Usporedba rezultata ispitivanja direktne vlačne čvrstoće stijena s rezultatima ispitivanja indirektne vlačne čvrstoće brazilskim testom

Čolić, Antonela

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:865270

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij rudarstva

USPOREDBA REZULTATA ISPITIVANJA DIREKTNE VLAČNE ČVRSTOĆE STIJENA S REZULTATIMA ISPITIVANJA INDIREKTNE VLAČNE ČVRSTOĆE BRAZILSKIM TESTOM

Diplomski rad

Antonela Čolić

R 141

Zagreb, 2016.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

USPOREDBA REZULTATA ISPITIVANJA DIREKTNE VLAČNE ČVRSTOĆE STIJENA S REZULTATIMA ISPITIVANJA INDIREKTNE VLAČNE ČVRSTOĆE BRAZILSKIM TESTOM

ANTONELA ČOLIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Lisabonu
Instituto Superior Técnico
Zavod za Rudarstvo i Geologiju

Sažetak

U ovom diplomskom radu pisati će se o čvrstoći stijena, točnije vlačnoj čvrstoći. Obraditi će se teorijski i praktični dio u kojem će se izvršiti ispitivanje direktne i indirektne vlačne čvrstoće (Brazilski test) na dva različita uređaja, te će se na kraju usporediti rezultati. Uzorak koji će se ispitivati je Portugalski vapnenac, čije će se karakteristike detaljnije opisati u tekstu.

Cilj ovog diplomskog rada je vidjeti koje su razlike ili sličnosti u rezultatima ispitivanja na ta dva uređaja, da li je ispitivanje Brazilskim testom pouzdano, te da li se direktno ispitivanje može zamijeniti indirektnim, zbog jednostavnosti u izvođenju. Ispitivanja su provedena u geomehaničkom laboratoriju tehničkog fakulteta u Lisabonu (Instituto Superiore Tecnico), pod vodstvom profesorice Matilde Costa e Silva, te uz pomoć laboratorijskog tehničara.

Ključne riječi: vapnenac, čvrstoća stijena, direktna čvrstoća, indirektna čvrstoća, brazilski test

Završni rad sadrži: 34 stranica, 7 tablica, 18 slika, 18 referenci.
Jezik izvornika: Hrvatski
Završni rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr.sc. Trpimir Kujundžić, redoviti profesor RGNF-a
Ocjenjivači: Dr.sc. Trpimir Kujundžić, redoviti profesor RGNF-a
Dr.sc. Petar Hrženjak, izvanredni profesor RGNF-a
Dr.sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF-a

Datum obrane: 26. rujan, 2016

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's Thesis

COMPARISON OF DIRECT TENSILE STRENGHT TEST RESULTS OF ROCKS TO TEST RESULTS OF INDIRECT TENSILE STRENGTH TEST BY THE BRAZILIAN TEST

ANTONELA ČOLIĆ

Thesis completed at: Technical University of Lisbon
Instituto Superior Técnico
Mining ang Geology engineering

Abstract

This master thesis is devoted to rock strength, more precisely tensile rock strength testing.
Thesis is consisted of the theoretical part and the practical part during which direct and indirect (Brazilian test) tensile rock strength testing was done on two different machines. Comparison of the test results is presented at the end of the report. Sample on which the testing was done is Portuguese limestone, characteristics of which are described in the report. Purpose of this master thesis is to present differences and similarities of direct and indirect testing methods, and to make conclusions about the reliability of the indirect method and replaceability of direct testing with indirect testing. Advantages what would be gained from this replacement are related to the simpler procedure of indirect testing. Testing was done in geomechanic laboratory in technical faculty Instituto Superiore Tecnico in Lisbon, mentored by professor Matilde Costa e Silva, and laboratory technician.

Keywords: limeston,, tensile strength, direct tensile strength, indirect tensile strength, Brazilian test

Thesis contains: 34 pages, 7 tables, 18 figures, 18 references.
Original in: Croatian
Thesis deposited at: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb
Supervisor: PhD Trpimir Kujundžić, Full Professor
Reviewers: PhD Trpimir Kujundžić, Full Professor
PhD Petar Hrženjak, Associate Professor
PhD Dubravko Domitrović, Assistant Professor
Date of defense: September 26, 2016

SADRŽAJ

SADRŽAJ……I

POPIS SLIKA III

POPIS TABLICA IV

POPIS PRILOGA V

POPIS KRATICA I KORIŠTENIH MJERNIH JEDINICA VI

1. UVOD 1

2. KARATKTERISTIKE STIJENA I STIJENSKE MASE 3

2.1. Mehanička svojstva stijena 3

3. ČVRSTOĆA 5

3.1. Vlačna čvrstoća 6

4. OBRADA I PRIKAZ REZULTATA 8

4.1. Prikaz rezultata 9

5. PODACI O UZORCIMA 10

5.1. Općenito o vapnencu 10

5.2. Porijeklo i sastav ispitivanih uzoraka 10

5.2.1. Porijeklo uzoraka 10

5.2.2. Sastav uzoraka 11

5.3. Oolitski vapnenac 13

6. ISPITIVANJE VLAČNE ČVRSTOĆE 14

6.1. DIREKTNA METODA ISPITIVANJA VLAČNE ČVRSTOĆE 15

6.1.1. Priprema uzoraka za direktnu metodu ispitivanja vlačnog naprezanja 16

6.1.2. Postupak ispitivanja 16

6.1.3. Obrada i zapis podataka 18

6.2. INDIREKTNA METODA ISPITIVANJA VLAČNE ČVRSTOĆE (BRAZILSKI TEST) 19

6.2.1. Priprema uzoraka za neizravnu metodu ispitivanja vlačne čvrstoće (brazilski test)……. 19
6.2.2. Postupak ispitivanja 20
6.2.3. Obrada i zapis podataka 21
7. PRIKAZ I USPOREDBA REZULTATA ISPITIVANJA 23
7.1. Prikaz rezultata direktne vlačne čvrstoće 23
7.2. Prikaz rezultata indirektne vlačne čvrstoće (brazilski test) 25
7.3. Usporedba rezultata direktne i indirektne vlačne čvrstoće 28
8. ZAKLJUČAK 29
9. LITERATURA 30
PRILOZI…… 32

POPIS SLIKA

Slika 1-1 Geomehanički laboratorij (IST, Lisabon) 2
Slika 3-1 Prikaz odnosa naprezanja i deformacija (Vrkljan, 2013, prema Hudson and Harrison, 1997) 5
Slika 3-2 Utjecaj veličine uzorka na krivulju naprezanja i deformacija pri jednoosnom opterećenju (Vrkljan, 2013, prema Hudson and Harrison, 1997) 7
Slika 5-1 Prikaz područja u kojem se nalazi Luzitanijski bazen (Goncalves, 2014)..... 11
Slika 5-2 Mirkoskopski pregled uzoraka s područja Luzitanijskog bazena. Oznake: A-općeniti pregled, B-C – zooklasti, D- amorfna organska tvar, E-F – foraminifere (zoomorfi), OP – neprozirni fitoklasti, ZM – zoomorfi, ZC – zooklast (Goncalves, 2014) 12
Slika 5-3 Oolitski vapnenac..... 13
Slika 6-1 Uzorci pripremljeni za ispitivanje direktne i indirektne vlačne čvrstoće..... 15
Slika 6-2 Uzorci cementirani na metalne kapice 15
Slika 6-3 Rezanje i priprema uzoraka..... 16
Slika 6-4 Ispitivanje vlačne čvrstoće uzorka direktnom metodom 17
Slika 6-5 Brazilski pokus za indirektno određivanje vlačne čvrstoće (iz Vrkljan, 2013, prema Hudson and Harrison, 1997)..... 19
Slika 6-6 a) Uzorak u obliku diska za indirektno određivanje vlačne čvrstoće; b) Čeljusti u koje se stavlja uzorak..... 20
Slika 6-7 Indirektno ispitivanje vlačne čvrstoće Brazilskim testom 21
Slika 7-1 Slike uzoraka na kojima se vidi mjesto loma uslijed maksimalne sile; a) lom pri vrhu uzorka, b) lom pri dnu uzorka, c) lom približno oko sredine uzorka 23
Slika 7-2 Dijagram s rezultatima direktnog testa 25
Slika 7-3 Lom uzorka u čeljustima (a) i izvan njih (b) – lom je okomit 26
Slika 7-4 Dijagram s rezultatima ispitivanja Brazilskim testom 27
Slika 7-5 Dijagram usporedbe rezultata naprezanja direktnim i indirektnim testom 28

POPIS TABLICA

Tablica 2-1 Mohsova skala 4
Tablica 6-1 Odnos vlačne čvrstoće određene direktnim postupkom i indirektne vlačne čvrstoće određene pomoću brazilskoga testa (Briševac et. al., 2015) 14
Tablica 7-1 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće direktnom metodom 24
Tablica 7-2 Na temelju dobivenih rezultata izračunom su dobivene srednja vrijednost, standardna devijacija i varijanca za direktnu vlačnu čvrstoću 25
Tablica 7-3 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće Brazilskim testom 26
Tablica 7-4 Na temelju dobivenih rezultata izračunom su dobivene srednja vrijednost, standardna devijacija i varijanca za indirektnu vlačnu čvrstoću 27
Tablica 7-5 Usporedba rezultata direktnog i indirektnog ispitivanja vlačne čvrstoće 28

POPIS PRILOGA

Prilog 1 Zapis ispitivanja indirektne vlačne čvrstoće Brazilskim testom (Hrženjak i Briševac, 2009) 33
Prilog 2 Zapis ispitivanja direktne vlačne čvrstoće (IST, Lisabon) 34

POPIS KRATICA I KORIŠTENIH MJERNIH JEDINICA

ISRM- Međunarodno društvo za mehaniku stijena

ASTM – Internacionalna organizacija za standarde (*American Society of the International Association for Testing and Materials*)

IST – Tehničko Sveučilište u Lisabonu

TOC- ukupna organska tvar	(wt%)
HI- vodikov indeks	(mg HC/gTOC)
HC- ugljikovodici	(mg HC/g)
T_{max} – maksimalna temperatura pirolize	(°)
σ- čvrstoća	(MPa)
σ_{DVC}- direktna vlačna čvrstoća	(MPa)
σ_{IVC} – indirektna vlačna čvrstoća	(MPa)
P – maksimalna sila	(kN)
A – poprečni presjek uzorka	(mm^2)
D- promjer baze	(mm)
t – debljina uzorka	(mm)
prirast opterećenja	(N/s)
maseni udio u uzorku	(wt%)

1. UVOD

Tema ovog rada je iz područja mehanike stijena, pa će za početak biti navedeni neki osnovni pojmovi, kako bi se s razumijevanjem krenulo u daljnji tekst.

