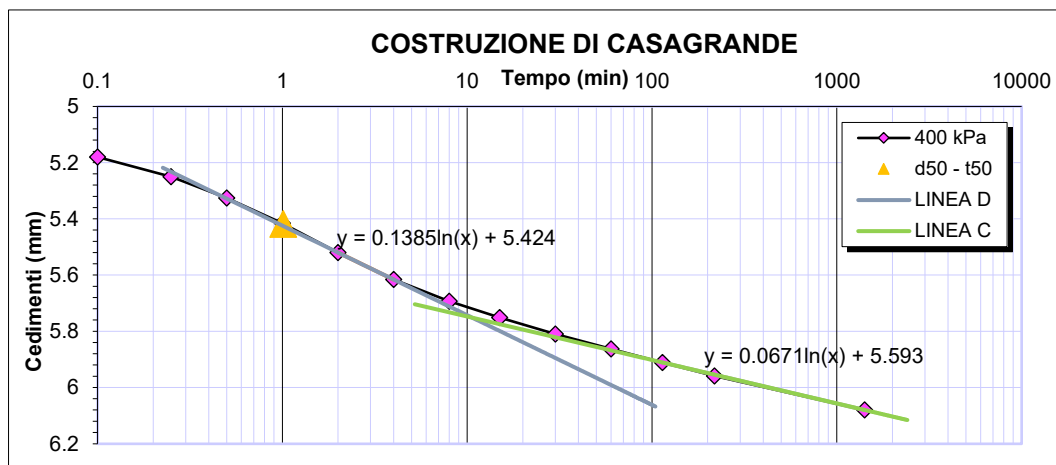


Figura 33: Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 400 kPa

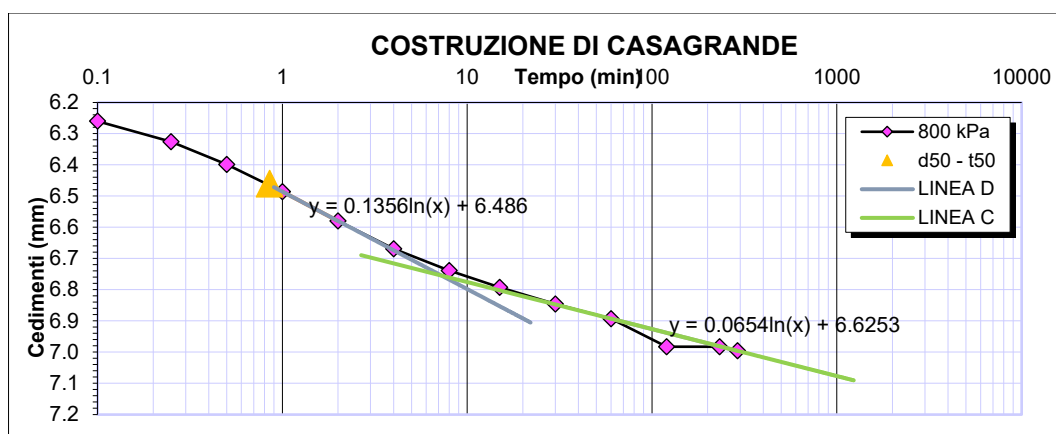


Figura 34: Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 800 kPa

pressione verticale [kPa]	$\Delta H$ [mm]	cedimento progressivo [mm]	deformazione assiale [%]	$E_{ed}$ [Mpa]	$e$ (primario)
6,25	0,912	0,912	5,486	0,114	2,46
12,5	0,108	0,108	0,715	0,874	2,29
25	0,432	0,540	3,583	0,436	2,20
50	0,546	1,086	7,209	0,689	2,08
100	0,493	1,579	10,478	1,529	1,97
200	0,483	2,062	13,686	3,117	1,86
400	0,668	2,730	18,120	4,511	1,72
800	0,589	3,319	22,029	10,232	1,59

Tabella 4: Tabella relativa al provino 1 derivante dai sedimenti "Marina Dorica", in cui  $\Delta H$  = variazione di altezza del provino,  $E_{ed}$  = modulo di deformazione in condizioni edometriche,  $e$  = indice dei vuoti

	Cr/Cc/Cs	D50	t50	Casagrande
--	----------	-----	-----	------------

pressione verticale kPa				$C_v$ [cm <sup>2</sup> /s]	$K$ [m/s]
6,25	0,000	0,456	1,524	1,4E-03	1,2E-08
12,5	0,548	1,214	0,681	2,3E-03	2,7E-09
25	0,316	1,806	3,321	4,3E-04	1,0E-09
50	0,399	2,485	1,645	7,9E-04	1,2E-09
100	0,360	3,346	1,386	8,1E-04	5,4E-10
200	0,353	4,398	0,754	1,2E-03	4,0E-10
400	0,488	5,418	1,011	7,6E-04	1,7E-10
800	0,431	6,461	0,854	7,1E-04	7,0E-11

Tabella 5: Dati ricavati per mezzo della curva cedimento tempo per ogni incremento di carico per il provino 1 ricavato dai sedimenti "Marina Dorica", in cui  $C_r$ = indice di ricomprensione,  $C_c$ = indice di compressione vergine,  $C_s$ = indice di scarico,  $C_v$ = coefficiente

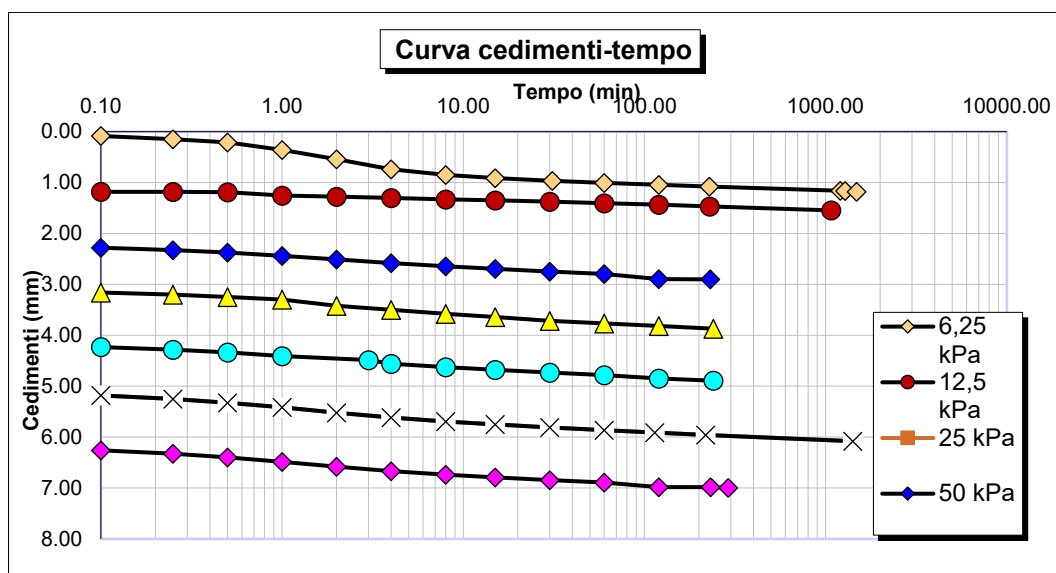


Figura 35: Curva cedimenti tempo secondo la costruzione di Casagrande relative ai diversi incrementi di carico

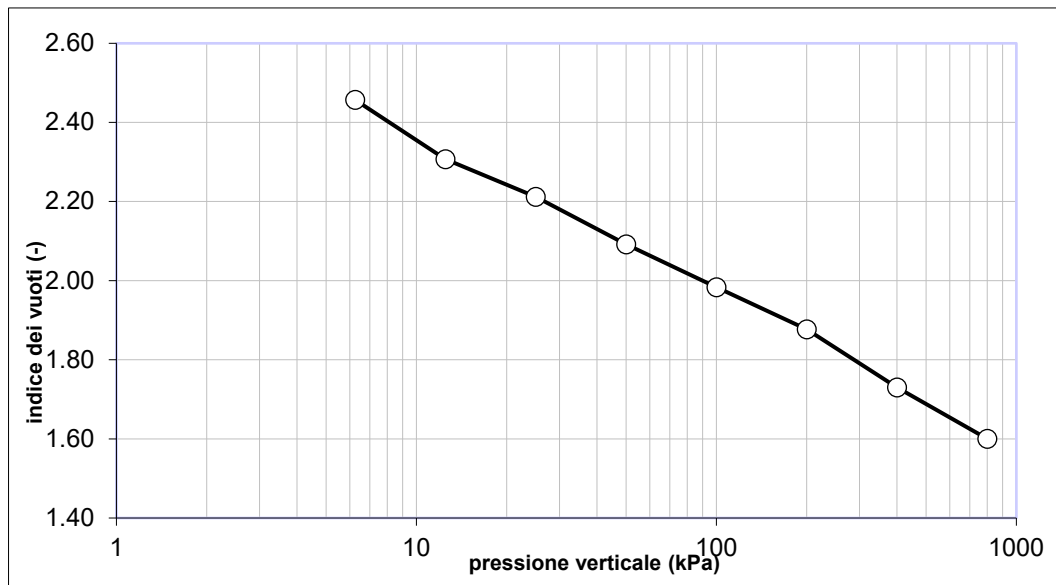


Figura 36: Curva di compressibilità per il provino 1 "Marina Dorica"

I seguenti grafici e tabelle (figuradalla 37 alla 45 e tabelle 6 e 7) sono riferiti al provino 2 del sedimento denominato MARINA DORICA.

