

Primljen / Received: 4.11.2019.

Ispravljen / Corrected: 31.3.2020.

Prihvaćen / Accepted: 18.5.2020.

Dostupno online / Available online: 10.4.2022.

# Eksperimentalna ocjena učinkovitosti prijenosa opterećenja na betonskim kolnicima bez moždanika

## Autori:

Doc.dr.sc. **Mauricio Pradena**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Concepción, Čile

Građevinski fakultet

[mpradena@udec.cl](mailto:mpradena@udec.cl)

Autor za korespondenciju

Izv.prof.dr.sc. **Lambert Houben**, dipl.ing.građ.

Tehničko sveučilište u Delftu, Nizozemska

Odjel za kolničke konstrukcije

[L.J.M.Houben@tudelft.nl](mailto:L.J.M.Houben@tudelft.nl)**Andrés César**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Concepción, Čile

Građevinski fakultet

[acesar@udec.cl](mailto:acesar@udec.cl)

Prethodno priopćenje

**Mauricio Pradena, Lambert Houben, Andrés César**

## Eksperimentalna ocjena učinkovitosti prijenosa opterećenja na betonskim kolnicima bez moždanika

Ponašanje spojeva u betonskim kolnicima u laboratorijskim se uvjetima uglavnom ocjenjuje nanošenjem dinamičkih opterećenja za koje je potreban zahtjevan postav eksperimenta. Predlaže se pojednostavljeno laboratorijsko ispitivanje, te se u tom kontekstu daje opsežan pregled literature o osnovama prijenosa opterećenja na razdjelnicama. Učinkovitost prijenosa opterećenja uspoređuje se u statičkim i u dinamičkim okolnostima primjenom pokusa u umanjenom mjerilu. Rezultati potvrđuju prikladnost primjene statičke analize u umanjenom mjerilu za ocjenu učinkovitosti prijenosa opterećenja na betonskim kolnicima bez moždanika.

### Ključne riječi:

betonski kolnici, prienos opterećenja, laboratorijsko ispitivanje, uklještenje agregata, širina pukotine, dinamička opterećenja, statičko ispitivanje, kratke ploče

Research Paper

**Mauricio Pradena, Lambert Houben, Andrés César**

## Experimental evaluation of load transfer efficiency of non-dowelled concrete pavements

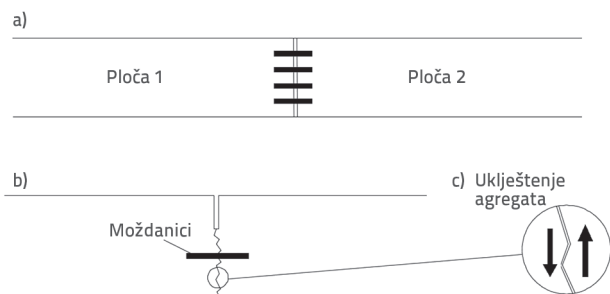
Generally, joint performance in concrete pavements is evaluated in laboratory by applying dynamic loads that require large scale experimental setups. In order to propose a simplified laboratory test, a comprehensive literary review of the fundamentals of load transfer at joints is made, and the load transfer efficiency obtained via a reduced scale test is compared under static and dynamic conditions. The results confirm feasibility of static analysis via a reduced scale test for evaluating load transfer efficiency of non-dowelled concrete pavements.

### Key words:

concrete pavements, load transfer, laboratory test, aggregate interlock, crack width, dynamic loads, static test, short slabs

## 1. Uvod

Dilatirani betonski kolnici (eng. *Jointed Plain Concrete Pavements - JPCP*) tradicionalan su oblik betonskih kolnika. Ti se kolnici sastoje od nearmiranih betonskih ploča s poprečnim kontrakcijskim razdjelnicama između ploča. Raspored tih razdjelnica definira se tako da razmak između njih ne omogućava stvaranje pukotina u pločama i to u što dužem razdoblju tijekom trajanja kolnika [1]. Kada se na temeljnu ploču nanese opterećenje djelovanjem kotača vozila, javljaju se elastična naprezanja i opterećenje se prenosi kroz temelje. Međutim, odziv tih konačnih ploča kontroliraju diskontinuiteti prisutni na rubovima ili spojevima [2]. Prijenos opterećenja preko kontrakcijskih razdjelnica od velike je važnosti za učinkovitost kolnika JPCP [1]. Taj prijenos opterećenja preko spojeva može se ostvariti na dva načina: pomoću moždanika ili ukliještenjem agregata (slika 1.) [3]. U prvom slučaju, mehanizam prijenosa opterećenja gotovo u potpunosti ovisi o posmičnoj čvrstoći svake pojedine šipke (moždanika). S druge strane, ukliještenjem agregata opterećenje se prenosi preko posmičnih sila koje nastaju zbog mehaničke interakcije čestica agregata na pukotinama ispod razdjelnica kolnika (slika 1.c). Zato je kod kolnika koji nisu učvršćeni moždanicima ukliještenje agregata osnovni mehanizam prijenosa opterećenja na poprečnim razdjelnicama [4], gdje širina pukotine (eng. *Crack Width - CW*) ispod razdjelnica izravno djeluje na sposobnost prenošenja opterećenja s jedne ploče na drugu, tj. na učinkovitost prijenosa opterećenja (eng. *Load Transfer Efficiency - LTE*) [5-8].