Međunarodno društvo za mehaniku stijena (ISRM-International Society for Rock Mechanics) daje vrlo kratku definiciju za pojam mehanike stijena: **Mehanika stijena** je teoretska i primijenjena znanost o mehaničkom ponašanju stijena (ISRM, 1975).
Geolozi termin stijena primjenjuju na sve konstituente zemljine kore. Oni govore o konsolidiranoj stijeni (stijena) i nekonsolidiranoj stijeni (tlo). Geotehnički inženjeri pod terminom stijena podrazumijevaju tvrde (*hard*) i krute (*solid*) formacije zemljine kore dok pod tlima smatraju produkte trošenja stijena.
I tlo i stijena se sastoje od mineralnih zrna s tim da stijenu karakterizira neusporedivo veći stupanj povezivanja (cementacije). Glavna razlika između tla i stijena je prisustvo diskontinuiteta u stijenskoj masi koji imaju odlučujući efekt na njeno ponašanje.

Intaktna (monolitna) stijena (*intact rock*) je materijal stijenske mase, tipično predstavljen cijelom jezgrom iz bušotine koja ne sadrži guste strukturne diskontinuitete (ISRM, 1975). Ili izvađeni dio stijenske mase koji se koristi za utvrđivanje mehaničkih svojstava stijene.
Stijenska masa (*rock mass*) je stijena kakva se javlja in-situ, uključujući njene strukturne diskontinuitete (ISRM, 1975), tj. prirodna geološka formacija čvrste stijene sa svim svojim oslabljenjima odnosno diskontinuitetima.
Diskontinuitet je opći pojam za mehanički prekid u stijenskoj masi koji ima malu ili nikakvu vlačnu čvrstoću okomito na smjer pružanja. To je zajednički naziv za rasjede, pukotine i prsline.

Termin "stijena" pokriva ogroman broj različitih varijeteta. Samo po parametru jednoosne čvrstoće, stijene pokrivaju područje od 1 do više stotina MPa.
Ponašanje stijenske mase u najvećoj mjeri kontroliraju diskontinuiteti te na taj način postaju nezaobilazan element u svim segmentima mehanike stijena (ispitivanjima, modeliranju, svojstvima i sl.).

U primjeni stijena u inženjerstvu (iskopi i tuneli, stabilnost kosina) radi se u stijenskim masama čije inženjerske značajke više ovise o diskontinuitetima nego o fizikalnim značajkama intaktne stijene.

Ovaj rad se bavi ispitivanjima čvrstoće stijene, koja su provedena u geomehaničkom laboratoriju tehničkog fakulteta (IST) u Lisabonu (slika 1-1).
Uspoređivati će se rezultati dobiveni ispitivanjem na dva različita uređaja za ispitivanje čvrstoće, odnosno uspoređivati će se rezultate direktnog i indirektnog (Brazilskog) testa za ispitivanje vlačne čvrstoće.
Za ispitivanje je potrebno prethodno pripremiti uzorke, koji se razlikuju s obzirom na tip ispitivanja.
Priprema uzoraka, opis uređaja te princip rada uređaja biti će detaljnije opisani u nastavku teksta.



Slika 1-1 Geomehanički laboratorij (IST, Lisabon)

2. KARATKTERISTIKE STIJENA I STIJENSKE MASE

Mehanika stijena proučava stijenske mase onakve kakve se javljaju u prirodi. Stijenske mase u prirodi su u pravilu razlomljene (diskontinuirane), heterogene, anizotropne i već se nalaze u nekom prirodnom stanju naprezanja.

Svojstva stijena dijelimo u više kategorija, a to su:

- mineraloško-petrografska svojstva (struktura i tekstura)
- fizikalna svojstva (gustoća)
- hidrofizička svojstva (vodopropusnost, bubrenje, ljepljivost)
- mehanička svojstva (čvrstoća, tvrdoća, žilavost i krtost)
- tehnička svojstva (rastresitost, stabilnost rastresitog materijala, otpor prema bušenju, abrazivnost, otpor prema rezanju i struganju)

Za ispitivanje vlačne čvrstoće najbitnija su mehanička svojstva, pa će ona biti detaljnije opisana.

2.1. Mehanička svojstva stijena

Mehanička svojstva stijena su: tvrdoća, žilavost, krtost i čvrstoća.

Tvrdoća - otpor koji stijena pruža prodiranju nekog drugog tvrđeg tijela u njegovu površinu, ovisi o mineralnom sastavu i djelomično strukturi stijene.
Postoje tri načina za određivanje tvrdoće:

- standardni postupak (utiskivanje dijamantnim šiljkom)
- dinamički postupak (Schmidtov čekić)
- Mohsova skala (tablica 2-1)

Tablica 2-1 Mohsova skala

Mineral	Tvrdoća
talk	1
gips	2
kalcit	3
fluorit	4
apatit	5
ortoklas	6
kvarc	7
topaz	8
korund	9
dijamant	10

Žilavost je otpor prema djelovanju dinamičkih sila (to je zapravo dinamička čvrstoća), koji u rudarstvu dolazi do izražaja u procesima gdje sila djeluje na stijenu u mahovima, diskontinuirano i pulsirajuće (npr. pri radu udarnih drobilica, hidrauličkog čekića, te u manjoj mjeri kod rotornih bagera, bagera vedričara i dinamičkih strugova za ugljen).

Krtost je suprotno svojstvo od žilavosti, tj. svojstvo materijala da ne pruža otpor dinamičkom naprezanju i da do njenog sloma dođe bez prethodne deformacije.

Čvrstoća stijene je otpor kojeg vanjske sile moraju savladati da bi došlo do sloma odnosno razaranja stijene, tj. to je naprezanje pri kojem dolazi do sloma stijene.
Čvrstoća stijene može biti vlačna, tlačna i posmična, a može se ispitivati u jednoosnom ili troosnom pokusu. Čvrstoća će detaljnije biti objašnjena u sljedećem poglavlju.

3. ČVRSTOĆA

Čvrstoća je osnovno kvantitativno inženjersko svojstvo uzorka stijene, to je veličina naprezanja u trenutku sloma.

Naprezanje koje se nanosi na uzorak može biti tlačno, posmično i vlačno, tako da i čvrstoća može biti:

-TLAČNA (jednoosna ili troosna)

-POSMIČNA

-VLAČNA

Standardizacijom pokusa eliminiran je problem varijacije čvrstoće zbog različite brzine nanošenja naprezanja (ISRM preporučuje 0,5-1,0 MPa/s).

Standardni oblik uzorka je **cilindar**, jer se većina uzoraka dobiva bušenjem, iako se za neke pokuse koriste i drugi oblici (uzorak u obliku diska za Brazilski test).

Čvrstoća je definirana kao naprezanje koje stijena može podnijeti pod određenim uvjetima deformacije. Vršna čvrstoća σ_c je najveće naprezanje koje stijena može podnijeti pri određenoj (vršnoj) deformaciji. Rezidualna čvrstoća σ_r je smanjena vrijednost čvrstoće stijene poslije loma, gdje postoji značajna deformacija (slika 3-1.). Čvrstoća ovisi o značajkama stijenskog materijala, njezinih parametara čvrstoće, ali i vanjskim čimbenicima (npr. naprezanja kojima je izložena, dinamička opterećenja, rasterećenja, prisutnost vode itd.).



Slika 3-1 Prikaz odnosa naprezanja i deformacija (Vrkljan, 2013, prema Hudson and Harrison, 1997)

Lom (*failure*) nastupa kada materijal dosegne vršnu čvrstoću, a u stijenskoj masi se može dogoditi kao smicanje na plohi loma (npr. na kosini), direktni vlačni lom (na površinama diskontinuiteta), lom savijanjem (u svodovima podzemnih konstrukcija); lom kompresijom (npr. jednoosna kompresija u stupovima rudnika) i urušavanje (npr. vrlo porozna stijena se urušavanjem pretvara u materijal sličan tlu).

U ovom radu fokus će biti na vlačnoj čvrstoći, tako da će ona biti detaljnije opisana u nastavku.

3.1. Vlačna čvrstoća

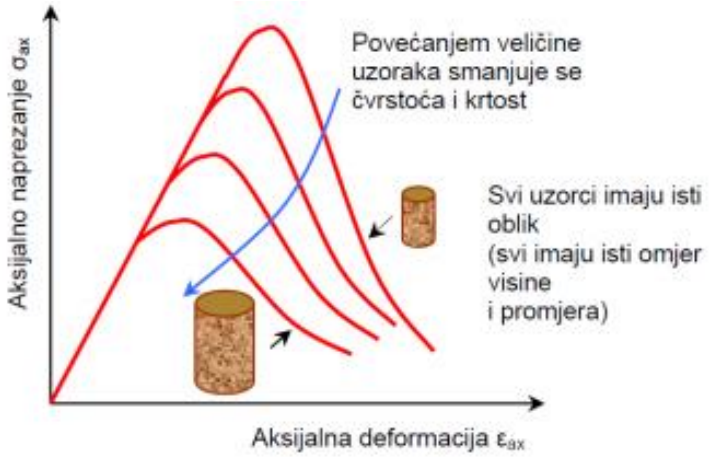
Vlačna čvrstoća je veličina koja se najrjeđe određuje zbog svog kompleksnog izvođenja. Zbog kompleksnosti direktnog izvođenja, pojavile su se nove metode indirektnog testa vlačne čvrstoće, kao što je Brazilski test, ali i neki drugi koji se neće razmatrati u ovom radu.