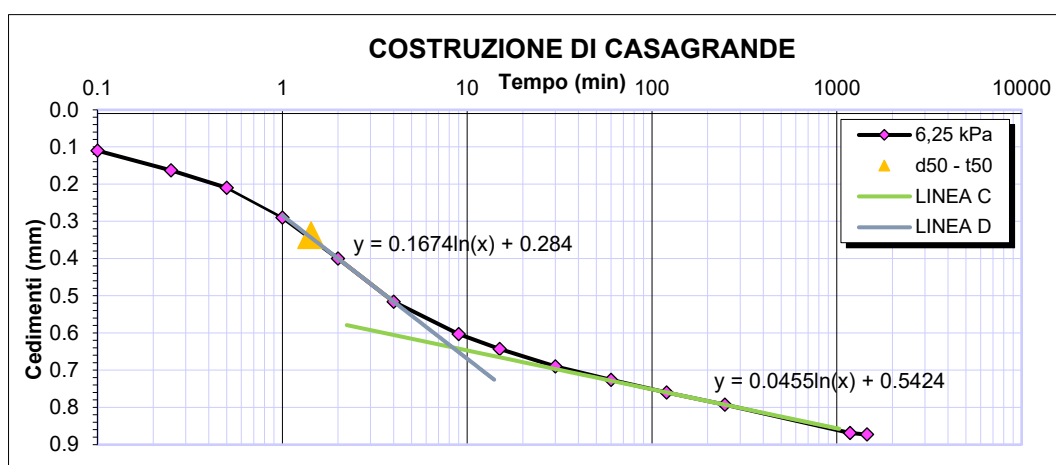


Figura 37: Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 6,25 kPa

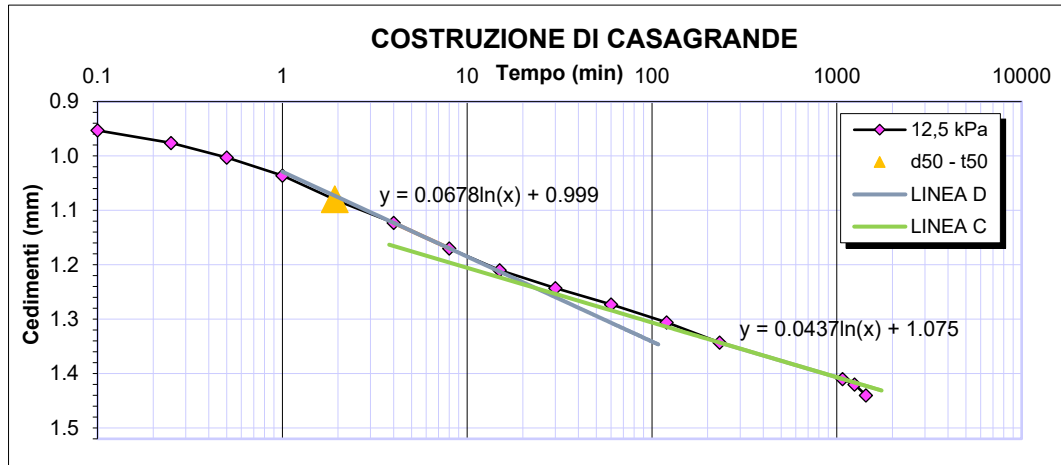


Figura 38: Curva cedimenti- $\log(t)$  con carico applicato di 12,5 kPa

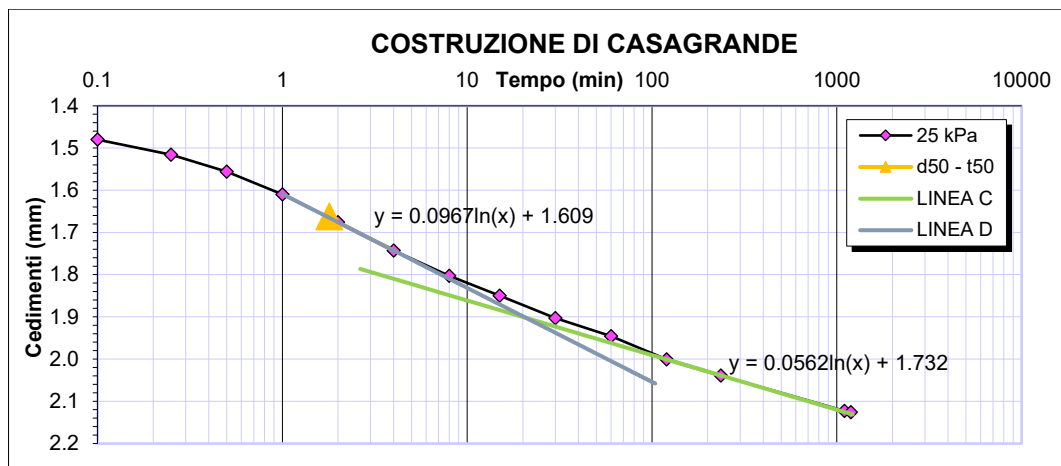


Figura 39: Curva cedimenti- $\log(t)$  con carico applicato di 50 kPa

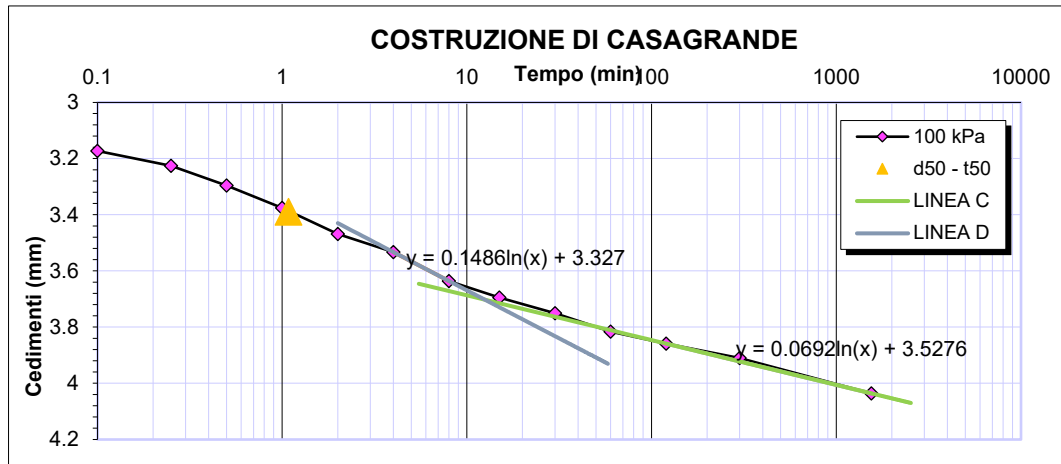


Figura 40: Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 100 kPa

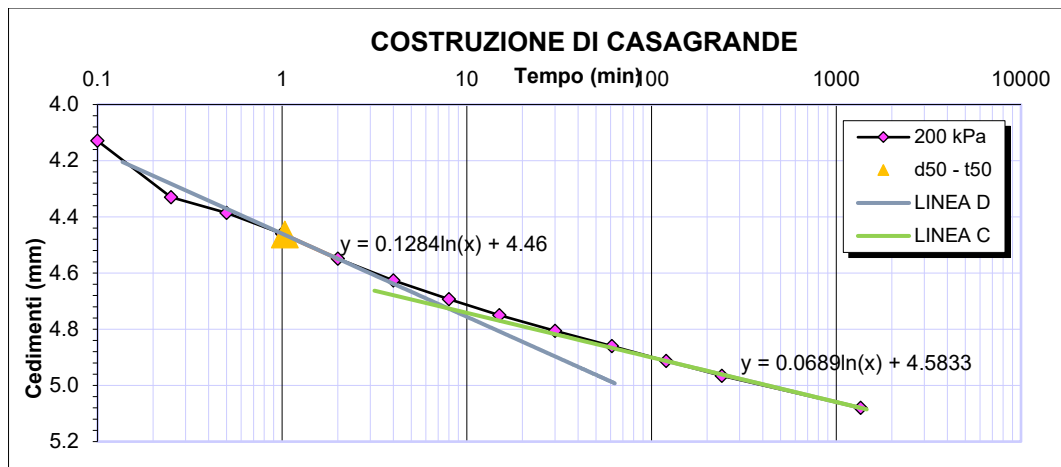


Figura 41: Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 200 kPa

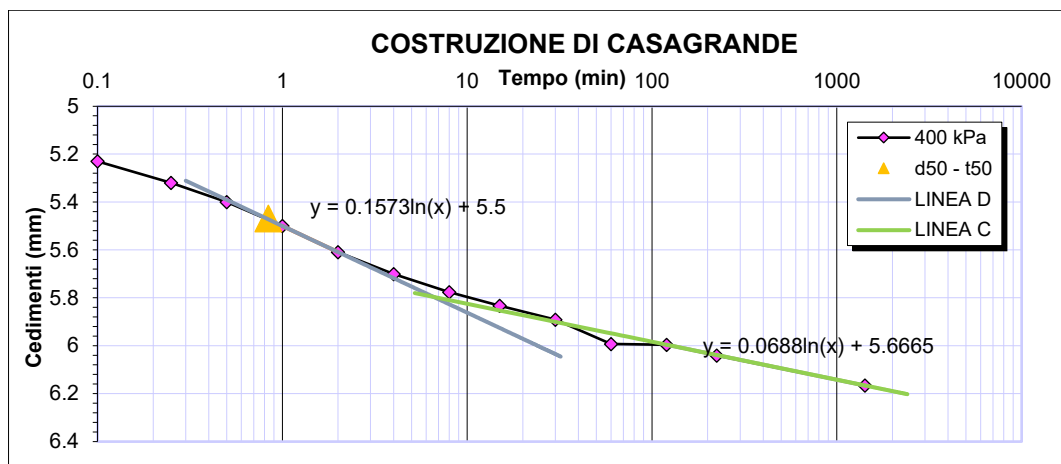


Figura 42: Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 400 kPa

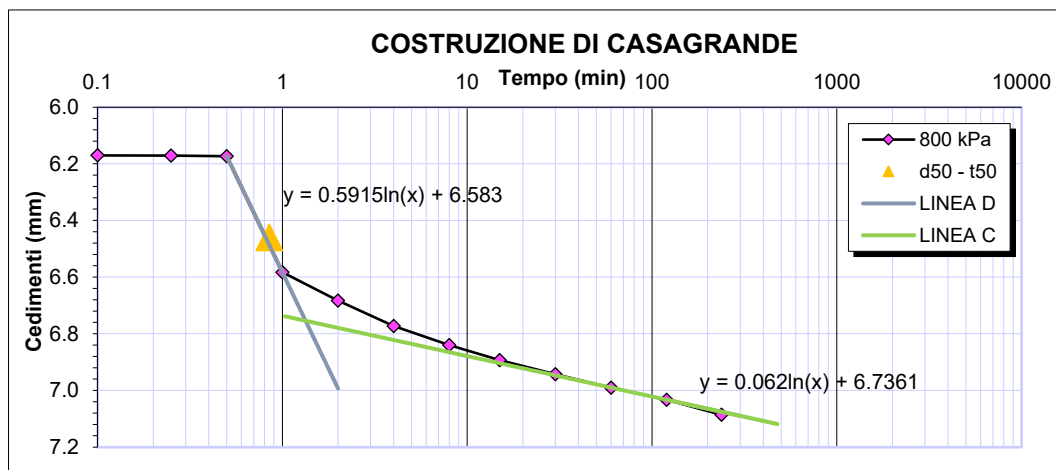


Figura 43: Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 800

pressione verticale [kPa]	$\Delta H$ [mm]	cedimento progressivo [mm]	deformazione assiale [%]	$E_{ed}$ [Mpa]	$e$ (primario)
6,25	0,603	0,603	3,619	0,173	2,427
12,5	0,327	0,327	2,144	0,292	2,185
25	0,481	0,808	5,298	0,396	2,082
50	0,574	1,382	9,065	0,664	1,960
100	0,627	2,008	13,175	1,216	1,826
200	0,526	2,534	16,626	2,898	1,714
400	0,656	3,190	20,930	4,646	1,573
800	0,588	3,778	24,787	10,370	1,448

Tabella 6: Tabella relativa al provino 2 derivante dai sedimenti "Marina Dorica", in cui  $\Delta H$  = variazione di altezza del provino,  $E_{ed}$  = modulo di deformazione in condizioni edometriche,  $e$  = indice dei vuoti

pressione verticale [kPa]	$C_r/C_c/C_s$	D50	t50	Casagrande	
				$C_v$ [cm <sup>2</sup> /s]	$K$ [m/s]
6,25	0,000	0,337	1,431	1,5E-03	8,9E-09
12,5	0,804	1,049	1,923	8,6E-04	3,0E-09
25	0,341	1,662	1,794	8,4E-04	2,1E-09
50	0,407	2,454	1,254	1,1E-03	1,6E-09
100	0,444	3,389	1,083	1,1E-03	8,8E-10
200	0,373	4,463	1,033	9,2E-04	3,2E-10
400	0,465	5,468	0,840	9,3E-04	2,0E-10
800	0,417	6,460	0,850	7,4E-04	7,2E-11

Tabella 7: Dati ricavati della curva cedimento tempo ad ogni incremento di carico ricavato dai sedimenti "Marina Dorica", in cui  $C_r$ = indice di ricomprensione,  $C_c$ = indice di compressione vergine,  $C_s$ = indice di scarico,  $C_v$ = coefficiente di consolidazione

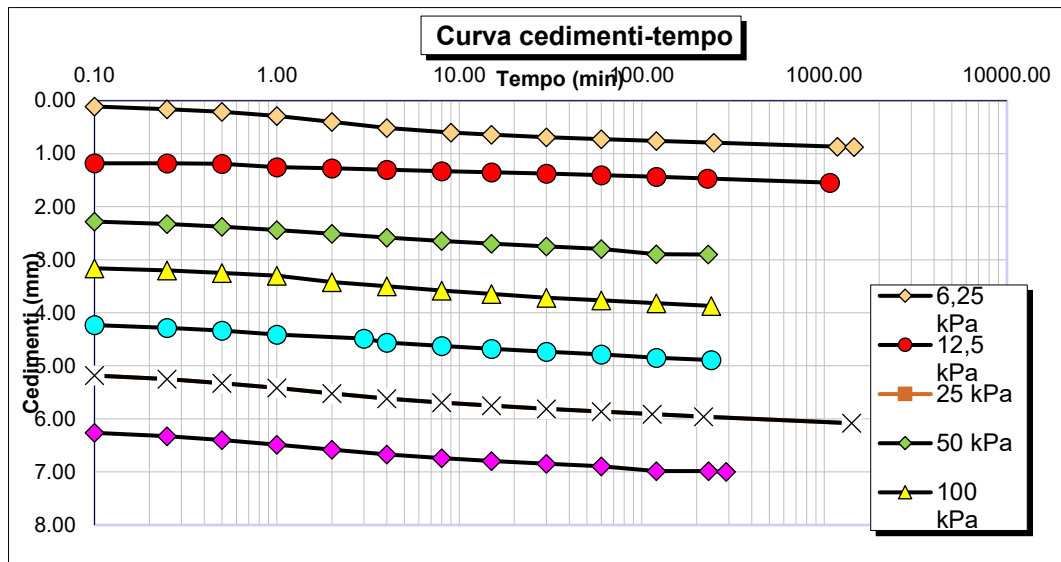


Figura 44: Curva cedimenti tempo secondo la costruzione di Casagrande relative ai diversi incrementi di carico

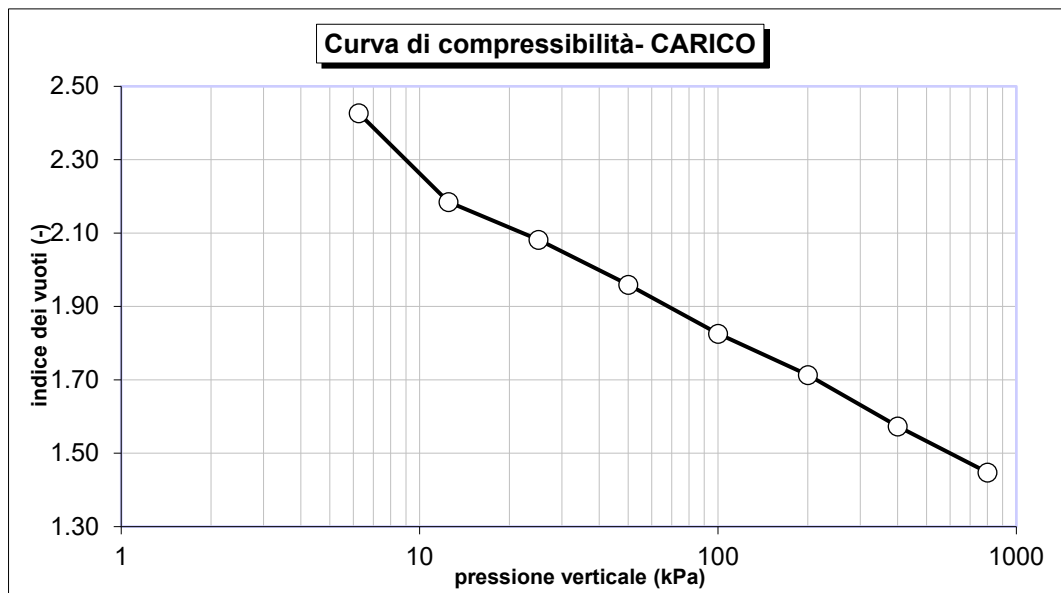


Figura 45: Curva di compressibilità per il provino 2 "Marina Dorica"



I seguenti grafici e tabelle (figura dalla 46 alla 55 e tabelle 9 e 10) sono riferiti al provino del sedimento denominato FANO.