Slika 1. Prikaz prijenosa opterećenja u dilatiranim betonskim kolnicima: a) tlocrtni presjek dionice kolnika; b) presjek na razdjelnici između ploča; c) mehanizam ukliještenja agregata

Vrijednost LTE koristi se kao ulazni parametar u mehaničkim metodama za projektiranje betonskih kolnika [9-13]. Međutim, u tim je metodama LTE fiksna vrijednost (ili vrijednosti) definirana na temelju posrednih pokazatelja, tj. bez uzimanja u obzir vrijednosti CW.

Osim toga, eksperimentalna analiza LTE tradicionalno se provodi na terenu ili u okviru velikih laboratorijskih ispitivanja (slika 2.) [14-18]. Za takve eksperimentalne ocjene vrijednosti LTE potrebni su poprični resursi, koji nisu uvijek dostupni.

U ovom se radu prikazuje praktično laboratorijsko ispitivanje koje se provodi radi ocjenjivanja vrijednosti LTE za kolnike od običnog betona koji nisu povezani moždanicima, s naglaskom na primjeni kratkih betonskih ploča. Svrha prijedloga je omogućiti

eksperimentalno ocjenjivanje vrijednosti LTE u laboratorijima za ispitivanje betona pomoću tradicionalne opreme. To može doprinijeti boljem definiranju vrijednosti LTE u okviru primjene metoda za projektiranje kolnika. Ovaj prijedlog temelji se na analizi mehanizma LTE, na postojećim metodama za ocjenjivanje tog parametra te na usporedbi terenskih i laboratorijskih rezultata dobivenih ocjenjivanjem vrijednosti LTE pomoću predloženog ispitivanja.



Slika 2. Postav ispitivanja u velikom mjerilu za ocjenu učinkovitosti prijenosa opterećenja [19]

## 2. Prijenos opterećenja u betonskim kolnicima

### 2.1. Učinkovitost prijenosa opterećenja

Kada se u kolnicima tipa JPCP opterećenje nanese u blizini spoja, to dovodi do određenog progiba na opterećenoj ploči i na susjednoj neopterećenoj ploči. Vrijednost progiba ovisi o sposobnosti razdjelnice da prenese dio opterećenja na obje ploče [20]. Dakle, učinkovitost kolnika tijekom uporabe ovisi o vrijednosti LTE na razdjelnicama. Utvrđeno je da nepovoljna vrijednost LTE može uzrokovati rano propadanje kolnika [21]. Vrijednost LTE kvantificira se kroz bezdimenzijske kombinacije progiba ili naprezanja pri savijanju [22]. Učinkovitost prijenosa opterećenja pri progibu ( $LTE_{\delta}$ ), koja se često označava kao LTE, izraz (1), i učinkovitost prijenosa opterećenja pri naprezanju ( $LTE_{\sigma}$ ), izraz (2), definiraju se kao:

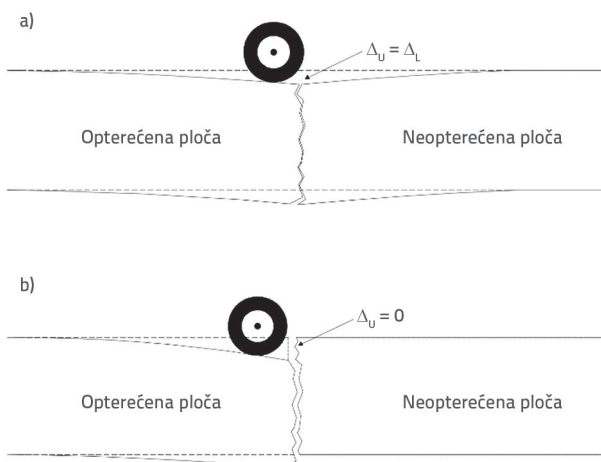
$$LTE_{\delta} = \frac{\Delta_U}{\Delta_L} \quad (1)$$

$$LTE_{\sigma} = \frac{\sigma_U}{\sigma_L} \quad (2)$$

gdje su  $\Delta_U$  i  $\sigma_U$  progib i naprezanje neopterećene ploče, a  $\Delta_L$  i  $\sigma_L$  su progib i naprezanje opterećene ploče.