Važnost vlačne čvrstoće očituje se najviše kod projektiranja podgrade stropova u podzemnim iskopima i kod predviđanja iznenadnog sloma uslijed vlaka, kada se ograničena jako elastična stijena oslobodi naprezanja i rezultira raspucavanjem stijene (eng. *rock bursts*)

Faktori o kojima ovisi vlačna čvrstoća isti su za tlačnu i posmičnu čvrstoću, a to su: **sastav, tekstura, veličina zrna i njihova povezanost te vlažnost.**

Slika 3-2 pokazuje da se s povećanjem veličine uzorka (svi uzorci imaju isti odnos promjera i visine) smanjuje njegova čvrstoća i krtost (engl. *brittlenes*), dok modul elastičnosti ne varira značajno s veličinom uzorka.

Veći uzorak ima veći broj prslina, heterogeniji je i jače je izražena anizotropija. Većina normi predviđa da promjer uzorka mora biti najmanje 10 puta veći od najvećeg zrna u uzorku. Ovaj kriterij najčešće zadovoljava promjer uzorka veći od 50 mm.



Slika 3-2 Utjecaj veličine uzorka na krivulju naprezanja i deformacija pri jednoosnom opterećenju (Vrkljan, 2013, prema Hudson and Harrison, 1997)

Vlačna čvrstoća ima najmanju vrijednost od sva tri tipa čvrstoće a prisutnost orijentiranih obilježja, kao što su folijacija i laminacija u uzorku, dodatno će umanjit vlačnu čvrstoću, ali i tlačnu i posmičnu.

4. OBRADA I PRIKAZ REZULTATA

Za obradu i prikaz rezultata potrebno je koristiti jednostavne matematičke izraze.
Potrebno je izračunati aritmetičku sredinu odnosno prosjek dobivenih rezultata, pomoću formule :

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} Xi \qquad (4\text{-}1)$$

$\bar{X}$ - Aritmetička sredina
n - broj provedenih ispitivanja
Xi – vrijednost pojedinog rezultata ispitivanja

Isto tako potrebno je odrediti raspršenost rezultata, odnosno odskakanja rezultata od aritmetičke sredine, što se izračuna pomoću standardne devijacije:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (Xi - \bar{X}}{n-1}} \qquad (4\text{-}2)$$

S – standardna devijacija
$\bar{X}$ - Aritmetička sredina
n - broj provedenih ispitivanja
Xi – vrijednost pojedinog rezultata ispitivanja

Također se može odrediti i varijanca uzorka, koja je prosječno kvadratno odstupanje od prosjeka:

$$\upsilon = S^2 \qquad (4\text{-}3)$$

υ – varijanca
S – standardna devijacija

Podatci ispitivanja osnovnih značajki obično su distribuirani prema normalnoj (Gaussovoj) raspodjeli, a određivanje granica pouzdanosti vrijedi za rezultat s više od 30 podataka. Za manji broj podataka granice pouzdanosti određuju se prema T- raspodjeli (Hrženjak, 2009).

Najčešće određivane značajke materijala su:

- Gustoća, poroznost i vlažnost
- Jednoosna tlačna i vlačna čvrstoća
- Deformabilnost (youngov modul i poissonov koeficjent)
- Čvrstoća u troosnom stanju
- Posmična čvrstoća
- Ostale značajke (tvrdoća, homogenost i izotropija, kriterij čvrstoće, i dr.)

Najvažniji čimbenici o kojima ovise rezultati laboratorijskih ispitivanja:

- Način pripreme uzoraka
- Oblik i veličina uzoraka
- Vrsta uređaja za ispitivanje
- Vrste materijala preko kojih se nanosi naprezanje
- Brzine nanošenja naprezanja
- Temperatura
- Početno stanje naprezanja
- Saturiranost pora s vodom i dr.

4.1. Prikaz rezultata

Za prikaz rezultata potrebno je izraditi izvješće tijekom i nakon provedbe testa i proračuna. Podaci se obično zapisuju u obrazac koji je prethodno pripremljen ili se koristi standardni obrazac za određenu metodu ispitivanja.

Obrazac i izvještaj moraju sadržavati osnovne podatke o uzorku, kao što su mjesto i vrijeme vađenja, sastav, gustoća, i dr.

Također mora sadržavati podatke o ispitivanju, koji uređaj i metoda se koristila, te naravno rezultate ispitivanja.

Jasno moraju biti vidljivi i naznačeni proračuni najznačajnijih veličina.

Uz svaki proračun bilo bi poželjno priložiti graf ili dijagram (naprezanja, deformacija pomaka i dr., te dijagrami izračunatih vrijednosti za odabrani niz točaka).

5. PODACI O UZORCIMA

Uzorci na kojima su rađena ispitivanja su vapnenci jurske starosti, izuzeti na području središnjeg Portugala.

5.1. Općenito o vapnencu

Vapnenac je sedimentna (taložna) stijena sastavljena od minimalno 50 % minerala kalcita (kalcijevog karbonata ($CaCO_3$)). Vapnenačke forme najbolje su vidljive i prepoznatljive u toplim, plitkim morskim vodama.

U građi vapnenca razaznaju se tri bitne sastavnice: zrna (ili alokeme), osnova (ili matriks) i vezivo. Zrna mogu biti biogena ili anorganska.

Svi vapnenci sadržavaju barem nekoliko postotaka drugih materijala. To mogu biti maleni udjeli kvarca, feldspata, gline, pirita, siderita i ostalih materijala. Također mogu sadržavati veće komade rožnjaka, pirita ili siderita.

Vapnenac je obično biološka (organska) sedimentna stijena nastala taloženjem školjaka, koralja, algi i fekalnih ostataka. Čisti vapnenac obično je bijele boje, a od primjesa može biti žut, crvenkast, tamnosiv ili crn.

Također, može biti i kemijski (anorganski) formirana sedimentna stijena nastala taloženjem kalcijevog karbonata iz jezera, mora ili oceana.

Prisustvo kalcijevog karbonata u vapnencu daje mogućnost lake identifikacije stijene, koja se izložena hladnoj otopini 5%-tne solne kiseline – zapjeni.

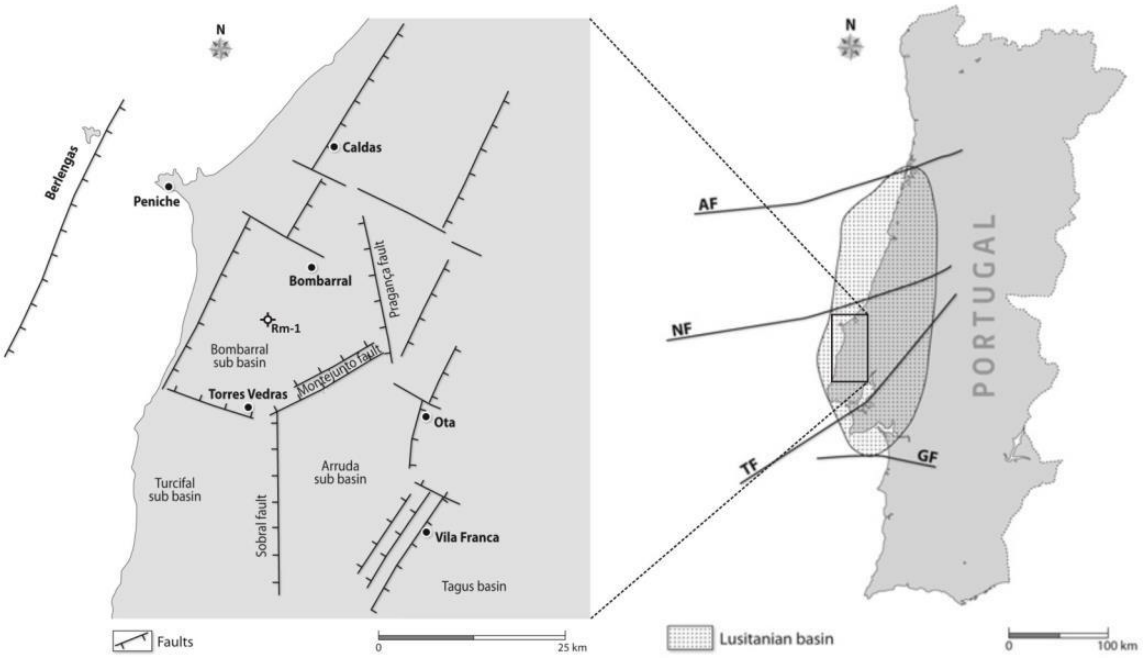
5.2. Porijeklo i sastav ispitivanih uzoraka

5.2.1. Porijeklo uzoraka

Uzorci na kojima se ispitivalo pripadaju karbonatnoj platformi središnjeg Portugala, odnosno nalaze se na Luzitanijskom bazenu.

Luzitanijski bazen (slika 5-1) spada pod glavne portugalske bazene sedimentnih stijena, starosti između gornjeg trijasa i kraja krede (uglavnom jura), a povezano je sa blizinom sjevernog Atlantika.

Nalazi se na granici Iberijskog masiva (poluotoka), dugačak je oko 300 km a proteže se u smjeru sjever-jug, a širok je oko 150 km, ispunjen sa maksimalno 5 km debelim sedimentima od gornjeg trijasa do krede, prekriven sedimentima iz kenozoika., a dijeli se na tri djela: sjeverni, središnji i južni.