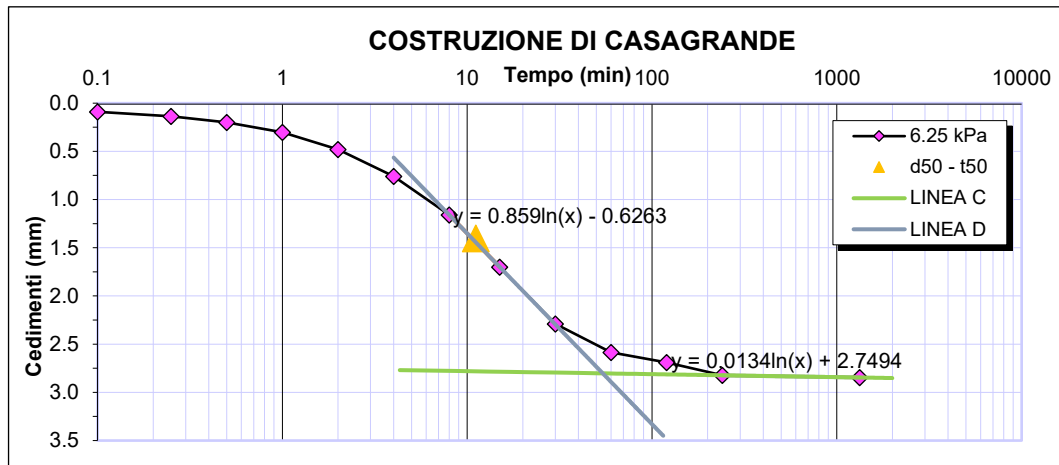


Figura 46: Curva cedimenti- $\log(t)$  con carico applicato di 6,25 kPa

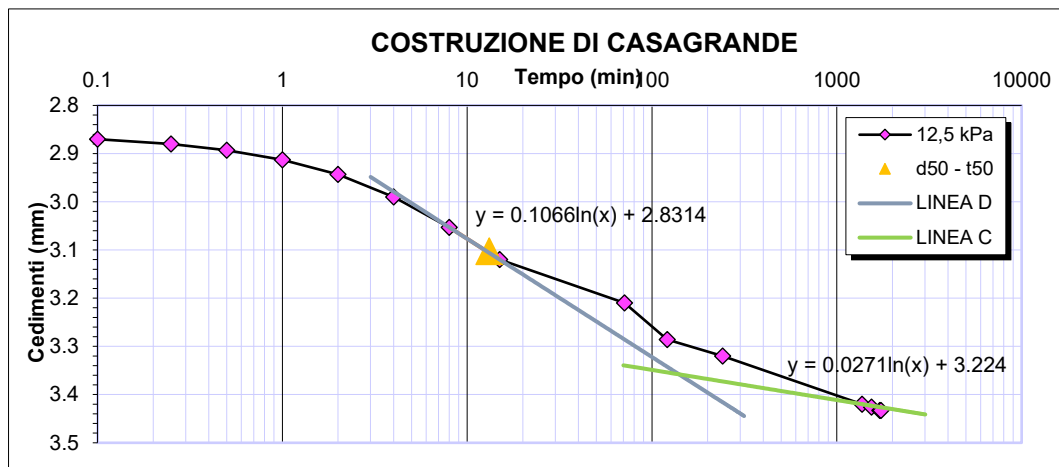


Figura 47: Curva cedimenti- $\log(t)$  con carico applicato di 12,5 kPa

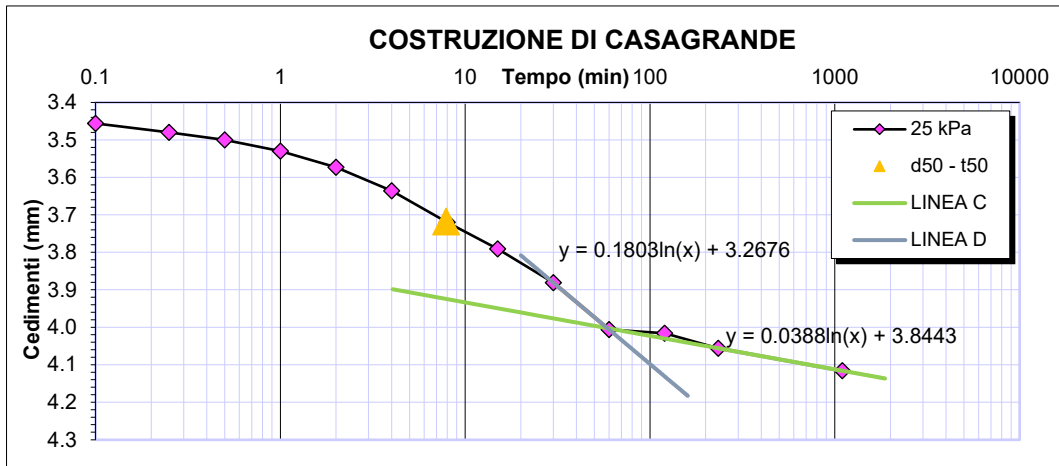


Figura 48: Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 25 kPa

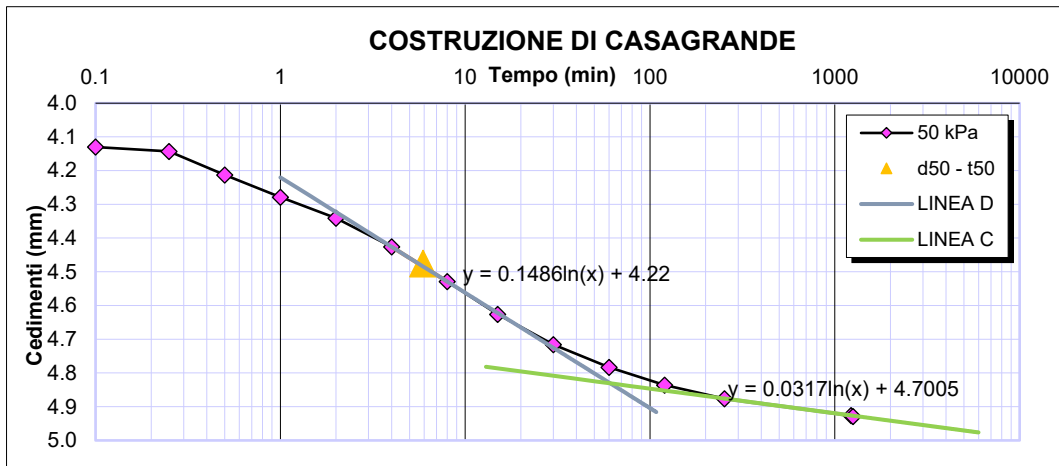


Figura 49: Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 50 kPa

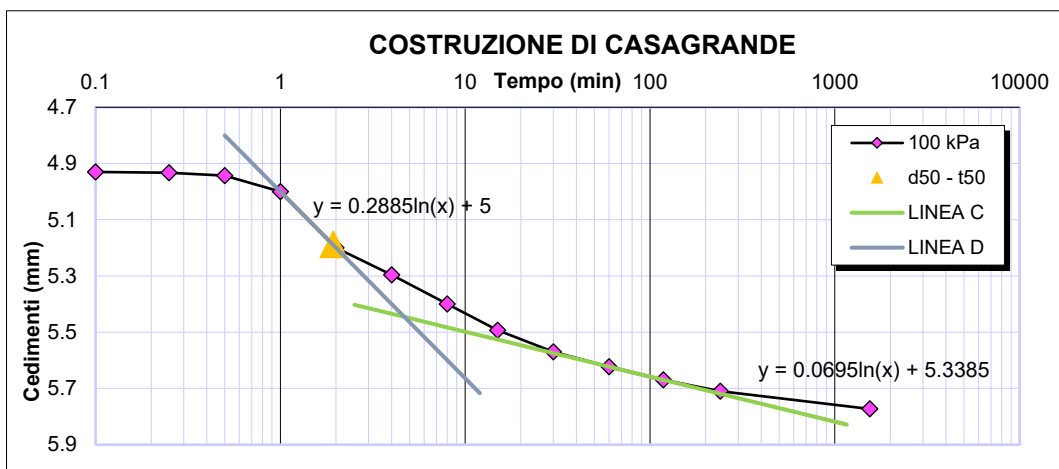


Figura 50: Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 100 kPa

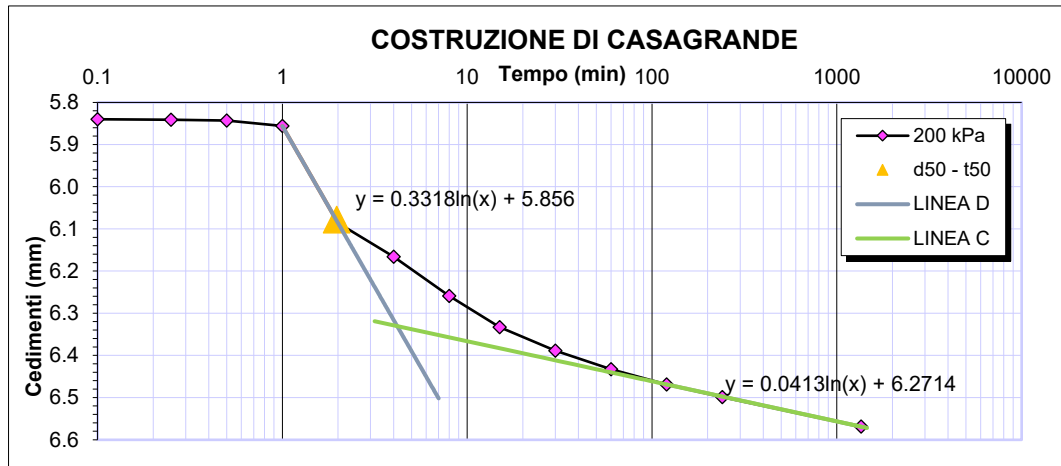


Figura 51: Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 200 kPa

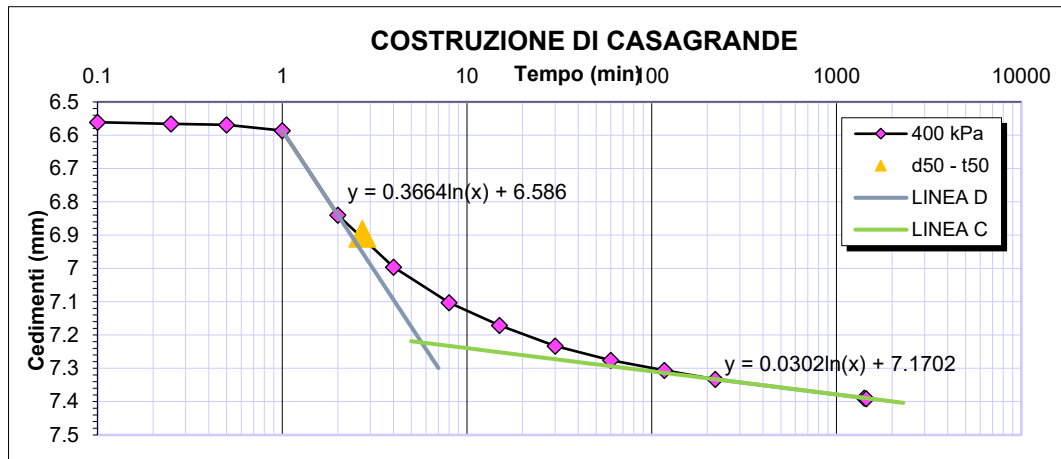


Figura 52: Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 400 kPa

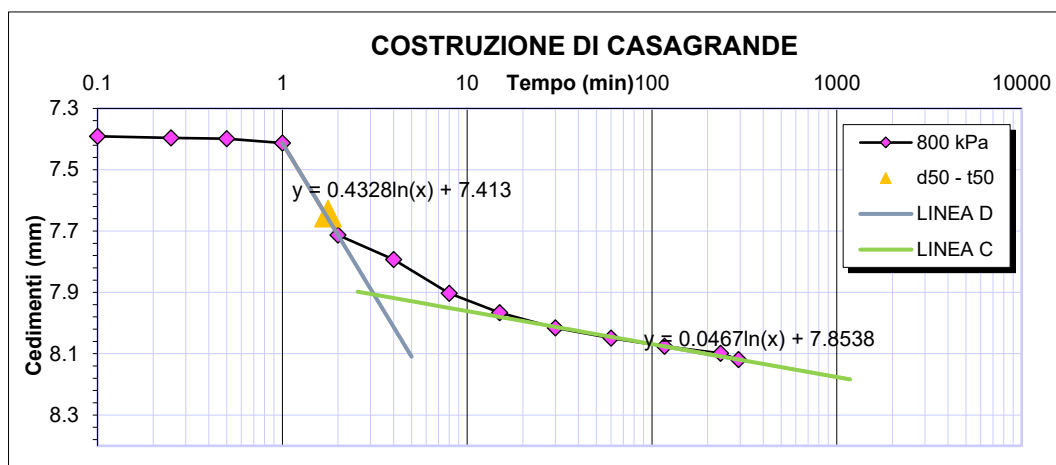


Figura 53: Curva cedimenti-log(t) con carico applicato di 800 kPa

<i>pressione verticale [kPa]</i>	<i><math>\Delta H</math> [mm]</i>	<i>cedimento progressivo [mm]</i>	<i>deformazione assiale [%]</i>	<i><math>E_{ed}</math> [Mpa]</i>	<i>e (primario)</i>
6,25	2,803	2,803	16,695	0,037	1,816
12,5	0,511	0,511	3,827	0,163	1,586
25	0,569	1,081	8,090	0,293	1,471
50	0,711	1,791	13,413	0,470	1,328
100	0,517	2,308	17,283	1,292	1,224
200	0,504	2,813	21,059	2,648	1,123
400	0,654	3,466	25,953	4,087	0,991
800	0,528	3,994	29,906	10,118	0,885

Tabella 8: Tabella relativa al provino derivante dai sedimenti "Fano", in cui  $\Delta H$  = variazione di altezza del provino,  $E_{ed}$  = modulo di deformazione in condizioni edometriche,  $e$  = indice dei vuoti

pressione verticale [kPa]	Cr/Cc/Cs	D50	t50	Casagrande	
				Cv [cm <sup>2</sup> /s]	K [m/s]
6,25	0,000	1,401	11,131	1,7E-04	4,7E-09
12,5	0,763	3,103	13,178	1,2E-04	7,2E-10
25	0,381	3,718	7,891	1,8E-04	6,1E-10
50	0,475	4,475	5,920	2,1E-04	4,5E-10
100	0,346	5,187	1,937	5,7E-04	4,4E-10
200	0,337	6,078	1,966	4,8E-04	1,8E-10
400	0,437	6,896	2,715	3,0E-04	7,3E-11
800	0,353	7,643	1,767	3,9E-04	3,9E-11

Tabella 9: Dati ricavati per mezzo della curva cedimento tempo per ogni incremento di carico per il provino ricavato dai sedimenti "Fano", in cui Cr= indice di ricomprensione, Cc= indice di compressione vergine, Cs= indice di scarico, Cv= coefficiente di consolida

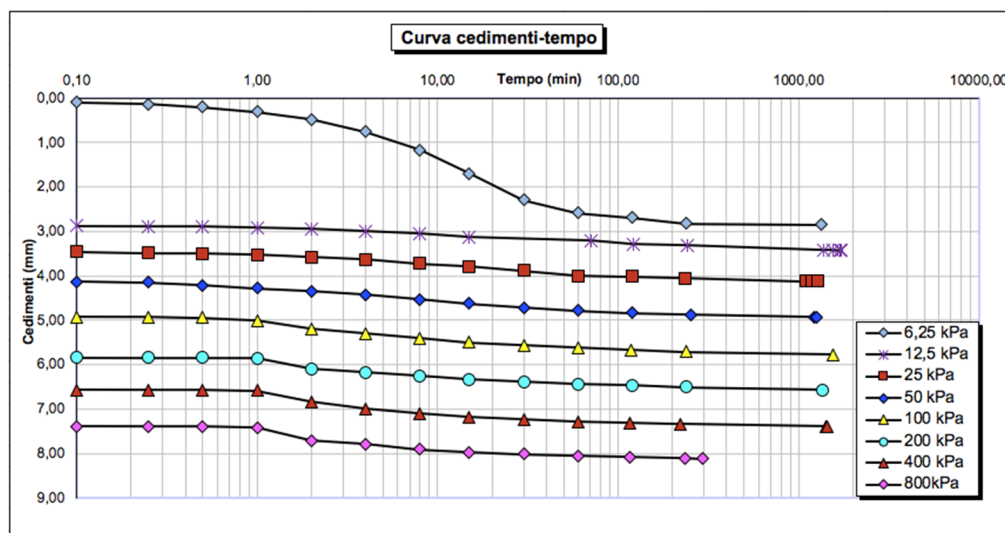


Figura 54: Curva cedimenti tempo secondo la costruzione di Casagrande relative ai diversi incrementi di carico

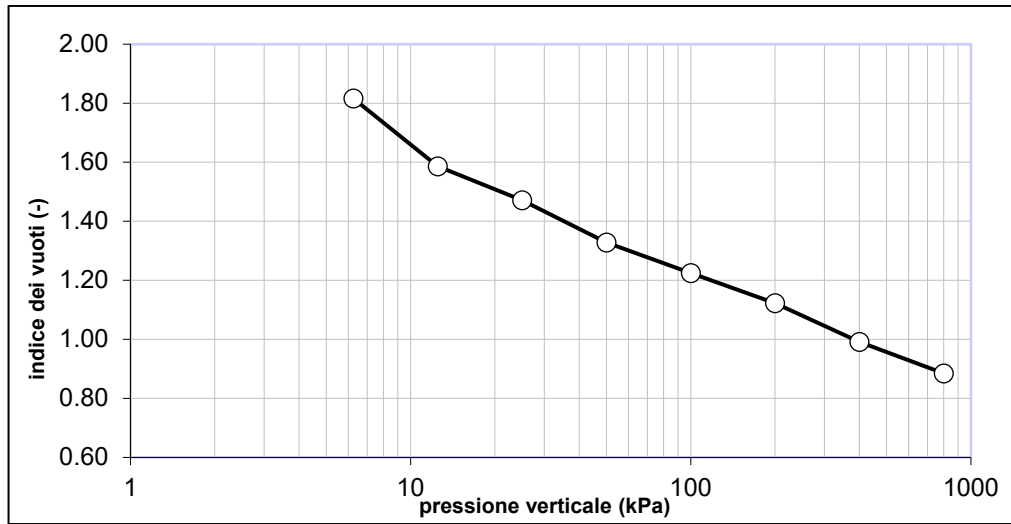


Figura 55: Curva di compressibilità tensioni efficaci- indice dei vuoti

### 3 APPLICAZIONE DELLA TEORIA DELLA CONSOLIDAZIONE MONODIMENSIONALE PROPOSTA DA M. MIKASA

Poiché la determinazione del coefficiente di consolidazione,  $C_v$ , da una prova edometrica è considerata la procedura inversa della predizione dell'andamento nel tempo dei cedimenti del terreno, la sua corretta stima deve essere eseguita affidandosi ad una teoria idonea a descrivere il processo di consolidazione in funzione della compressibilità dei materiali in esame.

In questo capitolo si descrive il metodo della determinazione del  $C_v$  [3] sulla base della teoria di consolidazione proposta da Mikasa (1963) [16]. Inoltre, si descrive come tale metodo è stato implementato mediante i programmi di calcolo Mathcad e Excel, per essere applicato ai dati sperimentali di un test di compressione edometrica a incrementi di carico eseguito su un provino "Fincantieri".

#### 3.1 TEORIA DELLA CONSOLIDAZIONE DI MIKASA

L'equazione generale per la consolidazione proposta da Mikasa può quindi essere ridotta a:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \zeta^2 \left[ C_v \frac{\partial \zeta^2}{\partial z_0^2} + \frac{dC_v}{d\zeta} \left( \frac{\partial \zeta}{\partial z_0} \right)^2 \right]$$

dove:

- $t$  rappresenta il tempo trascorso
- $\zeta$  è il rapporto di consolidazione ( $= f_0/f$ , dove  $f$  è il volume specifico, definito come il rapporto tra il volume di terreno e il volume delle particelle di terreno, ( $f = 1 + e$ ))
- $f_0$  definisce il volume specifico iniziale ( $f_0 = 1 + e_0$ ).
- $z_0$  è la coordinata origine o la coordinata che si ha allo stato iniziale.

In questa equazione si assume che  $z_0$  sia positivo verso il basso e  $f_0$  considerato omogeneo su tutta l'altezza del campione.

Questa equazione tiene conto della variabilità della permeabilità,  $k$ , del coefficiente di consolidazione  $C_v$  e della compressibilità volumetrica  $m_v$ .

Le ipotesi e le semplificazioni per derivare le soluzioni dell'equazione sono le seguenti:

- omogeneità del terreno,
- il terreno sia saturo,
- il campione sia sottoposto ad un regime di consolidazione monodimensionale,
- le particelle di terreno e l'acqua si considerino incompressibili,
- sia applicabile e valida la legge di Darcy,
- le relazioni  $f - \log p$  e  $f - \log k$  non siano dipendenti dal tempo, ovvero il carico applicato e la permeabilità si mantengano costanti per tutta la durata dello step di carico,
- l'effetto del peso proprio sulla consolidazione del campione è considerato trascurabile, cioè il terreno non consolida sotto il gradiente di carico dovuto al proprio peso.

Inoltre, nel caso analizzato in questo lavoro, si è scelto di considerare costante durante tutta la consolidazione, il coefficiente di consolidazione  $C_v$ .

Pertanto, possiamo semplificare l'equazione prima proposta e scrivere:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = C_v \zeta^2 \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z_0^2}$$

La soluzione di tale equazione per incrementi di carico applicati per  $t=0$  e mantenuti costanti, e considerando uno strato di spessore  $h$  drenato sulla superficie superiore ( $z=0$ ) e non drenato sulla superficie inferiore  $z=h$ , può essere scritta nella seguente forma:

$$sol(\varepsilon_f, z, t) = \varepsilon_f [1 - \varphi(z, t)]$$

dove si definisce la funzione  $\varphi(z, t)$  come:



$$\varphi(z, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2 \sin \left[ (2n + 1) \frac{\pi z}{2h} \right] e^{\left\{ \left[ (2n+1) \frac{\pi}{2} \right]^2 \left[ c_v \frac{t}{h^2} \right] \right\}}}{(2n + 1) \frac{\pi}{2}}$$

nella quale le grandezze in gioco sono:

- $\varepsilon_f$  rappresenta il cedimento unitario,
- $z$  rappresenta l'altezza dello strato considerato,
- $h$  rappresenta la lunghezza del percorso di drenaggio,
- $n$  il numero di strati in cui è stato suddiviso il campione,
- $t$  è il tempo trascorso. [17]

### 3.2 PROCEDURA DI DETERMINAZIONE DEL $C_v$ DI MIKASA E TAKADA

I metodi d'interpretazione che sono generalmente utilizzati per i terreni sono principalmente il metodo di Taylor, dove i cedimenti sono correlati con la radice quadrata del tempo ( $mm - \sqrt{t}$ ), ed il metodo di Casagrande, dove al posto della radice quadrata si ha il logaritmo del tempo ( $mm - \log t$ ).

Generalmente il metodo di Taylor dà risultati stabili e maggiormente rispondenti alla realtà rispetto al metodo di Casagrande, che basa la stima dell'influenza della consolidazione secondaria in forma lineare; questo porta a sovrastimare l'errore dovuto a questa e generalmente dà valori più piccoli del coefficiente di consolidazione primaria  $C_v$  ed andrebbe quindi sostituito con il metodo del "curve fitting" proposto da Mikasa e Takada (1985) [3].

Tale metodo prevede di confrontare la soluzione dell'equazione riportata al §3.1, con i dati sperimentali. Il confronto consiste nel riportare su un grafico  $\log T_v - cedimento$  una serie di curve teoriche, soluzioni dell'equazione, con diversi fattori di amplificazione del cedimento da sovrapporre ai dati sperimentali (Figura 56).

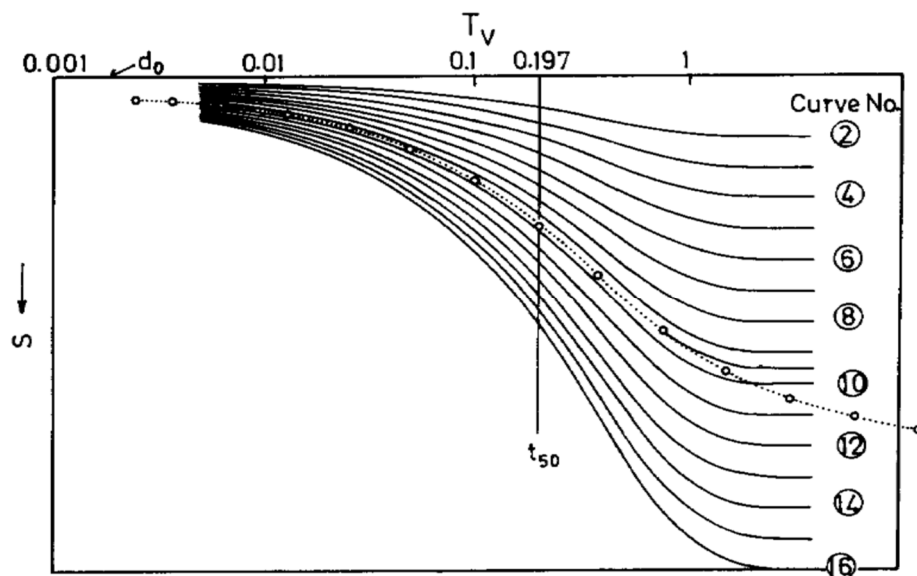


Figura 56: Esempio di curve fitting (Mikasa e Takada, 1985)

Ad esempio, allo scopo poteva essere utilizzato un foglio lucido con stampate le curve teoriche che veniva sovrapposto ai dati sperimentali in modo da permettere, tramite una stima visiva, la selezione della curva teorica che meglio approssima i dati.

Alternativamente il confronto può essere effettuato su un piano  $\log t - \text{cedimento}$ , riportando le curve teoriche candidate dal punto ( $t_{50}$ ) della curva sperimentale in poi. La curva che meglio approssima la parte finale dei dati sperimentali viene scelta per la determinazione dei nuovi parametri (Figura 57). In questo modo la curva di riferimento per il calcolo del coefficiente di consolidazione primaria risulta depurata della quota parte di cedimenti associati alla consolidazione secondaria.

La procedura prevede, inoltre, una correzione del coefficiente di consolidazione determinato dal sulla base della curva scelta tramite il curve-fitting, che ha lo scopo di tener conto degli effetti dovuti alla consolidazione secondaria durante il periodo di tempo in cui si sviluppa gran parte della consolidazione primaria. Applicando questa correzione diviene possibile comparare i cedimenti calcolati mediante test edometrici con i cedimenti da attendersi in sito.

La correzione consiste nell'applicare un coefficiente "r", così definito:

$$r = \frac{m_{v1}}{m_v}$$

dove:

- $m_{v1}$  è il modulo di compressibilità volumetrica derivante dal metodo del “curve fitting”
- $m_v$  è il coefficiente di compressibilità volumetrica a 24 ore della prova eseguita in un edometro o in sito.

Pertanto, la determinazione del coefficiente di consolidazione primaria risulterà essere:

$$C_v = \frac{k}{m_{v1}\gamma_w} \times \frac{m_{v1}}{m_v} = C_{v1} \times r$$

dove:

- $C_v$ , il coefficiente di consolidazione primario,
- $k$ , la permeabilità del terreno presa da prove di permeabilità o da prove in sito,
- $C_{v1}$ , il coefficiente di consolidazione primario derivante dal “curve fitting”

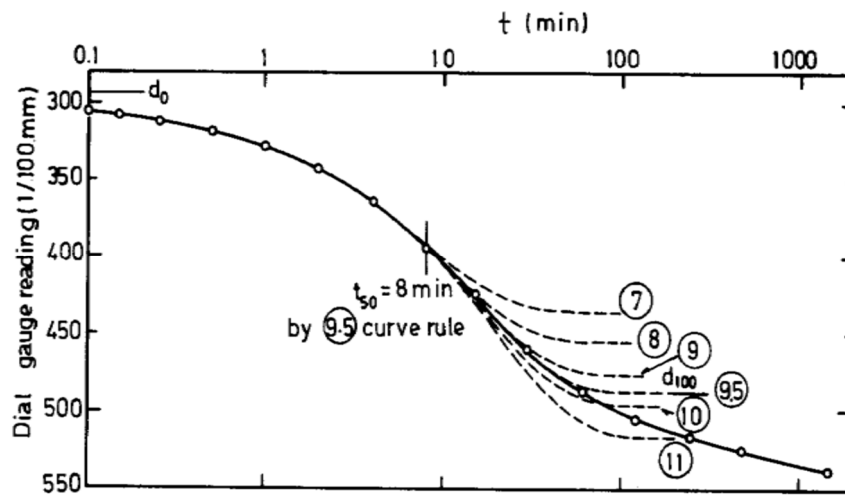


Figura 57: adattamento della curva che meglio approssima la sperimentale

### 3.3 IMPLEMENTAZIONE DELLA PROCEDURA DI MIKASA E TAKADA

Il calcolo del coefficiente di consolidazione con la procedura di Mikasa e Takada, da un punto di vista computazionale, risulta essere maggiormente dispendioso rispetto a quelle tradizionali di Taylor e Casagrande. Tuttavia, l'utilizzo di tale procedura è raccomandato in casi simili a quello in esame, dove le deformazioni sono elevate.

Uno degli scopi del presente lavoro è stato quello di creare un algoritmo, il più possibile automatizzato, per l'applicazione della procedura di Mikasa e Takada. Per la digitalizzazione del processo sono stati utilizzati i programmi di calcolo Mathcad e Excel.

In particolare, Mathcad è stato utilizzato per calcolare e rappresentare le curve soluzione dell'equazione di consolidazione; Excel è stato utilizzato per sviluppare il processo decisionale necessario all'individuazione della migliore curva d'adattamento, sostituendo pertanto il processo di stima visiva a carico dell'utente, e per il calcolo del coefficiente di consolidazione.

Il primo passo è stato quello di determinare la curva soluzione e di disegnarla in varie scale di cedimento tramite coefficienti numerici moltiplicativi, applicati alla curva soluzione "base". Successivamente le curve disegnate vengono esportate sul programma Excel e confrontate con i dati sperimentali. Il processo decisionale per la scelta della curva di fitting prevede il confronto tra la sommatoria dei moduli degli scarti tra le curve e i dati sperimentali. La scelta ricadrà sulla curva che rende minima la sommatoria degli scarti. Infine, sulla base dei nuovi parametri determinati mediante la curva di adattamento viene calcolato il coefficiente di consolidazione.

L'implementazione della procedura, da ripetere per ogni step di carico della prova di compressione edometrica, è illustrata nel dettaglio di seguito:

- sul foglio di calcolo Mathcad si inseriscono i parametri del provino (Figura 58):

- $C_v$ , nel programma v inserito un valore iniziale del coefficiente di consolidazione, può essere ricavato con la metodologia di Casagrande o di Taylor oppure da prove di carico eseguite in sito.
- $h$ , è l'altezza iniziale del provino
- $d_{50}$  è il cedimento corrispondente al  $t_{50}$  (tempo in cui si esaurisce metà del processo di consolidazione) relativo all'analisi eseguita con il metodo di Casagrande o Taylor.
- $\text{sig}$ , è la differenza di carico fra lo step precedente e lo step analizzato,
- $E$  è il modulo edometrico.

PARAMETRI DA INSERIRE	
$c_v := 0.00000001366$	$\frac{mq}{s}$
$h := 0.01849$	metri
$d_{50} := 0.008521$	metri
$\text{sig} := 6.25$	kPa      va inserito il delta sigma
$E := 697$	kPa

Figura 58: parametri del terreno da inserire nel foglio di calcolo della sperimentale

- Contemporaneamente si decidono gli intervalli di discretizzazione della profondità  $z$  e del tempo  $t$ ; questa operazione influisce sul carico computazionale e pertanto deve essere ottimizzata caso per caso in base ai parametri del provino, in modo da descrivere accuratamente la curva teorica (Figura 59 e 60);

$z := 0,0.0005 .. h$	metri
$t := 0,5 .. 20000$	secondi

Figura 59: fattorizzazioni di  $t$ =tempo,  $z$ =profondità dello strato all'istante  $t$ ,  $\text{fat.}$ =fattore progressivo per il calcolo della soluzione

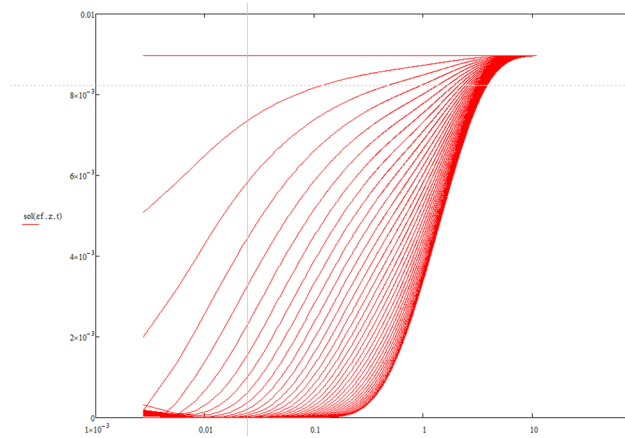


Figura 60: curva sol-Tv, curva tipo da esempio per una corretta fattorizzazione di t e z.

- Una volta inseriti tutti i dati, sarà definita la soluzione (variabile sol) ed il suo integrale (Figura 61) che rappresenta l'andamento del cedimento nel tempo. I valori trovati sono relativi agli intervalli di tempo che sono stati definiti nella precedente fase. Nella fase di esportazione dei dati essi andranno correlati con i tempi corrispondenti per riportare la curva sul piano tempo-cedimento.

$$\int_0^h \text{sol}(ef, z, t) dz$$

$3.052 \cdot 10^{-6}$
$5.579 \cdot 10^{-6}$
$7.552 \cdot 10^{-6}$
$9.181 \cdot 10^{-6}$
$1.058 \cdot 10^{-5}$
$1.183 \cdot 10^{-5}$
$1.296 \cdot 10^{-5}$
$1.399 \cdot 10^{-5}$
$1.496 \cdot 10^{-5}$
$1.587 \cdot 10^{-5}$
$1.672 \cdot 10^{-5}$
$1.754 \cdot 10^{-5}$
$1.832 \cdot 10^{-5}$
$1.907 \cdot 10^{-5}$
$1.979 \cdot 10^{-5}$
...

Figura 61: integrale della soluzione progressivo, i numeri rappresentano i cedimenti corrispondenti ai tempi

- Nel foglio Excel, andranno inseriti i valori della discretizzazione del tempo e i valori corrispondenti dell'integrale (Figura 62).

t [s]	T
0.1	2.81E-05
5	1.41E-03
10	2.81E-03
15	4.22E-03
20	5.62E-03
25	7.03E-03
30	8.43E-03
35	9.84E-03
40	1.12E-02
45	1.26E-02
50	1.41E-02
55	1.55E-02
60	1.69E-02
65	1.83E-02
70	1.97E-02
75	2.11E-02

Figura 62: prima colonna: discretizzazione del tempo, seconda colonna: fattore tempo adimensionale calcolato con i tempi della discretizzazione ed il  $C_v$  ricavato dall'analisi di Casagrande

- Nello stesso foglio Excel andranno inseriti i valori della curva sperimentale. Per poter essere rappresentati nel grafico *cedimento-logTv* dovrà essere operata una trasformazione dei valori temporali importati da Mathcad. Allo scopo dovrà essere utilizzato un coefficiente di consolidazione “fittizio”. In generale tale valore va scelto facendo coincidere il valore temporale di fine consolidazione con  $T_v=2$  (Figura 63 e Figura 64).