Slika 5-1 Prikaz područja u kojem se nalazi Luzitanijski bazen (Goncalves, 2014)

5.2.2. Sastav uzoraka

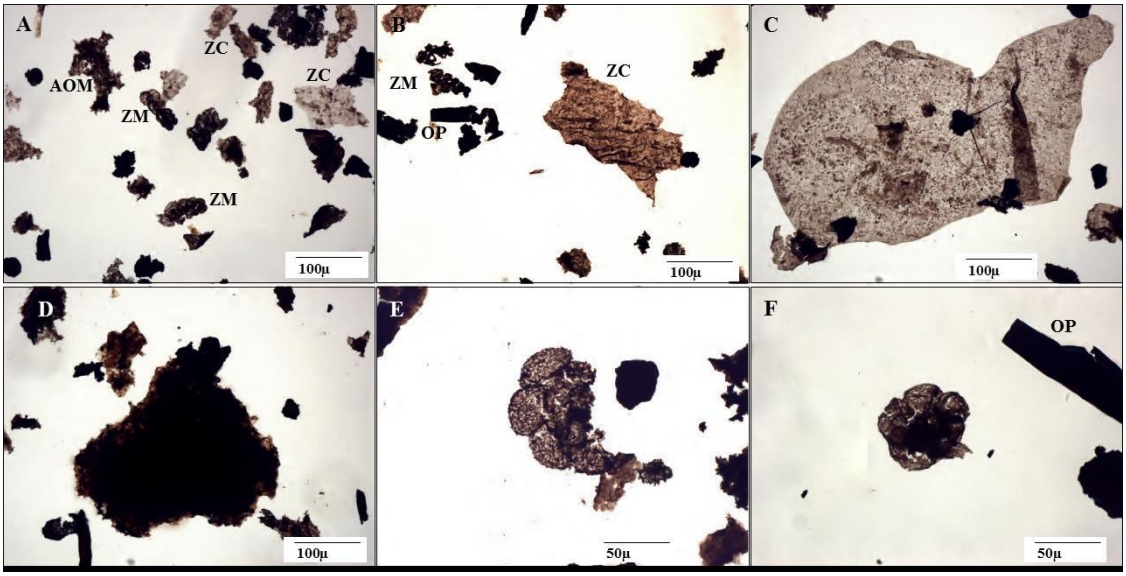
Uzorci su sa centralnog dijela a izvađeni su u podnožnom bazenu Arruda, gdje se u uzorcima pronalaze uglavnom zemljane organske tvari sa organskim ugljenom (total organic carbon –TOC) masenog udjela manjeg od 1 wt% (s tim da su vrijednosti vodikovog indeksa HI bile manje od 100 mg HC/g TOC), iako je taj udio bio veći u pojedinim uzorcima (varira između 0,06 i 2,10 wt%). Unatoč tome postoje dijelovi kod kojih se pojavljuje povećanje udjela morskih organskih tvari (uključujući zooklaste). U ovom podnožnom bazenu organske tvari nanesene su na prostor koji pripada morskom okolišu, gdje prevladavaju redoks uvjeti.

Ukupni udio sumpora varira između 0,01 i 6,12 wt% dok su vrijednosti ugljikovodika uglavnom bile manje od 2,5 mg HC/g. maksimalna temperatura (Tmax) pri kojoj dolazi do pirolize (razgradnje organske tvari u stijeni) je između 302 i 466 stupnjeva.

Spore i zrnca pojavljuju se u različitim veličinama i oblicima (od ovalnih do uglatih) te pružanjima (slika 5-2). Uočene su alge iz roda Classopollis koje ukazuju na toplu i suhu

klimu i povezane su sa područjem sa visokim stupnjem sedimentacije. Također planktoni iz izvorske vode su pronađeni u svim uzorcima. Pojava izvorskih plantkona i algi u marinskom sedimentu može biti povezana sa transportom i premještanjem sedimenata.
Marinski mikroplanktoni i zooklasti su pouzdani indikatori normalnih marinskih uvjeta.
Piritni kristali pojavljuju se nepromijenjeni kao pojava organske materije, u fluorescenciji sa visokom razinom očuvanosti, dok su kod sedimenata koji su bili pod utjecajem atmosferilija mnogi kristali zamijenjeni sa željeznim oksidima ili hidroksidima (Goncalves, 2014).

Zooklasti pripadaju organskim tvarima životinjskog porijekla kao što su ljuske jaja, riblje kosti, školjke, ostatci insekata i drugih člankonožaca čija se materija sastoji od silicija ili kalcija, dok su Zoomorfi također životinjskog porijekla, sastoje se od životinjskih čestica, u cijelosti ili oštećene, tu spadaju obloge foraminifere.
S obzirom na njihove karakteristike vrlo se rijetko nalaze u krednim naslagama koje pripadaju marinskom sedimentu, ali s obzirom na velike količine zooklasta i zoomorfa upućuju na visoku produktivnost zooplanktona i općenito visoku primarnu produktivnost, a da bi uopće bilo tako ti organizmi su morali živjeti u vodi koja je bila bogata kisikom i s niskim udjelom organskog ugljena (manje od 0,16 wt%)
Amorfna organska tvar je uglavnom homogeno raspoređena



Slika 5-2 Mirkoskopski pregled uzoraka s područja Luzitanijskog bazena. Oznake: A- općeniti pregled, B-C – zooklasti, D- amorfna organska tvar, E-F – foraminifere (zoomorfi), OP – neprozirni fitoklasti, ZM – zoomorfi, ZC – zooklast (Goncalves, 2014)

5.3. Oolitski vapnenac

Srednje jurske naslage Luzitanijskog bazena sadrže vapnence, dolomitične vapnence, dolomite i oolitičke vapnence.

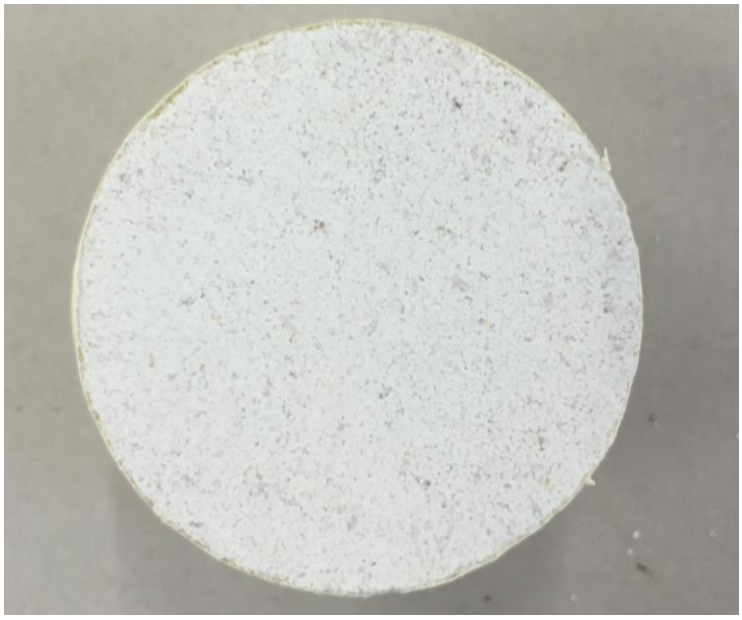
Oolitski vapnenac (*egg stone*) je sedimentna stijena formirana od oolita, sferičnih granula sastavljenih od koncentričnih slojeva. Ime su dobili prema grčkoj riječi za riblju ikru (*oon*). Ooliti se sastoje od ooida promjera 0,25-2 mm, a veličina ovisi o količini vremena kojoj su bili izloženi vodi prije nego su prekriveni drugim sedimentom.

Ooidi su uglavnom sastavljeni od kalcijevog karbonata, ali mogu biti i od fosfata, gline, dolomita i željeznih minerala.

Obično su nastali u toplim, dobro saturiranim i plitkim marinskim područjima s jakim strujama, iako su neki nastali i u jezerima.

Mehanizam nastajanja počinje sa malim fragmentom sedimenta koji se ponaša kao sjeme (npr. Kamdić školjke). Jake struje ga vode do morskog dna gdje se akumulira u pojaseve kemijski istaloženog kalcita.

Oolitske stijene izrazito su homogene i izotropne baš zbog svog specifičnog načina postanka (slika 5-3).



Slika 5-3 Oolitski vapnenac

6. ISPITIVANJE VLAČNE ČVRSTOĆE

Jednoosna vlačna čvrstoća jednaka je najvećem vlačnom naprezanju koje materijal može preuzeti neposredno prije sloma, odnosno opisuje otpor materijala prema vlačnom naprezanju. Za određivanje jednoosne vlačne čvrstoće na raspolaganju su izravne i neizravne metode.

U inženjerskoj praksi rijetko se koriste izravne metode za ispitivanje vlačne čvrstoće iz razloga što je teško pripremiti i prihvatiti uzorak, a i stijena na terenu uglavnom nikada nije u uvjetima direktnog vlaka. Za određivanje vlačne čvrstoće uglavnom se koriste neizravne metode, kod kojih su vlačna naprezanja generirana tlačnim. Opravdanost ovog postupka temelji se i na eksperimentalnoj činjenici da se većina stijena koje se nalaze u stanju dvoosnog naprezanja najčešće lomi uslijed prekoračenja vlačne čvrstoće, u uvjetima kada je jedno glavno naprezanje vlačno, a drugo tlačno, s veličinom koja po iznosu ne prelazi trostruku vrijednost vlačnog naprezanja (Briševac, 2012).