DATI CURVA SPERIMENTALE			
t[min.]	T	s[cm]	s[m]
6	0.005034	0.026	0.00026
15	0.013	0.029	0.00029
30	0.025	0.038	0.00038
60	0.050	0.058	0.00058
120	0.101	0.094	0.00094
240	0.201	0.178	0.001776
480	0.403	0.289	0.002886
1020	0.856	0.445	0.004446
1800	1.510	0.647	0.006466
3600	3.020	0.736	0.007356
7200	6.040	0.741	0.007406
12540	10.520	0.748	0.007476
62340	52.300	0.752	0.007516

Figura 63: Curva sperimentale e relativi valori del tempo.

CALCOLO $C_v$ PER SCALARE LE CURVE			
T	2	$h_0$ [cm]	1.85
		d50	0.468
$C_v$ [cm <sup>2</sup> /s]	0.0004	$t_{100}$ [sec]	2.515

Figura 64: valori per scalare la curva sperimentale in modo da ottenere la medesima scala per teorica e sperimentale.

- Per la scelta della migliore curva all'operatore è richiesto di impostare i coefficienti moltiplicativi delle curve teoriche di cui va verificata la compatibilità con i dati sperimentali, nel nostro caso sono state disegnate tre curve (Figura 65 e Figura 66).

COEFFICIENTI DI SOL			
1	1	1.3	1.4

Figura 65: Prima colonna: sperimentale con valore unitario, in questa colonna va inserito sempre i valori della sperimentale non moltiplicato; seconda, terza, quarta colonna: coefficienti moltiplicativi della sperimentale

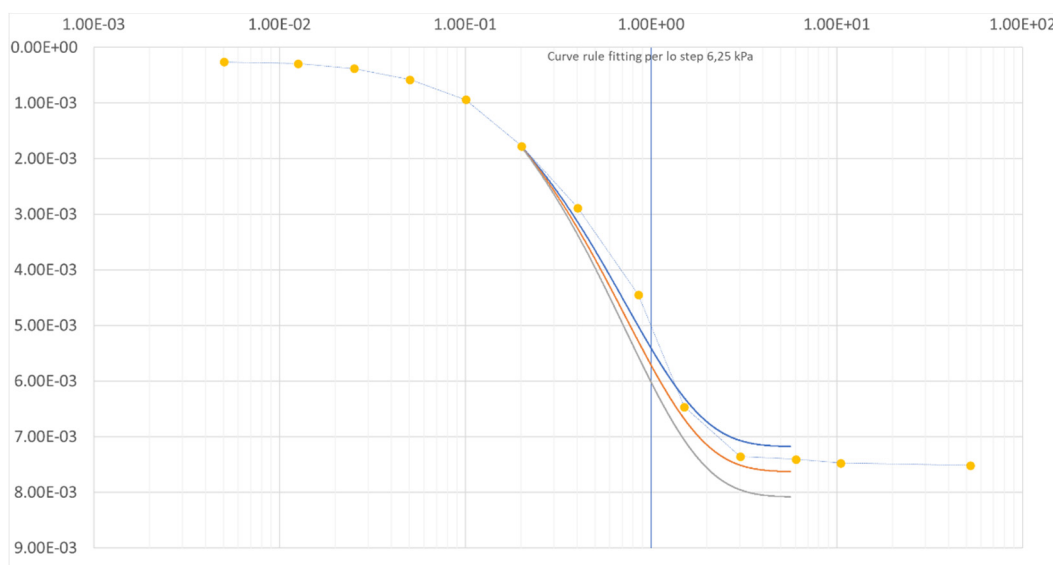


Figura 66: Grafico della sovrapposizione sul  $t_{50}$  tra sperimentale e le curve, aventi valore del coefficiente moltiplicativo diverso

- Per determinare quale sia la curva teorica che meglio approssima i dati si verifica la sommatoria dei moduli degli scarti fra i cedimenti dei punti presi in considerazione per la valutazione ed i corrispondenti punti della sperimentale; la curva migliore risulterà quella che presenta il valore minore di tale sommatoria (Figura 67).



Numero di punti da confrontare		12							
algoritmo decisionale									
DATI SPERIMENTALI		TEMPI ADIMENSIONALI TEORICI		CURVA 1	ScalarE Confronto	CURVA 2	ScalarE Confronto	CURVA 3	ScalarE Confronto
Punti confrontati	T	S	T (sol)	s(sol)	X <sub>1</sub>	s(sol)	X <sub>2</sub>	s(sol)	X <sub>3</sub>
Nr.									
2	0.01258	0.00029	0.00000	0.00000	0.00029	0.00000	0.00029	0.00000	0.00000
3	0.02517	0.00058	0.00000	0.00000	0.00058	0.00000	0.00058	0.00000	0.00000
4	0.05034	0.00058	0.00000	0.00000	0.00058	0.00000	0.00058	0.00000	0.00000
5	0.10067	0.00094	0.00000	0.00000	0.00094	0.00000	0.00094	0.00000	0.00000
6	0.20135	0.00178	0.00375	0.00302	0.00124	0.00340	0.00162	0.00353	0.00353
7	0.40269	0.00289	0.06745	0.00307	0.00018	0.00346	0.00058	0.00359	0.00359
8	0.85572	0.00445	0.13490	0.00316	0.00128	0.00358	0.00086	0.00372	0.00372
9	1.51010	0.00647	0.28667	0.00337	0.00309	0.00386	0.00261	0.00402	0.00402
10	3.02020	0.00736	0.50588	0.00368	0.00368	0.00425	0.00310	0.00445	0.00445
11	6.04039	0.00741	1.01177	0.00438	0.00303	0.00517	0.00224	0.00543	0.00543
12	10.52035	0.00748	2.02353	0.00579	0.00169	0.00700	0.00048	0.00740	0.00740
13	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
14	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
					ΣX <sub>1</sub>	ΣX <sub>2</sub>		ΣX <sub>3</sub>	
					1.63860E-02	1.36752E-02		3.21484E-02	

Figura 67: Tabella decisionale, qui va inserito soltanto il numero dei punti che si vogliono considerare, i punti vengono contati dal primo all'ultimo, decidendo quanti degli ultimi punti vanno eliminati dalla valutazione

- Una volta trovata la curva designata, si possono ricavare i nuovi  $d_0$  e  $d_{100}$  e quindi calcolare il nuovo  $C_v$  (Figura 68).

d100	d0	d50	t50	Cv1	ΔH100
[m]	[m]	[m]	[s]	[m <sup>2</sup> /s]	[m]
0.007473339	0.00016	0.003736669	790	2.53038E-08	0.007473
ΔH24h	r	Cv	Δσ	Eprim.	k
[m]	[-]	[m <sup>2</sup> /s]	[kPa]	[kPa]	[m/s]
0.008476	88%	2.23105E-08	6.25	11.54938942	1.98E-08

Figura 68: Questa è una tabella di output, qui vengono esplicitati tutti i risultati dell'analisi condotta secondo la curva scelta nel punto precedente.

### 3.4 APPLICAZIONE AL CASO REALE

Di seguito vengono riportati i risultati di una prova edometrica eseguita su provini di sedimenti denominati FINCANTIERI ed interpretati con il metodo di Mikasa e Takada utilizzando la procedura implementata sopra descritta (da Figura 58 a Figura 68).

In particolare, durante la prova sono stati effettuati 6 gradini di carico in progressione geometrica 2 a partire da 6.25 kPa fino a 200 kPa. Si riporta per ogni step la costruzione di Casagrande, l'algoritmo decisionale per realizzare il curve-fitting e i nuovi parametri calcolati.

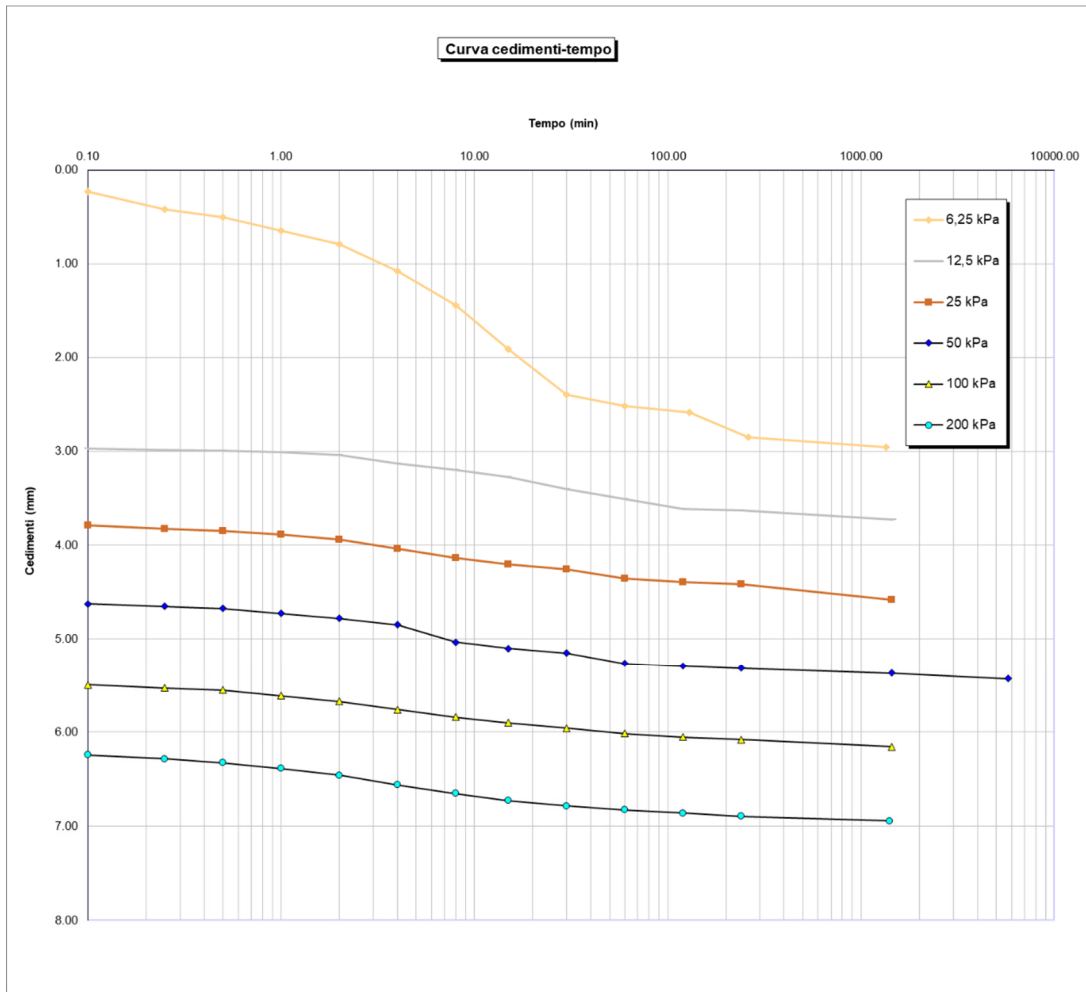


Figura 69: Curve cedimento-tempo per la prova edometrica ad incremento di carico eseguita per il provino "Fincantieri"

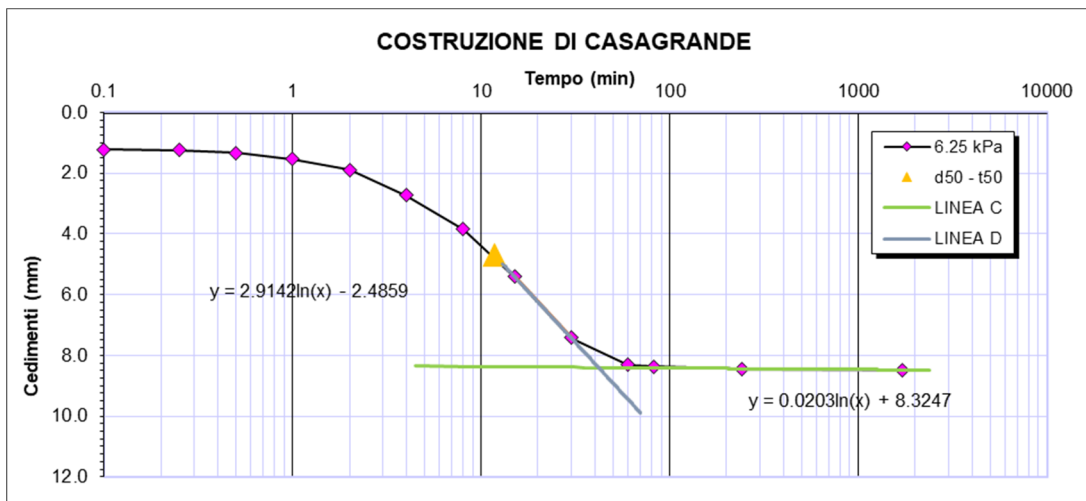


Figura 70: Curva tempo-cedimento per lo step di carico 6.25 kPa ed interpretazione secondo Casagrande

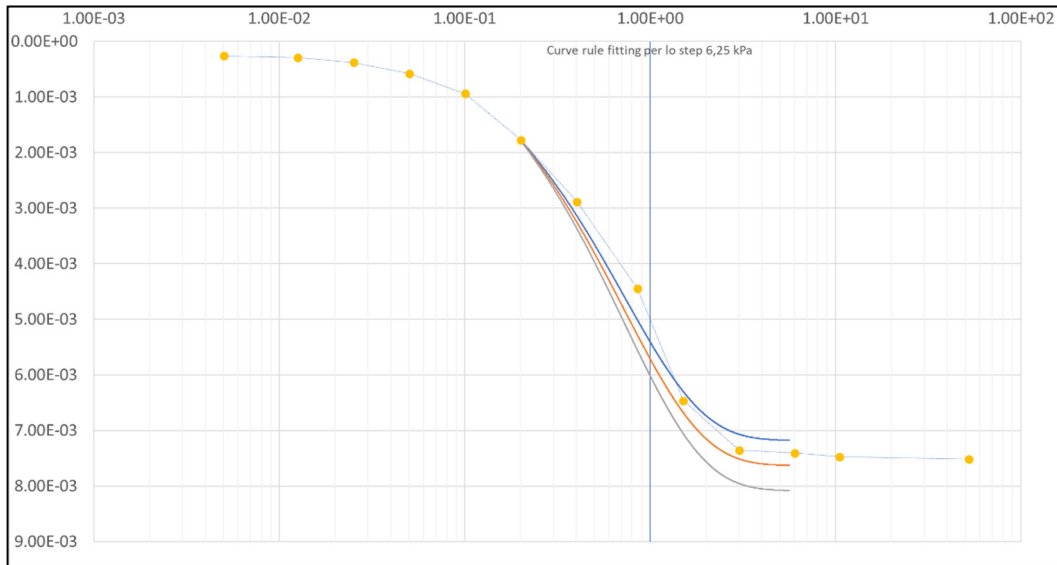


Figura 71: "Curve fitting" eseguito con tre curve d'adattamento per lo step di carico 6.25kPa

Numero di punti da confrontare		algorithmo decisionale							
DATI SPERIMENTALI		TEMPI ADIMENSIONALI TEORICI	CURVA 1	ScalarE Confronto	CURVA 2	ScalarE Confronto	CURVA 3	ScalarE Confronto	
Punti confronto	T	S	T(sol)	s(sol)	X <sub>1</sub>	s(sol)	X <sub>2</sub>	s(sol)	X <sub>3</sub>
Nr.									
2	0.01258	0.00029	0.00000	0.00000	0.00029	0.00000	0.00029	0.00000	0.00000
3	0.02517	0.00038	0.00000	0.00000	0.00038	0.00000	0.00038	0.00000	0.00000
4	0.05034	0.00058	0.00000	0.00000	0.00058	0.00000	0.00058	0.00000	0.00000
5	0.10067	0.00094	0.00000	0.00000	0.00094	0.00000	0.00094	0.00000	0.00000
6	0.20135	0.00178	0.03373	0.03327	0.00150	0.00340	0.00162	0.00353	0.00353
7	0.40269	0.00289	0.06745	0.06333	0.00044	0.00346	0.00058	0.00359	0.00359
8	0.85572	0.00445	0.13490	0.03344	0.00100	0.00358	0.00086	0.00372	0.00372
9	1.51010	0.00647	0.28667	0.00370	0.00277	0.00386	0.00261	0.00402	0.00402
10	3.02020	0.00736	0.50588	0.00406	0.00329	0.00425	0.00310	0.00445	0.00445
11	6.04039	0.00741	1.01177	0.00491	0.00250	0.00517	0.00224	0.00543	0.00543
12	10.52035	0.00748	2.02353	0.00660	0.00088	0.00700	0.00048	0.00740	0.00740
13	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
14	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
					ΣX <sub>1</sub>	ΣX <sub>2</sub>		ΣX <sub>3</sub>	
					1.45788E-02	1.36752E-02		3.21484E-02	

Figura 72: Riassunto dell'algorithmo decisionale per lo step di carico 6.25 kPa, in verde la curva scelta.