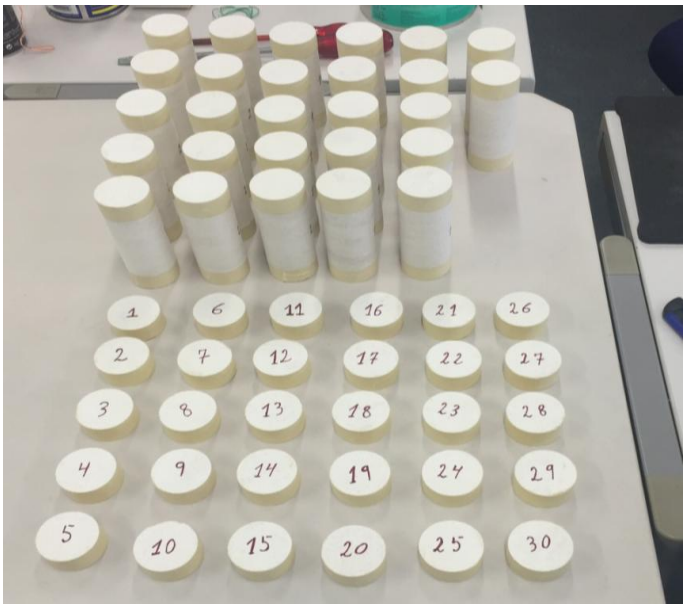
U tablici 6-1 je navedeno nekoliko tipova stijena te njihov odnos direktne i indirektne vlačne čvrstoće, gdje se vidi da postoji razlika između dobivenih rezultata. Kod vapnenaca, kao što se vidi u tablici, zanimljivo je to što kod tipova Indijana i Saraburi brazilski test relativno dobro procjenjuje njihovu čvrstoću, dok općenito kod vapnenaca on im umanjuje čvrstoću.

Tablica 6-1 Odnos vlačne čvrstoće određene direktnim postupkom i indirektne vlačne čvrstoće određene pomoću brazilskoga testa (Briševac et. al., 2015)

Tip stijene	σ_{DVC}	σ_{IVC}	$\sigma_{IVC} / \sigma_{DVC}$	Izvori
Granit	6,3	10,3	1,63	Perras i Diederichs, 2014
Mramor	7,5	10,1	1,35	Perras i Diederichs, 2014
Dolomit	5,7	8	1,4	Perras i Diederichs, 2014
Škriljavci	13,3	11,8	0,89	Perras i Diederichs, 2014
Vapnenac	7,1	6,0	0,85	Perras i Diederichs, 2014
Vapnenac Indiana	5,86	6,21	1,06	Mellor i Hawkes, 1971
Vapnenac Saraburi	9,31 ± 0,65	10,90 ± 0,19	1,17	Fuenkajorn i Klanphumeesri, 2011

Ispitivanje se provodi prema preporučenoj metodi za indirektni postupak Međunarodnog društva za mehaniku stijena (ISRM, 1978).

Za svako ispitivanje pripremljeno je po 30 uzoraka oolitskog vapnenca izvađenog iz Luzitanijskog bazena (Portugal). Uzorci su priređeni prema normi ASTM E4 (slika 6-1).



Slika 6-1 Uzorci pripremljeni za ispitivanje direktne i indirektne vlačne čvrstoće

6.1. DIREKTNA METODA ISPITIVANJA VLAČNE ČVRSTOĆE

Direktni postupak ispitivanja provodi se na uzorcima za koje vrijede zahtjevni uvjeti obrade. Vlačno naprezanje prenosi se na krajeve uzoraka pomoću metalnih kapica s kukama na sebi (slika 6-2).



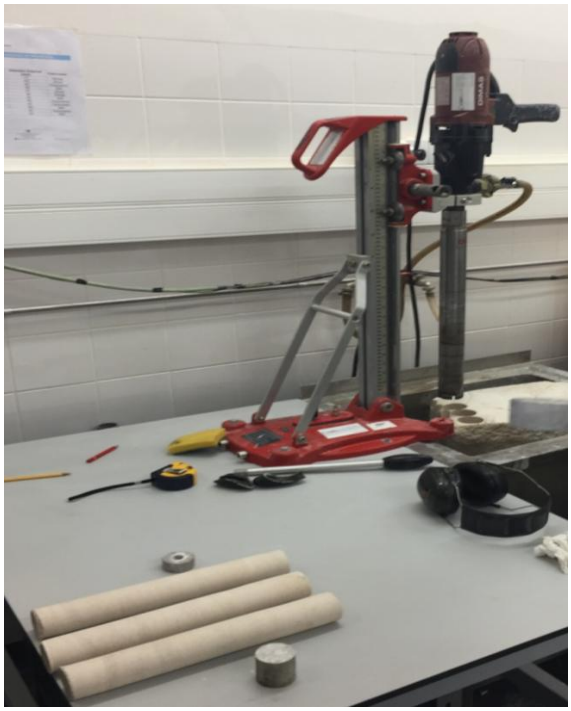
Slika 6-2 Uzorci cementirani na metalne kapice

6.1.1. Priprema uzoraka za direktnu metodu ispitivanja vlačnog naprezanja

Uzorci za izravnu metodu ispitivanja vlačne čvrstoće moraju biti cilindričnog oblika, a visina i promjer moraju biti u omjeru 1:2,5 do 3,0. Dijametar (promjer) mora biti oko 54 mm (različite proporcije visine i promjera uzorka daju različite rezultate, zbog čega je uvijek potrebno izmjeriti i navesti točan omjer i promjer).

Plašt mora biti ravan i gladak bez hrapavosti veće od 0,3 mm. Baze moraju biti poravnate bez nepravilnosti većih od 0,02 mm, te ne smiju odstupati od okomitosti u odnosu na os uzorka više od 0,001 radijan, što je približno 0,05 mm za promjer uzoraka od 50 mm.

Na slici 6-3 može se vidjeti priprema uzorka, odnosno izrada cilindara odgovarajuće veličine.



Slika 6-3 Rezanje i priprema uzoraka

6.1.2. Postupak ispitivanja

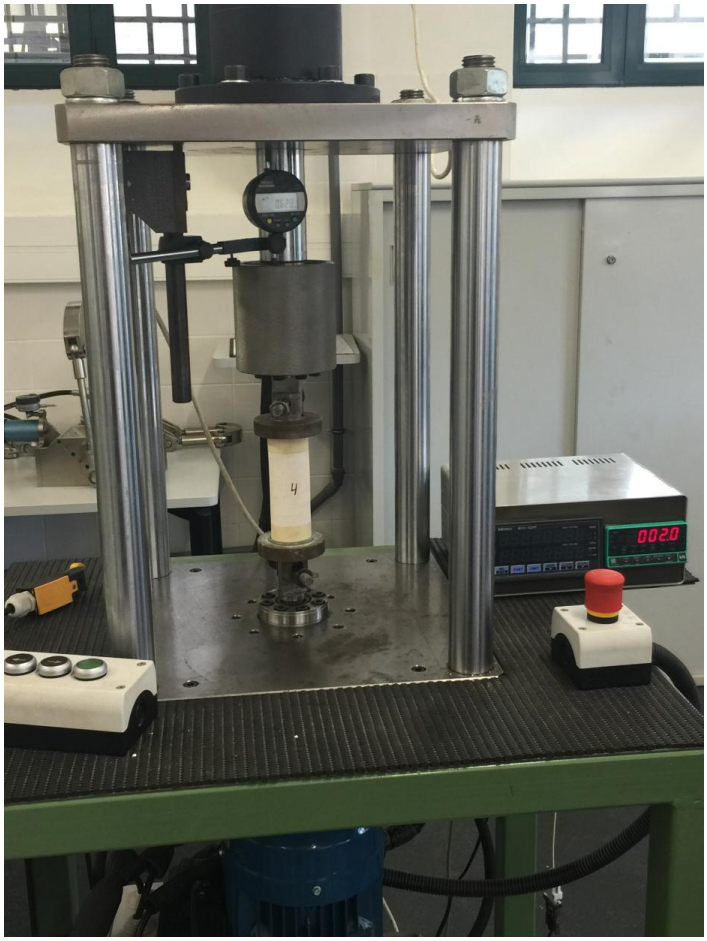
Za ispitivanje direktne vlačne čvrstoće potrebni su:

- Hidraulička preša
- Metalne pločice s kukama
- Mjerilo sile

Oba kraja cilindričnog uzorka zacementiraju se za metalne ploče, posebnim ljepilom. Promjer metalnih ploča ne smije biti manji od promjera uzorka, ali ne smije biti niti veći 2 mm od promjera uzorka. Debljina ploča treba biti 5 mm. Ploče moraju biti povezane s uređajem za nanošenje opterećenja. Debljina cementnog sloja ne smije biti veća od 1,5 mm. Kada taj sloj dovoljno očvrsne da prekorači vlačnu čvrstoću stijene, može se započeti ispitivanje (slika 6-4).

Prilikom ispitivanja najvažnije je da se os djelovanja vlačne sile podudara s osi uzorka bez savijanja ili torzije, odnosno drugih vanjskih utjecaja (Hoek, 1964).

Vlačno naprezanje se nanosi kontinuirano s konstantnim prirastom tako da se lom dogodi otprilike unutar 5 min (između 0,5 i 1 MPa/s).



Slika 6-4 Ispitivanje vlačne čvrstoće uzorka direktnom metodom

6.1.3. Obrada i zapis podataka

Direktna vlačna čvrstoća dobije se dijeljenjem najveće ostvarene vlačne sile prilikom loma s početnom površinom poprečnoga presjeka uzorka (ISRM, 1978).

$$\sigma_{DVC} = \frac{P}{A} \text{ (MPa)} \qquad (6\text{-}1)$$

Gdje je:

σ_{DVC} – direktna vlačna čvrstoća (MPa)

P – maksimalna sila kod koje nastupa lom (N)

A – poprečni presjek uzorka (mm^2)

Početna površina poprečnog presjeka dobije se iz formule :

$$A = \frac{D^2 \times \pi}{4} \text{ (mm}^2\text{)} \qquad (6\text{-}2)$$

Gdje je:

A – površina poprečnog presjeka (mm^2)

D – promjer baze cilindra (mm)

Kao mjerna jedinica za naprezanje i čvrstoću koristi se Pa (paskal) ili najčešće MPa (mega paskal).