<b>d100</b>	<b>d0</b>	<b>d50</b>	<b>t50</b>	<b>Cv1</b>	<b>ΔH100</b>
[m]	[m]	[m]	[s]	[m <sup>2</sup> /s]	[m]
0.007473339	0.00016	0.003736669	790	2.53038E-08	0.007473
<b>ΔH24h</b>	<b>r</b>	<b>Cv</b>	<b>Δσ</b>	<b>Eprim.</b>	<b>k</b>
[m]	[-]	[m <sup>2</sup> /s]	[kPa]	[kPa]	[m/s]
0.008476	88%	2.23105E-08	6.25	11.54938942	1.98E-08

Figura 73: Dati ricavati dalla curva teorica, in particolare si riportano: il d<sub>100</sub> ed il d<sub>0</sub> corretti il d<sub>50</sub> ed il t<sub>50</sub>, il Cv stimato in riferimento alla curva teorica, il ΔH100 in riferimento alla teorica, il ΔH24h in riferimento ai dati sperimentali, r coefficiente di riduzione da applicare al Cv<sub>1</sub>, Cv coefficiente di consolidazione primario ottenuto dal Cv<sub>1</sub> e dall'applicazione di r, Δσ applicato al provino, Eprim. Modulo edometrico stimato in

riferimento alla curva teorica, la stima della permeabilità  $k$  eseguita in riferimento alla curva teorica, per lo step di carico 6.25 kPa

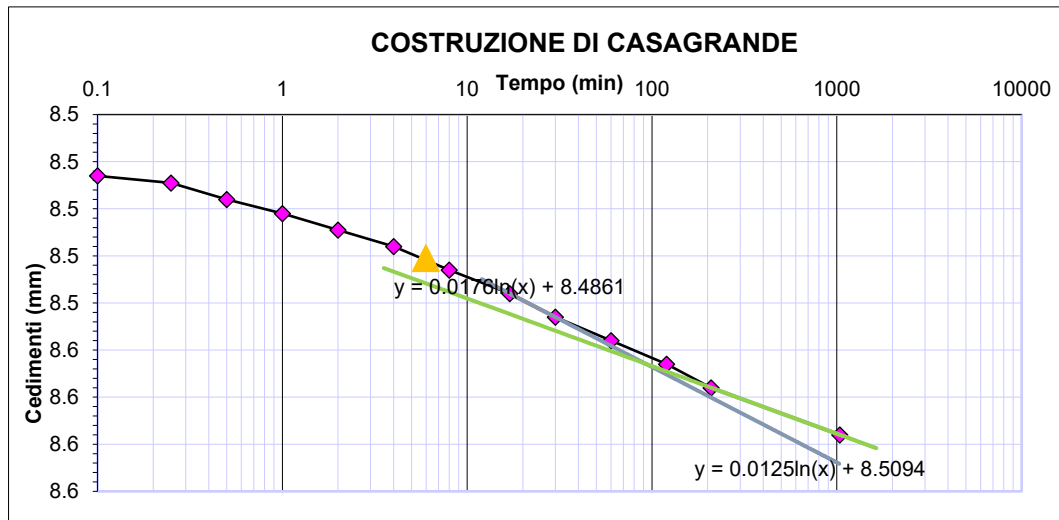


Figura 74: Curva tempo-cedimento per lo step di carico 12.5 kPa ed interpretazione secondo Casagrande

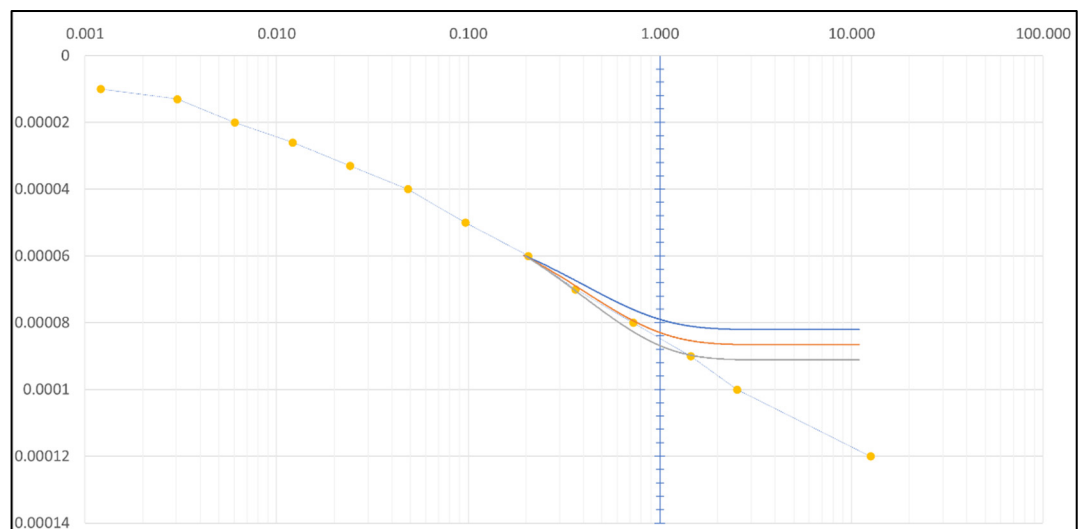


Figura 75: Adattamento delle curve ricavato per lo step di carico 12,5 kPa

NumEro di punti da confrontare		11								
Algoritmo decisionale										
DATI SPERIMENTALI			TEMPI ADIMENSIONALI TEORICI		CURVA 1	ScalarE Confronto	CURVA 2	ScalarE Confronto	CURVA 3	ScalarE Confronto
Punti confronto	T (punti spErimEntali)	S	T(sol)	s(sol)	X <sub>1</sub>	s(sol)	X <sub>2</sub>	s(sol)	X <sub>3</sub>	
Nr.										
1	0.00169	0.00001	0.00000	0.00000	0.00001	0.00000	0.00001	0.00000	0.00000	
2	0.00423	0.00001	0.00000	0.00000	0.00001	0.00000	0.00001	0.00000	0.00000	
3	0.00845	0.00002	0.00000	0.00000	0.00002	0.00000	0.00002	0.00000	0.00000	
4	0.01690	0.00003	0.00000	0.00000	0.00003	0.00000	0.00003	0.00000	0.00000	
5	0.03381	0.00003	0.00000	0.00000	0.00003	0.00000	0.00003	0.00000	0.00000	
6	0.06762	0.00004	0.00000	0.00000	0.00004	0.00000	0.00004	0.00000	0.00000	
7	0.13524	0.00005	0.00000	0.00000	0.00005	0.00000	0.00005	0.00000	0.00000	
8	0.28738	0.00006	0.56080	0.00007	0.00001	0.00007	0.00001	0.00008	0.00008	
9	0.50714	0.00007	0.98965	0.00007	0.00000	0.00008	0.00001	0.00008	0.00008	
10	1.01428	0.00008	1.97929	0.00007	0.00001	0.00008	0.00000	0.00008	0.00008	
11	2.02856	0.00009	3.95859	0.00008	0.00001	0.00008	0.00001	0.00009	0.00009	
12	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
13	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
					ΣX <sub>1</sub>		ΣX <sub>2</sub>		ΣX <sub>3</sub>	
					2.24826E-04		2.2339E-04		3.25424E-04	

Figura 76: Riassunto dell'algoritmo decisionale per lo step di carico 12.5 kPa, in verde la curva scelta.

d100	d0	d50	t50	Cv1	ΔH100
[m]	[m]	[m]	[s]	[m^2/s]	[m]
8.21E-05	8.23E-07	4.15E-05	1775	1.09E-08	8.13E-05
ΔH24h	r	Cv	Δσ	Eprim.	k
[m]	[-]	[m^2/s]	[kPa]	[kPa]	[m/s]
0.00012	67.72%	7.41E-09	12.5	1533.50	4.95E-11

Figura 77: Dati ricavati dalla curva teorica, in particolare si riportano: il d<sub>100</sub> ed il d<sub>0</sub> corretti il d<sub>50</sub> ed il t<sub>50</sub>, il Cv stimato in riferimento alla curva teorica, il ΔH100 in riferimento alla teorica, il ΔH24h in riferimento ai dati sperimentali, r coefficiente di riduzione da applicare al Cv<sub>v</sub>, Cv coefficiente di consolidazione primario ottenuto dal Cv<sub>v</sub> e dall'applicazione di r, il Δσ applicato al provino, Eprim. Modulo edometrico stimato in riferimento alla curva teorica, la stima della permeabilità k eseguita in riferimento alla curva teorica, per lo step di carico 12.5 kPa

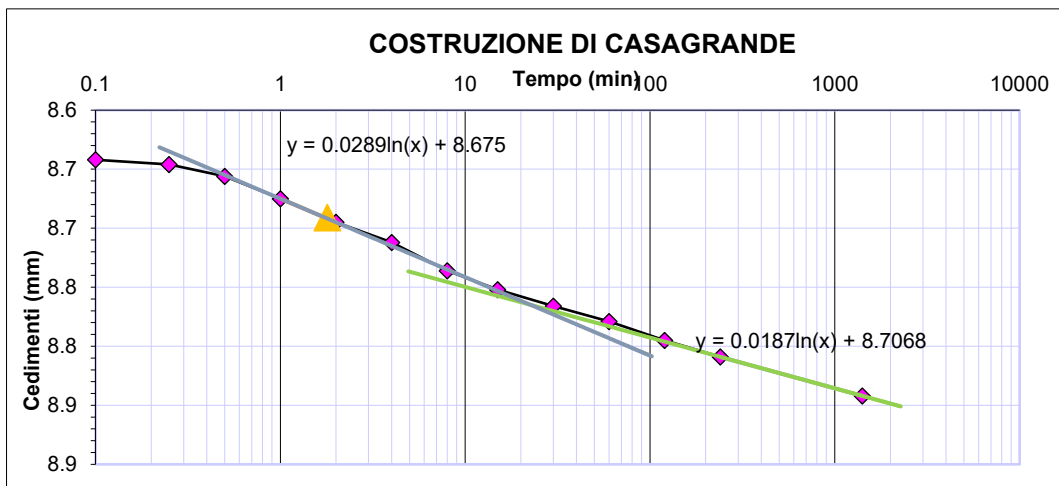


Figura 78: Curva tempo-cedimento per lo step di carico 25 kPa ed interpretazione secondo Casagrande

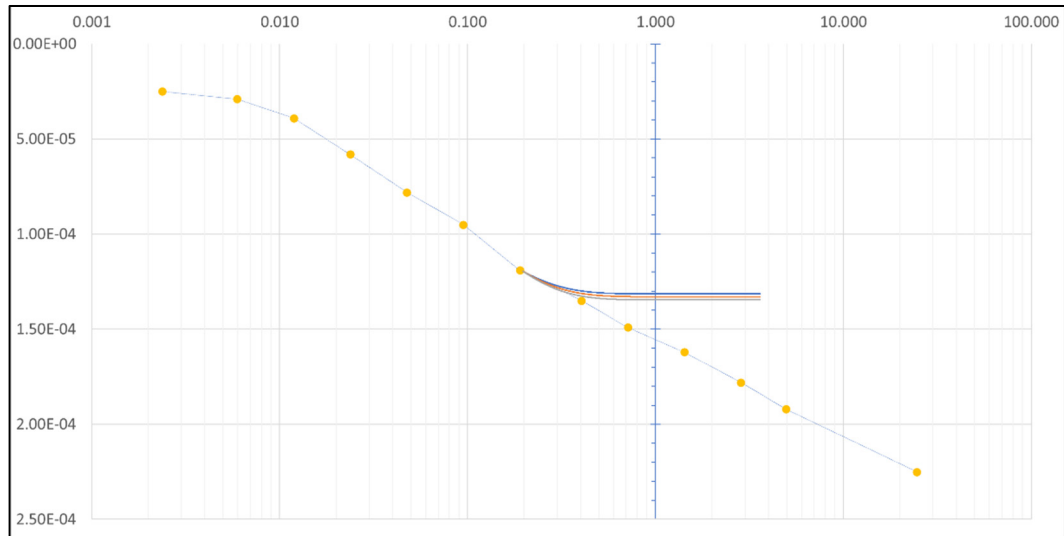


Figura 79: Adattamento delle curve ricavato per lo step di carico 25 kPa

Numero di punti da confrontare	11									
Algoritmo decisionale										
DATI SPERIMENTALI			TEMPI ADIMENSIONALI TEORICI	CURVA 1	ScalarE Confronto	CURVA 2	ScalarE Confronto	CURVA 3	ScalarE Confronto	
Punti confronto	T (punti sperimentali)	S	T (sol)	s(sol)	$X_1$	s(sol)	$X_2$	s(sol)	$X_3$	
Nr.										
1	0.00110	0.00002	0.00000	0.00000	0.00002	0.00000	0.00002	0.00000	0.00000	
2	0.00275	0.00003	0.00000	0.00000	0.00003	0.00000	0.00003	0.00000	0.00000	
3	0.00549	0.00004	0.00000	0.00000	0.00004	0.00000	0.00004	0.00000	0.00000	
4	0.01099	0.00006	0.00000	0.00000	0.00006	0.00000	0.00006	0.00000	0.00000	
5	0.02198	0.00008	0.00000	0.00000	0.00008	0.00000	0.00008	0.00000	0.00000	
6	0.04395	0.00010	0.00000	0.00000	0.00010	0.00000	0.00010	0.00000	0.00000	
7	0.08791	0.00012	0.00000	0.00000	0.00012	0.00000	0.00012	0.00000	0.00000	
8	0.17581	0.00014	0.00000	0.00000	0.00014	0.00000	0.00014	0.00000	0.00000	
9	0.32966	0.00015	0.92736	0.00015	0.00001	0.00016	0.00001	0.00016	0.00016	
10	0.65932	0.00016	1.85472	0.00017	0.00000	0.00017	0.00001	0.00017	0.00017	
11	1.31864	0.00018	3.70943	0.00019	0.00001	0.00019	0.00001	0.00019	0.00020	
12	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
13	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
					$\Sigma X_1$		$\Sigma X_2$		$\Sigma X_3$	
					5.96828E-04		6.0561E-04		5.25665E-04	

Figura 80: Riassunto dell'algoritmo decisionale per lo step di carico 25 kPa, in verde la curva scelta.