Svi potrebni podaci o uzorku kao i rezultati obrade upisuju se u obrazac Zapisa ispitivanja direktne vlačne čvrstoće.

U prilogu br. 1 nalazi se primjerak zapisa direktne vlačne čvrstoće, preuzetog sa Sveučilišta u Lisabonu (IST).

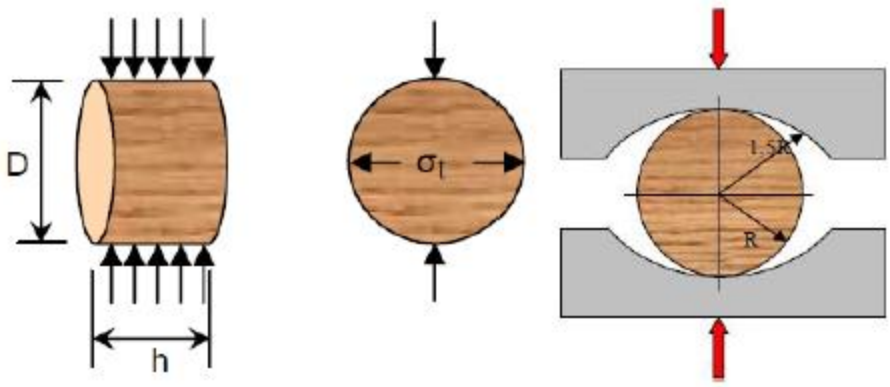
6.2. INDIREKTNA METODA ISPITIVANJA VLAČNE ČVRSTOĆE (BRAZILSKI TEST)

Ideja brazilskog pokusa je rođena 1943, u Brazilu, kada je Carneiro predložio novu metodu za dobivanje vlačne čvrstoće, potaknut pucanjem diskova ispod crkve koju su premještali (Fairbairn i Ulm, 2002).

Međunarodno društvo za mehaniku stijena (ISRM, 1978) usvojilo je standardiziranu metodu brazilskoga testa za indirektno mjerenje vlačne čvrstoće prema izrazu (6-3). Međutim, postupak direktnoga mjerenja vlačne čvrstoće i dalje ostaje kao metoda za određivanje vlačne čvrstoće stijena.

6.2.1. Priprema uzoraka za neizravnu metodu ispitivanja vlačne čvrstoće (brazilski test)

Uzorci za ispitivanje brazilskim testom moraju biti u obliku diska (slika 6-5). Veličina ovisi o čeljustima u koje se stavlja disk tijekom ispitivanja tako da polumjer zakrivljenosti čeljusti mora biti veći za 1,5x od polumjera uzorka, dok širina čeljusti mora biti 1,1 puta veća od širine uzorka.
Dijametar odnosno promjer jezgre uzorka iznosi minimalno 54 mm, a širina je približno jednaka polumjeru uzorka.
Neravnost plašta kontrolirana na tri izvodnice cilindra ne smije biti veća od 0,025 mm.



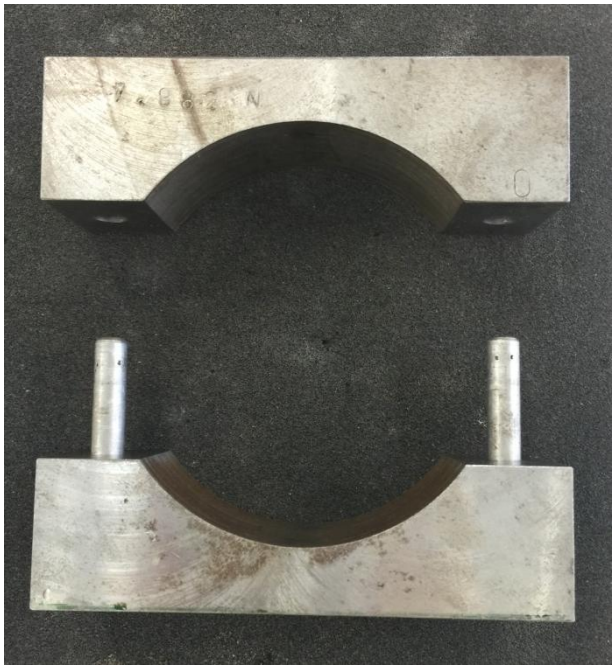
Slika 6-5 Brazilski pokus za indirektno određivanje vlačne čvrstoće (iz Vrkljan, 2013, prema Hudson and Harrison, 1997)

6.2.2. Postupak ispitivanja

Za provedbu ispitivanja brazilskog testa potrebni su:

- Hidraulička preša
- Čelične čeljusti za prijenos opterećenja, izrađene tako da dodiruju kružno oblikovani uzorak stijene na dijametralno suprotnim stranama pod kutom kontakta oko 10° kod sloma.
- Papirnata ljepljiva traka, dvostruke debljine, čija širina mora biti jednaka ili neznatno veća od debljine uzorka.

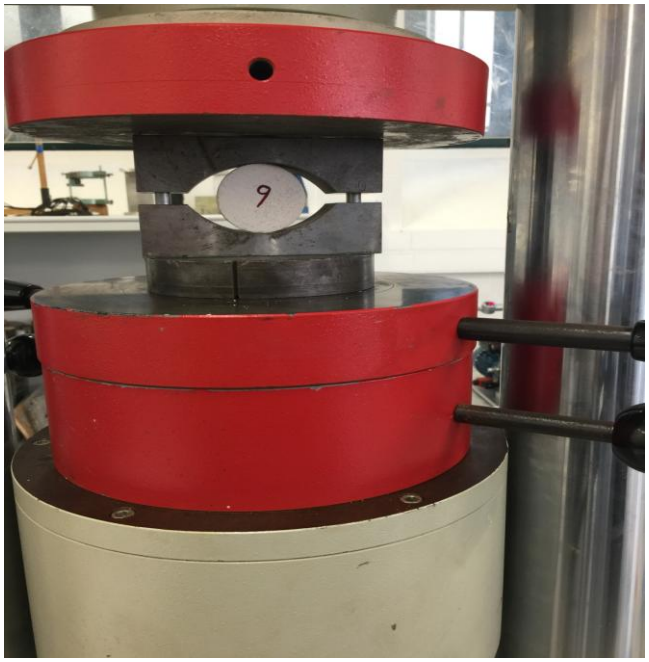
Uzorci moraju oko plašta biti zamotani slojem trake te postavljeni pravilno u uređaj za ispitivanje, tako da ih čeljusti opterete dijametralno (slika 6-6).

a)  b) 

Slika 6-6 a) Uzorak u obliku diska za indirektno određivanje vlačne čvrstoće; b) Čeljusti u koje se stavlja uzorak

Osi uzorka i preše moraju biti usklađene. Uzorak se stavlja između dvije čeljusti i centrira ispod uređaja za prijenos opterećenja i potisnog klipa preše (slika 6-7).
Opterećenje na uzorak prilikom ispitivanja potrebno je nanositi kontinuirano s konstantnim prirastom opterećenja, tako da se slom dogodi unutar 5 do 10 sekundi ili tako da vrijednost prirasta opterećenja bude oko 200 N/s (ISRM, 1978).

Maksimalna sila na uzorak mora biti zabilježena u njutnima (kilonjutnima) unutar granica točnosti od 1 %.



Slika 6-7 Indirektno ispitivanje vlačne čvrstoće Brazilskim testom

6.2.3. Obrada i zapis podataka

Vlačna čvrstoća uzorka dobije se iz izraza:

$$\sigma_{IVC} = \frac{2P}{\pi Dt} = 0.636\ \frac{P}{Dt}\ \text{(MPa)} \qquad (6\text{-}3)$$

gdje je:

σ_{IVC}- indirektna vlačna čvrstoća (MPa)

P – maksimalna sila kod koje nastupa slom (N),

D – promjer uzorka (m).

t – debljina uzorka mjerena kroz središte (m)

Kao mjerna jedinica za naprezanje i čvrstoću koristi se Pa (paskal) ili najčešće MPa (mega paskal).

Svi potrebni podaci o uzorku (karakteristike uzorka, dimenzije, tijek ispitivanja, vrijednosti mjerenja) kao i rezultati nakon obrade upisuju se u obrazac Zapisa ispitivanja indirektne vlačne čvrstoće Brazilskim testom.

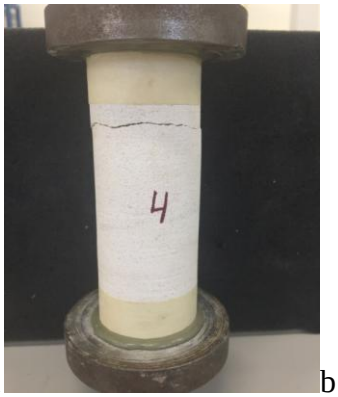
U prilogu br. 2 nalazi se primjerak obrasca za indirektnu vlačnu čvrstoću Brazilskim testom, preuzetog iz skripte „Upute i predlošci za laboratorijske vježbe i programe iz mehanike stijena“, autora Hrženjak, P i Briševac, Z.

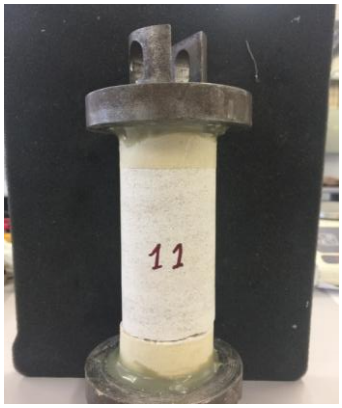
7. PRIKAZ I USPOREDBA REZULTATA ISPITIVANJA

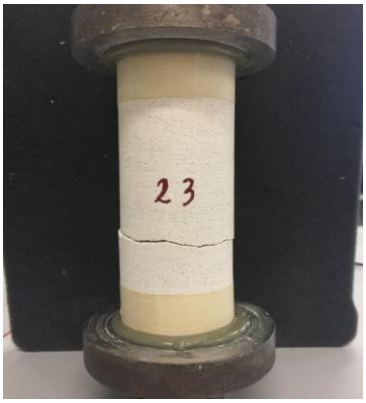
Kao što je već rečeno, provedeno je ispitivanje na uzorku stijene (oolitski vapnenac), na dva različita načina – direktnom i indirektnom metodom ispitivanja vlačne čvrstoće.
Za svaki tip ispitivanja unaprijed je pripremljeno po 30 uzoraka iste stijene. Uzorci i tijek ispitivanja izvedeni su prema već postojećoj i ranije navedenoj normi.

7.1. Prikaz rezultata direktne vlačne čvrstoće

Za ispitivanje direktne vlačne čvrstoće koriste se uzorci u obliku cilindra, promjera 54 mm i visine 110 mm.
Prilikom ispitivanja direktne vlačne čvrstoće, slom uzorka uglavnom je bio na dnu ili na vrhu uzorka, a rjeđe u sredini, gdje bi se u pravilu trebao pojaviti (slika 7-1). Bez obzira na to što se lom nije pojavio u sredini, oni su i dalje ispravni, ukoliko njihovi rezultati ne odskaču previše jedni od drugih.
Vapnenci su slojevite stijene, pa tako i kod ovih uzoraka dolazi do izražaja svojstvo laminacije, koja igra veliku ulogu u ispitivanju čvrstoće, jer se uzorak lomi na lamini koja je najslabija. Pretpostavka je da se uzorak uglavnom lomi na krajevima zbog smjera rezanja i načina pripreme uzorka.

a 

b 

c 

Slika 7-1 Slike uzoraka na kojima se vidi mjesto loma uslijed maksimalne sile; a) lom pri vrhu uzorka, b) lom pri dnu uzorka, c) lom približno oko sredine uzorka

U tablici 7-1 su prikazani rezultati ispitivanja direktne vlačne čvrstoće. Tablica sadrži broj uzorka, silu pri kojoj se dogodio slom (P) te izračunatu vlačnu čvrstoću (σ), dok su u

tablici 7-2 izračunate srednja vrijednost, standardna devijacija i varijanca, prema ranije navedenim formulama (4-1, 4-2, 4-3).

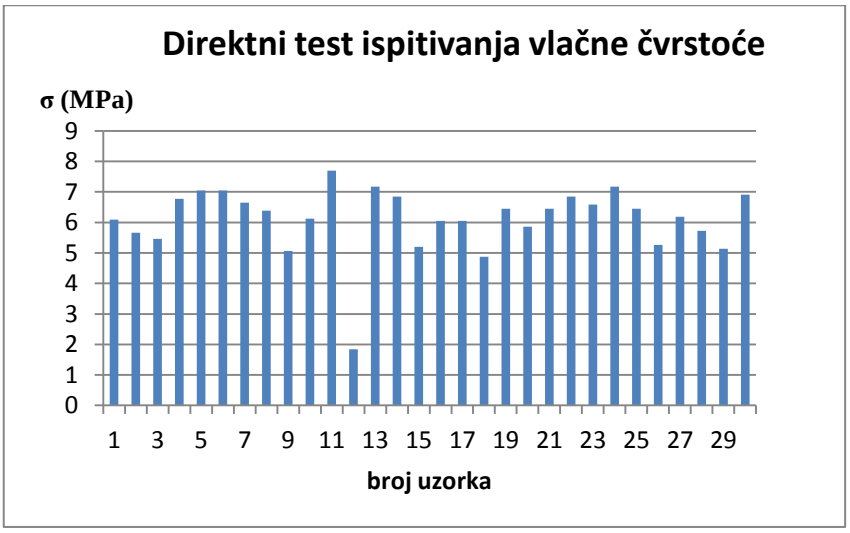
Tablica 7-1 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće direktnom metodom

No	P(kN)	σ (MPa)
1	9,26	6,092907
2	8,6	5,658639
3	8,3	5,461245
4	10,3	6,777208
5	10,7	7,0404
6	10,7	7,0404
7	10,1	6,645611
8	9,7	6,382419
9	7,7	5,066456
10	9,3	6,119226
11	11,7	7,698381
12	2,8	1,842348
13	10,9	7,171996
14	10,4	6,843006
15	7,9	5,198052
16	9,2	6,053428
17	9,2	6,053428
18	7,4	4,869062
19	9,8	6,448217
20	8,9	5,856034
21	9,8	6,448217
22	10,4	6,843006
23	10	6,579813
24	10,9	7,171996
25	9,8	6,448217
26	8	5,263851
27	9,4	6,185024
28	8,7	5,724437
29	7,8	5,132254
30	10,5	6,908804

Tablica 7-2 Na temelju dobivenih rezultata izračunom su dobivene srednja vrijednost, standardna devijacija i varijanca za direktnu vlačnu čvrstoću

	P(kN)	σ (MPa)
Srednja vrijednost:	9,27200	6,07294
Standardna devijacija	1,61284511	1,068521024
Varijanca	2,690963	1,18249876

Kako bi pregled bio jednostavniji postavljen je dijagram (slika 7-2) sa izračunatim vrijednostima direktne vlačne čvrstoće, iz kojega se vidi da su one približno jednake, uz jedno veće odstupanje gdje je došlo do problema u izvođenju testa.



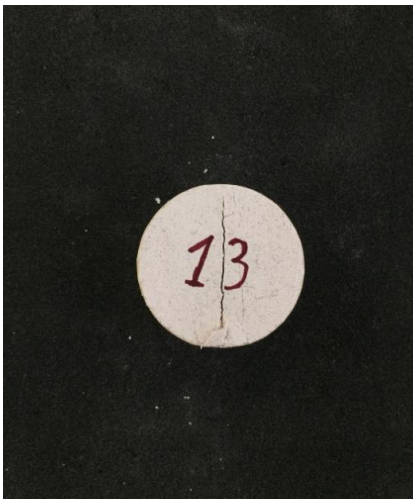
Slika 7-2 Dijagram s rezultatima direktnog testa

7.2. Prikaz rezultata indirektne vlačne čvrstoće (brazilski test)

Brazilski test je metoda ispitivanja vlačne čvrstoće na indirektni način, odnosno primjenom kompresijske sile na uzorak.

Ispitivanje je također provedeno na 30 uzoraka. Uzorci za indirektno ispitivanje vlačne čvrstoće su u obliku diska, promjera 54 mm i širine 20mm.

Do loma na uzorcima došlo je nakon 5-10 sekundi, a lom je uvijek bio okomito u sredini uzorka (slika 7-3)

a)  b) 

Slika 7-3 Lom uzorka u čeljustima (a) i izvan njih (b) – lom je okomit

U tablici 7-3 prikazani su rezultati ispitivanja gdje se vidi koja je maksimalna sila tj. sila sloma (P) i izračunata je vlačna čvrstoća uzorka (σ), dok su u tablici 7-4 izračunate srednja vrijednost, standardna devijacija i varijanca.

Tablica 7-3 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće Brazilskim testom

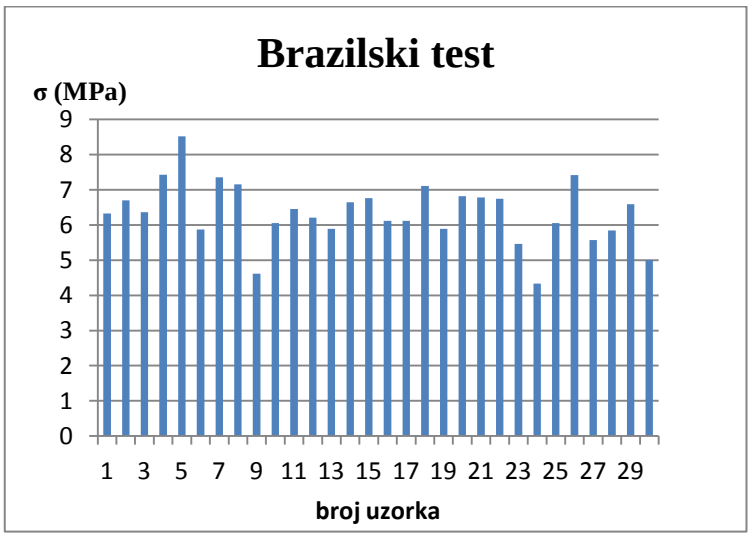
No	P (kN)	σ (MPa)
1	8,95	6,324667
2	9,48	6,6992
3	9,01	6,367067
4	10,51	7,427067
5	12,06	8,5224
6	8,31	5,8724
7	10,41	7,3564
8	10,13	7,158533
9	6,53	4,614533
10	8,57	6,056133
11	9,13	6,451867
12	8,78	6,204533
13	8,34	5,8936
14	9,4	6,642667
15	9,57	6,7628
16	8,66	6,119733
17	8,65	6,112667

18	10,06	7,109067
19	8,34	5,8936
20	9,65	6,819333
21	9,6	6,784
22	9,55	6,748667
23	7,73	5,462533
24	6,13	4,331867
25	8,56	6,049067
26	10,5	7,42
27	7,88	5,568533
28	8,27	5,844133
29	9,32	6,586133
30	7,09	5,010267

Tablica 7-4 Na temelju dobivenih rezultata izračunom su dobivene srednja vrijednost, standardna devijacija i varijanca za indirektnu vlačnu čvrstoću