<b>d100</b>	<b>d0</b>	<b>d50</b>	<b>t50</b>	<b>Cv1</b>	<b><math>\Delta H100</math></b>
[m]	[m]	[m]	[s]	[m <sup>2</sup> /s]	[m]
1.33E-04	2.14E-06	6.76E-05	129	1.45E-07	1.31E-04
<b><math>\Delta H24h</math></b>	<b>r</b>	<b>Cv</b>	<b><math>\Delta\sigma</math></b>	<b>Eprim.</b>	<b>k</b>
[m]	[-]	[m <sup>2</sup> /s]	[kPa]	[kPa]	[m/s]
0.000246	53.19%	7.70E-08	25	1873.16	4.21E-10

Figura 81: Dati ricavati dalla curva teorica, in particolare si riportano: il  $d_{100}$  ed il  $d_0$  corretti il  $d_{50}$  ed il  $t_{50}$ , il  $C_{v1}$  stimato in riferimento alla curva teorica, il  $\Delta H100$  in riferimento alla teorica, il  $\Delta H24h$  in riferimento ai dati sperimentali,  $r$  coefficiente di riduzione da applicare al  $C_{v1}$ ,  $C_v$  coefficiente di consolidazione primario ottenuto dal  $C_{v1}$  e dall'applicazione di  $r$ , il  $\Delta\sigma$  applicato al provino,  $E_{prim}$  Modulo edometrico stimato in riferimento alla curva teorica, la stima della permeabilità  $k$  eseguita in riferimento alla curva teorica, per lo step di carico 25 kPa

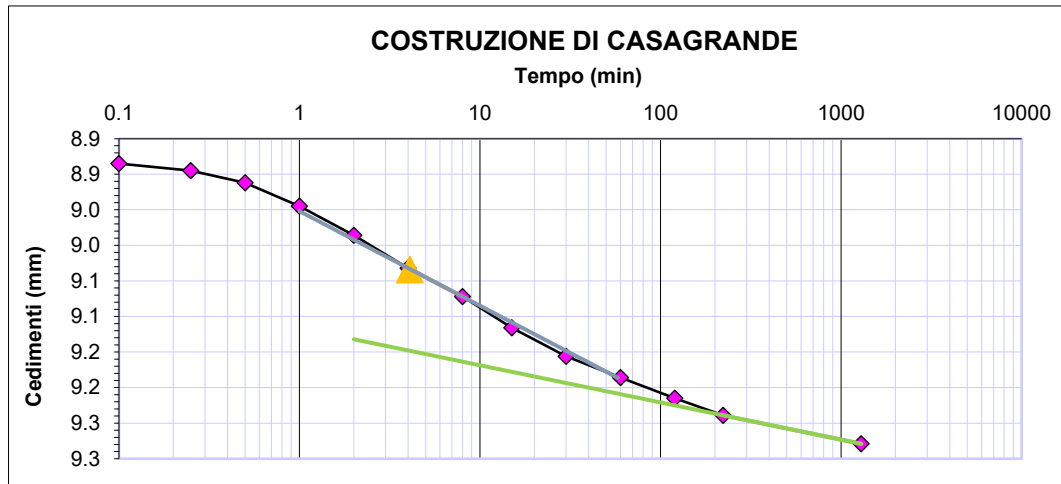


Figura 82: Curva tempo-cedimento per lo step di carico 50 kPa ed interpretazione secondo Casagrande

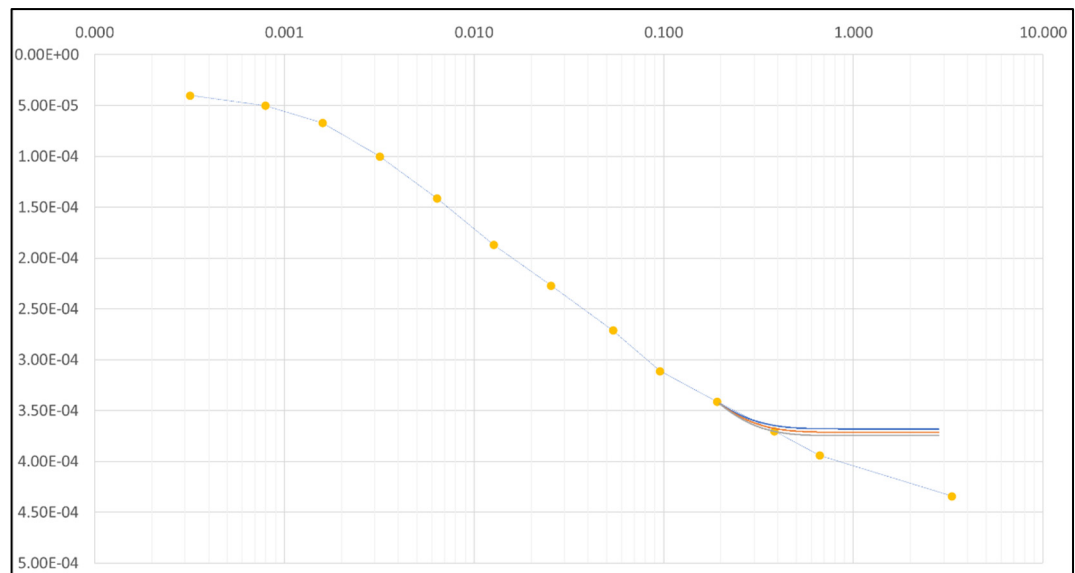


Figura 83: Adattamento delle curve ricavato per lo step di carico 50 kPa

Numero di punti da confrontare		11							
Algoritmo decisionale									
DATI SPERIMENTALI			TEMPI ADIMENSIONALI TEORICI	CURVA 1	ScalarE Confronto	CURVA 2	ScalarE Confronto	CURVA 3	ScalarE Confronto
Punti confronto	T (punti spErimEntali)	S	T (sol)	s(sol)	X <sub>1</sub>	s(sol)	X <sub>2</sub>	s(sol)	X <sub>3</sub>
Nr.									
1	0.00161	0.00004	0.00000	0.00000	0.00004	0.00000	0.00004	0.00000	0.00004
2	0.00402	0.00005	0.00000	0.00000	0.00005	0.00000	0.00005	0.00000	0.00005
3	0.00804	0.00007	0.00000	0.00000	0.00007	0.00000	0.00007	0.00000	0.00007
4	0.01608	0.00010	0.00000	0.00000	0.00010	0.00000	0.00010	0.00000	0.00010
5	0.03216	0.00014	0.00000	0.00000	0.00014	0.00000	0.00014	0.00000	0.00014
6	0.06431	0.00019	0.00000	0.00000	0.00019	0.00000	0.00019	0.00000	0.00019
7	0.12862	0.00023	0.00000	0.00000	0.00023	0.00000	0.00023	0.00000	0.00023
8	0.27333	0.00027	0.22328	0.00027	0.00000	0.00027	0.00000	0.00027	0.00000
9	0.48234	0.00031	0.39403	0.00029	0.00002	0.00029	0.00002	0.00030	0.00001
10	0.96469	0.00034	0.78806	0.00033	0.00001	0.00035	0.00001	0.00036	0.00002
11	1.92937	0.00037	1.57613	0.00043	0.00006	0.00045	0.00008	0.00048	0.00011
12	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
13	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
					$\Sigma X_1$		$\Sigma X_2$		$\Sigma X_3$
					9.03616E-04		9.2146E-04		9.60501E-04

Figura 84: Riassunto dell'algoritmo decisionale per lo step di carico 50 kPa, in verde la curva scelta.

<b>d100</b>	<b>d0</b>	<b>d50</b>	<b>t50</b>	<b>Cv1</b>	<b><math>\Delta H100</math></b>
[m]	[m]	[m]	[s]	[m <sup>2</sup> /s]	[m]
3.68E-04	4.72E-06	1.86E-04	500	3.39E-08	3.63E-04
<b><math>\Delta H24h</math></b>	<b>r</b>	<b>Cv</b>	<b><math>\Delta\sigma</math></b>	<b>Eprim.</b>	<b>k</b>
[m]	[-]	[m <sup>2</sup> /s]	[kPa]	[kPa]	[m/s]
0.000437	83.12%	2.81E-08	50	1301.70	2.22E-10

Figura 85: Dati ricavati dalla curva teorica, in particolare si riportano: il  $d_{100}$  ed il  $d_0$  corretti il  $d_{50}$  ed il  $t_{50}$ , il  $C_{v1}$  stimato in riferimento alla curva teorica, il  $\Delta H100$  in riferimento alla teorica, il  $\Delta H24h$  in riferimento ai dati sperimentali,  $r$  coefficiente di riduzione da applicare al  $C_{v1}$ ,  $C_v$  coefficiente di consolidazione primario ottenuto dal  $C_{v1}$  e dall'applicazione di  $r$ , il  $\Delta\sigma$  applicato al provino,  $E_{prim}$  Modulo edometrico stimato in riferimento alla curva teorica, la stima della permeabilità  $k$  eseguita in riferimento alla curva teorica, per lo step di carico 50 kPa



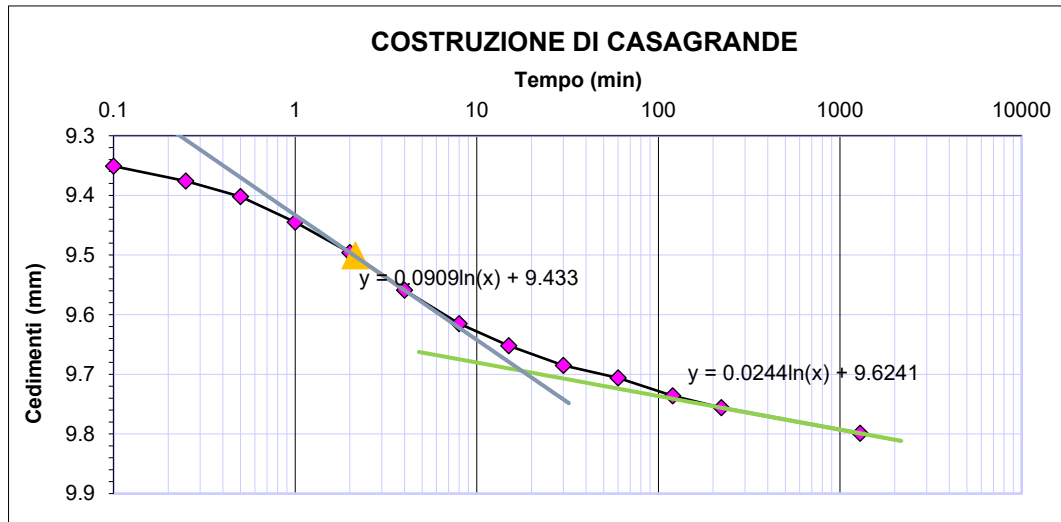


Figura 86: Curva tempo-cedimento per lo step di carico 100 kPa ed interpretazione secondo Casagrande

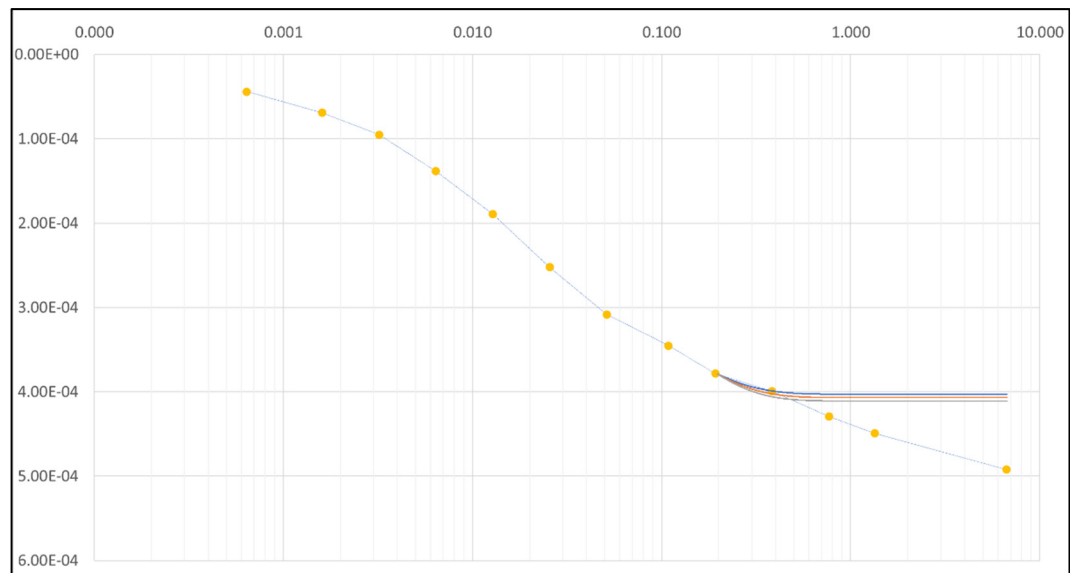


Figura 87: Adattamento delle curve ricavato per lo step di carico 100 kPa

Numero di punti da confrontare		11								
Algoritmo decisionale										
DATI SPERIMENTALI			TEORICI		CURVA 1	ScalarE Confronto	CURVA 2	ScalarE Confronto	CURVA 3	ScalarE Confronto
Punti confronto	T (punti sPrimEntali)	S	T (sol)	s(sol)	X <sub>1</sub>	s(sol)	X <sub>2</sub>	s(sol)	X <sub>3</sub>	
Nr.										
1	0.00238	0.00004	0.00000	0.00000	0.00004	0.00000	0.00004	0.00000	0.00004	
2	0.00594	0.00007	0.00000	0.00000	0.00007	0.00000	0.00007	0.00000	0.00007	
3	0.01188	0.00009	0.00000	0.00000	0.00009	0.00000	0.00009	0.00000	0.00009	
4	0.02376	0.00014	0.00000	0.00000	0.00014	0.00000	0.00014	0.00000	0.00014	
5	0.04752	0.00019	0.00000	0.00000	0.00019	0.00000	0.00019	0.00000	0.00019	
6	0.09504	0.00025	0.00000	0.00000	0.00025	0.00000	0.00025	0.00000	0.00025	
7	0.19008	0.00031	0.00000	0.00000	0.00031	0.00000	0.00031	0.00000	0.00031	
8	0.40392	0.00034	0.38990	0.00035	0.00001	0.00035	0.00001	0.00035	0.00001	
9	0.71280	0.00038	0.68806	0.00036	0.00001	0.00037	0.00001	0.00037	0.00001	
10	1.42559	0.00040	1.37613	0.00039	0.00001	0.00040	0.00000	0.00040	0.00000	
11	2.85118	0.00043	2.75226	0.00045	0.00002	0.00046	0.00003	0.00046	0.00003	
12	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
13	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
					ΣX <sub>1</sub>		ΣX <sub>2</sub>		ΣX <sub>3</sub>	
					1.14358E-03		1.1454E-03		1.14723E-03	

Figura 88: Riassunto dell'algoritmo decisionale per lo step di carico 100 kPa, in verde la curva scelta.

d <sub>100</sub>	d <sub>0</sub>	d <sub>50</sub>	t <sub>50</sub>	C <sub>v1</sub>	ΔH <sub>100</sub>
[m]	[m]	[m]	[s]	[m <sup>2</sup> /s]	[m]
4.11E-04	5.12E-06	2.08E-04	307.5	4.94E-08	4.06E-04
ΔH <sub>24h</sub>	r	C <sub>v</sub>	Δσ	Eprim.	k
[m]	[-]	[m <sup>2</sup> /s]	[kPa]	[kPa]	[m/s]
0.00052	78.03%	3.85E-08	100	2215.40	1.78E-10

Figura 89: Dati ricavati dalla curva teorica, in particolare si riportano: il d<sub>100</sub> ed il d<sub>0</sub> corretti il d<sub>50</sub> ed il t<sub>50</sub>, il C<sub>v1</sub> stimato in riferimento alla curva teorica, il ΔH<sub>100</sub> in riferimento alla teorica, il ΔH<sub>24h</sub> in riferimento ai dati sperimentali, r coefficiente di riduzione da applicare al C<sub>v1</sub>, C<sub>v</sub> coefficiente di consolidazione primario ottenuto dal C<sub>v1</sub> e dall'applicazione di r, il Δσ applicato al provino, Eprim. Modulo edometrico stimato in riferimento alla curva teorica, la stima della permeabilità k eseguita in riferimento alla curva teorica, per lo step di carico 100 kPa