	P (kN)	σ (MPa)
Srednja vrijednost	8,972333	6,340449
Standardna devijacija	1,205265	0,837871
Varijanca	1,452665	0,702027

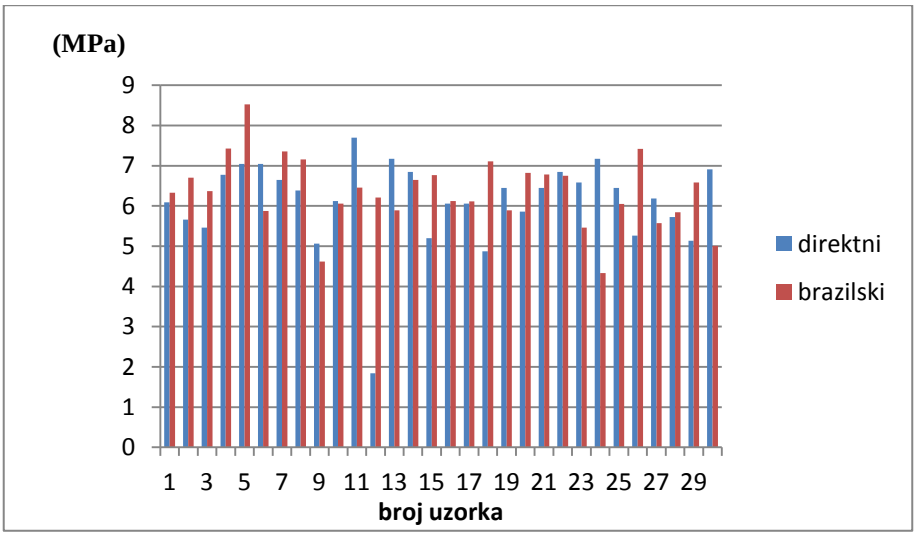
Kako bi pregled bio jednostavniji napravljen je dijagram (slika 7-4), na kojem se vidi da su sve vrijednosti vlačne čvrstoće približno jednake, sa ponekim odstupanjima.



Slika 7-4 Dijagram s rezultatima ispitivanja Brazilskim testom

7.3. Usporedba rezultata direktne i indirektne vlačne čvrstoće

Ako se usporede rezultati ispitivanja direktne i indirektne vlačne čvrstoće, vidi se da se oni relativno dobro poklapaju, što se može vidjeti i na dijagramu (slika 7-5) u nastavku.



Slika 7-5 Dijagram usporedbe rezultata naprezanja direktnim i indirektnim testom

Ako se brojčano usporede srednje vrijednosti vlačne čvrstoće direktnog i brazilskog testa (tablica 7-5), vidi se da one ne odudaraju jedna od druge, tj. da daju gotovo jednake rezultate. Omjer srednje vrijednosti indirektne i direktne vlačne čvrstoće iznosi 1,044. Ovaj rezultat ukazuje na relativno dobro poklapanje rezultata, a poznato je da se Brazilskim testom dobivaju nešto veće vrijednosti vlačne čvrstoće, čak i do 10% (tablica 6-1).

Tablica 7-5 Usporedba rezultata direktnog i indirektnog ispitivanja vlačne čvrstoće

σ_{DVC}	σ_{IVC}	$\sigma_{IVC} / \sigma_{DVC}$
6,073	6,345	1,044

8. ZAKLJUČAK

Određivanje vlačne čvrstoće materijala može se provesti direktnim i indirektnim postupkom. Zbog jednostavnosti postupka, ispitivanje vlačne čvrstoće najčešće se provodi indirektno pomoću Brazilskog testa. Pojam indirektno naprezanje podrazumijeva da se za opterećenje primjenjuje kompresija.

Brazilski test je vrlo istražena metoda, mnogi znanstvenici su je istraživali i objavljen je veliki broj članaka na tu temu, međutim, još uvijek nije pronađen jedinstven način proračuna čvrstoće, te se ne slažu svi oko njegove točnosti.

Iako se vidi da ispitivanje uzoraka brazilskim testom dobro procjenjuje čvrstoću, tj. dobiju se gotovo jednaki rezultati vlačne čvrstoće direktnim i indirektnim testom, to ipak nije slučaj i sa ostalim materijalima (što se može vidjeti u tablici 6-1 u tekstu). U ovom slučaju, uzorci su bili od oolitskog vapnenca, koji je izrazito homogen (kada su fizikalna svojstva i sastav u svim točkama jednaki) i izotropan (kada su mehanička svojstva u svim smjerovima jednaka), što je omogućilo da se dobiju ovakvi rezultati.

.

Točnost rezultata ispitivanja ovisi isključivo o svojstvima materijala koji se ispituju, i svako indirektno ispitivanje neće uvijek dati iste rezultate kao i direktno ispitivanje vlačne čvrstoće.

9. LITERATURA

ISRM, 1974, Suggested method for laboratory determination of direct shear strength.

ISRM, 1975, Recommendations on Site Investigation Techniques

ISRM, 1978, Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock mass

ASTM D 5607-02, 2002, Standard test method for performing laboratory direct shear strength tests of rock specimens under constant normal force

ASTM D 4543, 2004, Standard Practice for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerances; Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

ASTM D2936, 2004, Standard Test Method for Direct Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens; Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

ASTM D3967, 2005, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens; Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

ASTM E4, 2009, Standard Practices for Force Verification of Testing Machines

BRIŠEVAC, Z, KUJUNDŽIĆ, T, ČAJIĆ S. (2015), Sadašnje spoznaje o ispitivanju vlačne čvrstoće stijena uporabom brazilskoga testa; Rudarsko-geološko-naftni zbornik,Vol 30, br. 2, str. 101-128.

BRIŠEVAC, Z. (2012), Model međuovisnosti fizikalno-mehaničkih značajki karbonatnih stijena, Doktorski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, str. 318.

HRŽENJAK, P., BRIŠEVAC, Z . (2009), Upute i predlošci za laboratorijske vježbe i programe iz mehanike stijena; Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb

HRŽENJAK, P (2009), prezentacije: Mehanika stijena; Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb

HOEK E. (1964), Fracture of anisotropic rock. J S Afr Inst Min Metall, Vol 64, br. 10, str. 501‑518.

FAIRBAIRN, E.M.R, ULM, F-J (2002), A Tribute to Femando L.L.B. Carneiro (1013-2001) Engineer and Scientist who invented the Brazilian Test; Materials and Structures, Vol. 35, br. 247, str. 195 - 196

KOVAČEVIĆ, M-S (nepoznat datum), Geotehničko inženjerstvo: Laboratorijski istražni radovi ; Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb

DUGONJIĆ-JOVANČEVIĆ, S (nepoznat datum), Inženjerska mehanika stijena ; Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka

VRKLJAN, I., (2013), Inženjerska mehanika stijena; Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka

PAULA ALEXANDRA SÁ DA SILVA GONÇALVES (2014), Characterization of organic facies and identification of potential source rocks in Jurassic sedimentary sequences of the Lusitanian Basin (Portugal) ; Universidade do Porto, Faculdade de Ciências, Porto

P. A. GONÇALVES, J. G. MENDONÇA FILHO, J. O. MENDONÇA, D. FLORES (2014), The presence of zooclasts and zoomorphs in the carbonate Candeeiros formation (Arruda sub-basin, Lusitanian Basin, Portugal): paleoenvironmental evidence ; Universidade do Porto, Faculdade de Ciências, Porto

RAMLI NAZIR, EHSAN MOMENI, DANIAL JAHED ARMAGHANI (2013), Correlation Between Unconfined Compressive Strength and Indirect Tensile Strength of Limestone Rock Samples; Universiti Teknologi Malaysia, Faculty of Civil Engineering, Malaysia

WEB

BERNIE GORSKI, BLAIN CONLON (2007) - Determination of the direct and indirect tensile strength on cores from borehole KFM01D; http://www.skb.se/upload/publications/pdf/P-07-76.pdf (Srpanj, 2016)

PRILOZI

Prilog 1 Zapis ispitivanja indirektne vlačne čvrstoće Brazilskim testom (Hrženjak i Briševac, 2009)

ZAPIS ISPITIVANJA INDIREKTNE VLAČNE ČVRSTOĆE BRAZILSKIM TESTOM

(ISRM Suggested method for determining indirect tensile strength by the Brazil test, Part 2, 1978.)

Laboratorijska oznaka		Datum zaprimanja	

Litološki opis materijala, karakteristike uzorka i pripreme

Uzorkovanje proveo		Datum lab. uzorkovanja	

Debljina t (mm)	Promjer d_1 (mm)	Promjer d_2 (mm)	Masa M (g)
Volumen V			(mm^3)

Tijek ispitivanja

Sila sloma F		

Vrijeme trajanja		(s)	Skica loma
Zadani prirast naprezanja		(N/s)	
Ispitni uređaji i oprema			
Model sloma			

Napomene uz eventualna odstupanja postupka ispitivanja od zahtjeva preporuka

Gustoća ρ		(kg/m^3)
Vlačna čvrstoća σ_t		(MPa)

Ispitivanje proveo		Kontrolu proveo	
(datum)	(potpis)	(datum)	(potpis)

Prilog 2 Zapis ispitivanja direktne vlačne čvrstoće (IST, Lisabon)

TÉCNICO LISBOA

CERENA - LABORATÓRIO DE GEOMECÂNICA

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIRECTA

DIRECT TENSILE STRENGTH TEST

Aparato (*apparatus*):	Diâmetro (*Diameter*):
Data (*Date*):	Comprimento (*Length*):
Descrição da amostra (*Sample description*)l:	
Ref. Amostra (*Sample Ref.*):	Área (*Area*):
Observações (*Notes*):	

Referência (*Reference*)	F_{max} (kN)	σ_t (MPa)

Executado por (*Executed by*): _____ FOLHA N.º (SHEET NO.):___ of ___