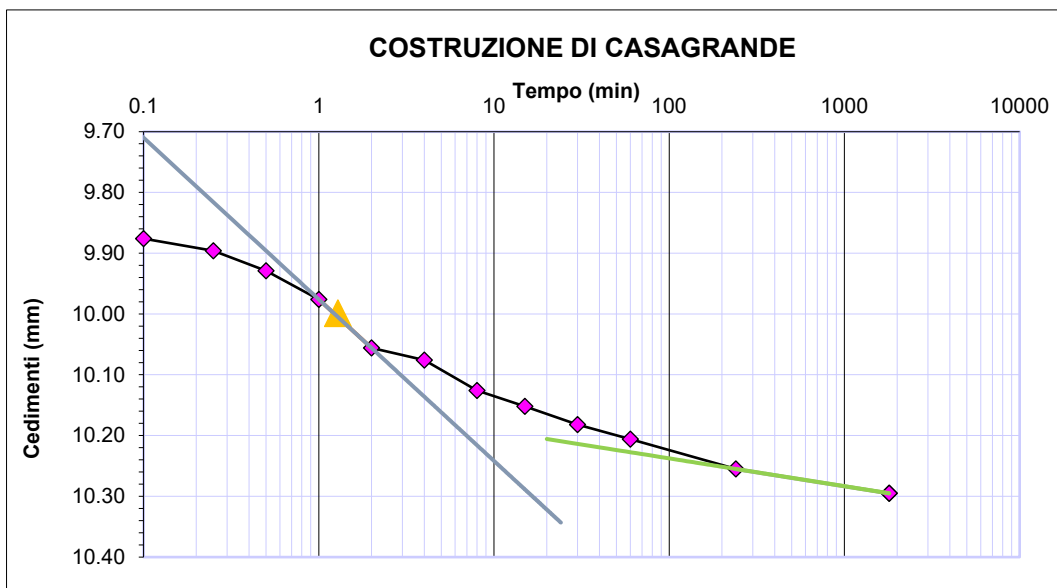


Figura 90: Curva tempo-cedimento per lo step di carico 200 kPa ed interpretazione secondo Casagrande

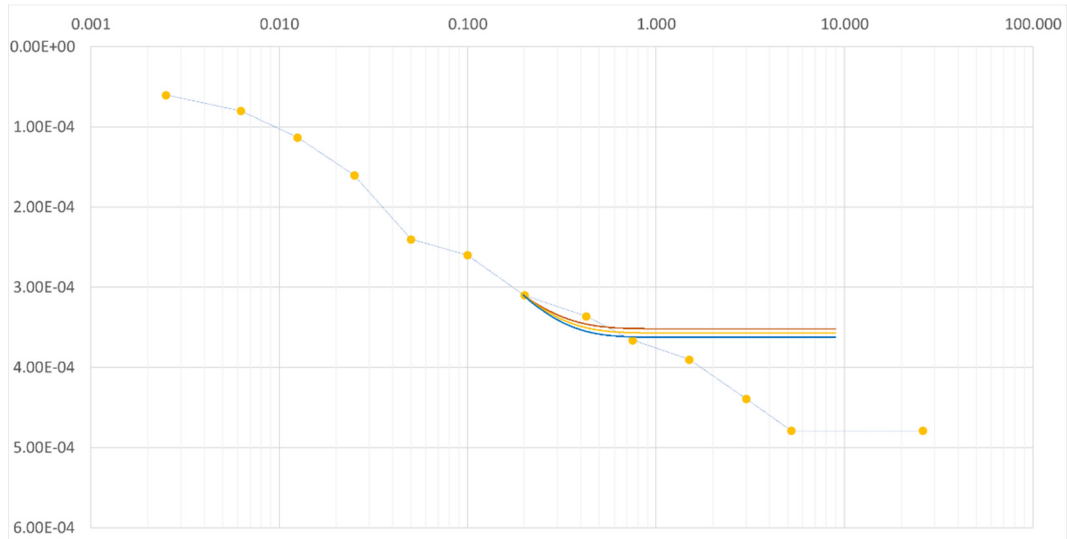


Figura 91: Adattamento delle curve ricavato per lo step di carico 200 kPa

Numero di punti da confrontare		12									
Algoritmo decisionale											
DATI SPERIMENTALI			TEMPI ADIMENSIONALI TEORICI	CURVA 1	ScalarE Confronto	CURVA 2	ScalarE Confronto	CURVA 3	ScalarE Confronto		
Punti confronto	T (punti spErimEntali)	S	T (sol)	s(sol)	X <sub>1</sub>	s(sol)	X <sub>2</sub>	s(sol)	X <sub>3</sub>		
Nr.											
1	0.00167	0.00006	0.00000	0.00000	0.00006	0.00000	0.00006	0.00000	0.00006		
2	0.00418	0.00008	0.00000	0.00000	0.00008	0.00000	0.00008	0.00000	0.00008		
3	0.00835	0.00011	0.00000	0.00000	0.00011	0.00000	0.00011	0.00000	0.00011		
4	0.01670	0.00016	0.00000	0.00000	0.00016	0.00000	0.00016	0.00000	0.00016		
5	0.03340	0.00024	0.00000	0.00000	0.00024	0.00000	0.00024	0.00000	0.00024		
6	0.06680	0.00026	0.00000	0.00000	0.00026	0.00000	0.00026	0.00000	0.00026		
7	0.13361	0.00031	0.00000	0.00000	0.00031	0.00000	0.00031	0.00000	0.00031		
8	0.28391	0.00034	0.57047	0.00038	0.00004	0.00040	0.00006	0.00042	0.00036		
9	0.50103	0.00037	1.06671	0.00039	0.00003	0.00042	0.00005	0.00045	0.00039		
10	1.00205	0.00039	2.01343	0.00043	0.00004	0.00047	0.00008	0.00051	0.00043		
11	2.00410	0.00044	4.02686	0.00051	0.00007	0.00058	0.00014	0.00065	0.00051		
12	3.49048	0.00048	7.01345	0.00062	0.00014	0.00073	0.00026	0.00085	0.00060		
13	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000		
					$\Sigma X_1$		$\Sigma X_2$		$\Sigma X_3$		
					1.53207E-03		1.8117E-03		3.51265E-03		

Figura 92: Riassunto dell'algoritmo decisionale per lo step di carico 200 kPa, in verde la curva scelta.

<b>d100</b>	<b>d0</b>	<b>d50</b>	<b>t50</b>	<b>Cv1</b>	<b><math>\Delta H100</math></b>
[m]	[m]	[m]	[s]	[m <sup>2</sup> /s]	[m]
3.57E-04	5.55E-06	1.81E-04	138	9.86E-08	3.52E-04
<b><math>\Delta H24h</math></b>	<b>r</b>	<b>Cv</b>	<b><math>\Delta\sigma</math></b>	<b>Eprim.</b>	<b>k</b>
[m]	[-]	[m <sup>2</sup> /s]	[kPa]	[kPa]	[m/s]
0.000496	70.88%	6.99E-08	200	4830.86	1.48E-10

Figura 93: Dati ricavati dalla curva teorica, in particolare si riportano: il  $d_{100}$  ed il  $d_0$  corretti il  $d_{50}$  ed il  $t_{50}$ , il  $C_{v1}$  stimato in riferimento alla curva teorica, il  $\Delta H100$  in riferimento alla teorica, il  $\Delta H24h$  in riferimento ai dati sperimentali,  $r$  coefficiente di riduzione da applicare al  $C_{v1}$ ,  $C_v$  coefficiente di consolidazione primario ottenuto dal  $C_{v1}$  e dall'applicazione di  $r$ , il  $\Delta\sigma$  applicato al provino,  $E_{prim}$  Modulo edometrico stimato in riferimento alla curva teorica, la stima della permeabilità  $k$  eseguita in riferimento alla curva teorica, per lo step di carico 200 kPa



#### 4 CONFRONTO DEI RISULTATI OTTENUTI E DISCUSSIONE

Di seguito vengono confrontati i dati ottenuti con il metodo di Casagrande, il solo metodo del “curve fitting” ed il metodo del “curve fitting” associato alla correzione tramite il coefficiente  $r$  (§3.2). I valori calcolati sono riportati in figura 94.

step di carico	Cv (Casagrande)	Cv (curve fitting)	Cv (curve fitting + r)	Cv(Casagran de)/Cv (Curve fitting)	Cv (Casagrande) /Cv (curve fitting + r)
kPa	cm <sup>2</sup> /s	cm <sup>2</sup> /s	cm <sup>2</sup> /s		
6.25	1.35E-04	2.53E-04	1.97E-04	187%	146%
12.5	7.72E-05	1.77E-04	1.26E-04	230%	164%
25	4.39E-04	1.45E-03	7.70E-04	330%	175%
50	1.80E-04	3.39E-04	2.81E-04	188%	157%
100	3.09E-04	4.94E-04	3.85E-04	160%	125%
200	4.61E-04	9.86E-04	6.99E-04	214%	152%

Figura 94: confronto dei Cv ottenuti con le varie metodologie d'interpretazione

Dal confronto si evince che il  $C_v$  calcolato con metodo del “curve fitting”, tende ad aumentare rispetto allo stesso calcolato con il metodo di Casagrande. Rispetto alle tensioni applicate non si nota una particolare tendenza. Infatti, il rapporto tra i due valori tende ad aumentare fino allo step di carico 3 (25 kPa) per poi calare nello step successivo.

Correzioni minori vengono rinvenute applicando il coefficiente riduttivo  $r$ . La correzione proposta da Mikasa e Takada, tende a riportare i valori del coefficiente di consolidazione molto vicini a quelli calcolati con la procedura di Casagrande, soprattutto nei primi step di carico. Questo risulta giustificabile in quanto tale correzione, come precedentemente descritto (§3.?), ha lo scopo di reintrodurre la quota parte di cedimenti dovuti agli effetti viscosi che avvengono durante la consolidazione primaria. Infatti, come affermato ed attuato da Mikasa e Takada, il  $C_v$  ottenuto dall'applicazione del coefficiente riduttivo risulta essere più vicino alla realtà e risulta avere miglior precisione in sito. Quindi il  $C_v$  ottenuto dal curve fitting e successivamente ridotto con “ $r$ ” risulta non essere esente da consolidazione secondaria, ma applicabile con in sito per la predizione della velocità con cui il terreno arriva a consolidazione, primaria e secondaria.

Il rapporto tra i coefficienti così corretti e quelli calcolati secondo la procedura di Casagrande evidenzia una tendenza ad aumentare al crescere delle tensioni applicate sul provino. Tale evidenza andrà verificata mediante la raccolta di un maggior numero di dati, in modo da creare una base statistica più consistente.

## 5 CONCLUSIONI

Questo lavoro di tesi si inserisce nell'ambito della caratterizzazione in laboratorio dei sedimenti dragati e conferiti nella vasca di colmata presente nel Porto di Ancona.

Il lavoro, svolto all'interno dei laboratori del Dipartimento SIMAU, ha riguardato la caratterizzazione di 3 lotti di sedimenti dragati: "Fano", "Marina Dorica" ed "Isa Palumbo". In questa tesi, sono riportati i dati relativi a prove di classificazione (granulometria, limiti di consistenza ...), di sedimentazione (sedimenti "Fano"), di prove edometriche ("Fano", "Isa-Palumbo" e "Marina Dorica").

In particolare, sono state approfondite la procedura di esecuzione delle prove edometriche ad incrementi di carico costanti e l'interpretazione dei risultati di tale prova secondo i metodi solitamente utilizzati per i terreni. È stato, inoltre, utilizzato un metodo di interpretazione della prova edometrica specifico per materiali soffici, che subiscono grandi deformazioni.

Dal confronto dei risultati ottenuti, con l'interpretazione di Mikasa e Takada, si evince che i coefficienti di consolidazione determinati con metodo del "curve fitting", tendono ad avere valori più elevati, rispetto a quelli determinati con il metodo di Casagrande. Non vi sono tendenze particolari da rilevare rispetto alle tensioni applicate nei diversi step di carico.

Anche nel caso di correzione del coefficiente di consolidazione mediante in coefficiente di riduzione " $r$ " (sempre proposto da Mikasa e Takada), i valori calcolati sono sempre maggiori di quelli ottenuti con la procedura di Casagrande. Tuttavia, i valori di  $C_v$  risultano molto prossimi per basse tensioni applicate sul provino.

Sebbene le tendenze riscontrate siano comune a tutti i valori determinati con la procedura di Mikasa e Takada, per poter ritenere tali risultati statisticamente consistenti, il confronto andrà effettuato su un numero di dati molto maggiore.

La procedura di Mikasa e Takada seppur di semplice applicazione pratica, prevede diversi passaggi a carico dell'utente, che risultano pertanto di difficile gestione se devono essere ripetuti sistematicamente per tutti i dati a disposizione.

Allo scopo di alleggerire l'onere di calcolo gravante sull'utente, si è sviluppato un algoritmo informatico digitale che implementa la procedura mediante due programmi di calcolo di comune utilizzo (Mathcad ed Excel).

La procedura permette di eseguire il calcolo della curva teorica impostando dei semplici valori di ingresso relativi alle caratteristiche del terreno. Esportando i valori su Excel la ricerca della migliore curva è fatta in automatico, tuttavia all'operatore viene richiesto di scegliere i coefficienti moltiplicativi della soluzione importata. Il processo decisionale della migliore curva è automatico così come il calcolo del coefficiente di consolidazione.

Certamente alcune operazioni previste nella procedura potrebbero essere maggiormente automatizzate, in modo da migliorare il tempo di elaborazione e la dipendenza dall'esperienza dell'utente. In particolare:

- l'utilizzo di due programmi diversi costringe l'utente a effettuare manualmente l'esportazione dei risultati da Mathcad a Excel. L'utilizzo di un software di programmazione e calcolo numerico (come ad esempio Matlab) eviterebbe questo passaggio. Un'ulteriore possibilità consiste nell'utilizzo di Macro VBA all'interno del programma Excel.
- La procedura di trasformazione della variabile tempo,  $t$ , in tempo assoluto,  $T_v$ , comporta la scelta da parte dell'utente di un valore iniziale del coefficiente di consolidazione. Rendere tale operazione automatica e indipendente dall'utente semplificherebbe notevolmente la procedura.



## 6 BIBLIOGRAFIA

- [1] *Casagrande, A. (1936). The structure of clay and its importance in foundation engineering. Boston Society Civil Engineers Journal.*
- [2] *Taylor, D. W., & Merchant, W. (1940). A theory of clay consolidation accounting for secondary compression. Journal of Mathematics and Physics, 19(1-4), 167-185.*
- [3] *Mikasa, M., & Takada, N. (1986). Determination of coefficient of consolidation (Cv) for large strain and variable Cv values. In Consolidation of soils: Testing and evaluation. ASTM International.*
- [4] *Piunti, M. 2018. "Classificazione e caratterizzazione di sedimenti di dragaggio mediante prove di laboratorio". Tesi di Laurea Triennale. Università Politecnica delle Marche.*
- [5] *Felici, M. 2017. "Aspetti geotecnici connessi con la gestione dei sedimenti marini dragat", Ph.D. Thesis. Università Politecnica delle Marche*
- [6] *ASTM D7928-17 Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis.*
- [7] *ASTM D854 - 14 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.*
- [8] *ASTM D2974 - 14 Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils.*
- [9] *ASTM D2216 - 19 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.*
- [10] *ASTM D4318 - 10 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.*

- [11] *Imai, G. 1980. Settling behaviour of clay suspension. Soils and Foundations, 20(2): 61–77. doi:10.1248/cpb.37.3229.*
- [12] *Imai, G. (1981). Experimental studies on sedimentation mechanism and sediment formation of clay materials. Soils and foundations, 21(1), 7-20.*
- [13] *ASTM D2435 – 04 Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading.*
- [14] *ASTM, D. 5856–95 (2002)-Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous material using a rigid-wall, compaction-mold permeameter. West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials, 1-8.*
- [15] *William Lambre T., Whitman V.R. – Meccanica Dei Terreni, traduzione di Calogero Valore*
- [16] *Mikasa, M. (1963). The consolidation of soft clay-a new consolidation theory and its application.*
- [17] *Viggiani C. (1973) Contributo allo studio della consolidazione unidimensionale delle argille*