Ipak treba napomenuti da se proračuni progiba LTE često primjenjuju za mjerenje prijenosa opterećenja u betonskim

kolnicima [23], pa se stoga ta vrijednost i razmatra u ovom radu. Kada LTE iznosi 100 %, radi se o idealnom stanju u kojem obje strane spoja jednako sudjeluju u opterećenju, dok LTE od 0 % označava najgore stanje u kojem nema prijenosa opterećenja s opterećene na neopterećenu stranu (slika 3.) [24]. Općenito uzevši, vrijednost LTE od 70 % prihvaća se kao vrijednost koja osigurava prikladnu učinkovitost kolnika JPCP u uvjetima korištenja [20, 25, 26].



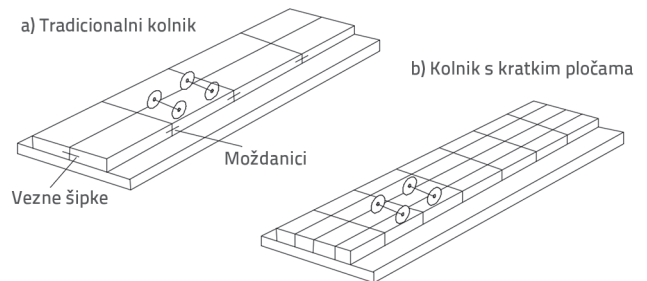
Slika 3. Prikaz učinkovitosti spoja: a) dobar prijenos opterećenja (LTE = 100 %); b) loš prijenos opterećenja (LTE = 0)

## 2.2. Mehanizam prijenosa opterećenja na kolnicima JPCP bez moždanika

Kada se moždanici ne koriste, osnovni mehanizam je prijenos opterećenja uklještenjem agregata [4, 17]. Prijenos opterećenja uklještenjem agregata uglavnom se primjenjuje na kolnicima cesta s niskim prometnim opterećenjem [1, 22, 27, 28]. Međutim, u nekim se područjima taj mehanizam (bez primjene moždanika) pokazao učinkovit čak i u zahtjevnijim uvjetima, te postao i uobičajena praksa, kao što je to slučaj npr. u Čileu [16, 29].

Osim toga, razvijaju se nove tehnologije izrade kolnika u kojima važnu ulogu ima prijenos opterećenja uklještenjem agregata. Takav je slučaj npr. rješenje koje uključuje izvedbu kratkih betonskih ploča [18, 29-33]. Kolnik s kratkim pločama je patentirana metoda projektiranja [30, 31] koja uključuje smanjenje dimenzije ploča ovisno o prometnom opterećenju, tako da samo jedan par kotača opterećuje ploču (slika 4.). Osim inovativne konfiguracije prometnog opterećenja, pogodnost je i manja dužina ploče koja bi se mogla saviti. Na taj je način smanjeno vlačno naprezanje i naprezanje uslijed savijanja. Uz to, standardna metoda projektiranja ne uključuje mehanizam prijenosa opterećenja pomoću moždanika [31, 34]. Dakle, prijenos opterećenja uglavnom se odvija uklještenjem agregata. U tom su smislu Roesler i dr. [18] potvrdili da se odgovarajuća razina LTE može održati primjenom kratkih ploča. Međutim, u tom istraživanju nije uspostavljena izravna veza između vrijednosti LTE i mehanizma koji djeluje u tom sustavu, tj.

uklještenjem agregata. U vezi s tim pitanjem, tijekom definiranja mehaničko empirijske metode za projektiranje kolnika, Salsilli i dr. [29] upozorili su na potrebu za izradom posebnih studija u kojima bi naglasak bio na istraživanju vrijednosti LTE za ovu inovaciju kolničke konstrukcije.



Slika 4. Raspodjela osovinskog opterećenja: a) tradicionalni kolnik; b) kolnik s kratkim pločama

U betonskim kolnicima bez moždanika (tradicionalnog tipa ili s kratkim pločama), definiranje vrijednosti LTE pomoću uklještenja agregata temelji se na nepravilnostima na površini pukotina. Naime, kada se pukotina otvori u spoju betonskog kolnika, površina pukotine postaje hrapava i nepravilna zbog utjecaja agregata i nepravilne teksture cementne matrice [35].

Kada se kotač približi pukotini, dolazi do diferencijalnog vertikalnog pomaka dviju ploča, pa tako čestice s jedne strane pukotine dolaze u kontakt s česticama s druge strane [35, 36]. Stoga se može reći da je prijenos opterećenja uklještenjem agregata čisti posmični mehanizam [21] koji unosi kontinuitet u kolnik i eliminira izolirano djelovanje ploča (slika 1.c).

Bez obzira na znatan utjecaj uklještenja agregata na učinkovitost kolnika, do sada je proveden tek manji broj istraživanja u ovom području. Jedno od prvih istraživanja te vrste proveli su Colley i Humphrey [14]. Oni su razvili ispitni uređaj za nanošenje opetovanih opterećenja i to na način koji omogućuje vjernu simulaciju kretanja vozila preko razdjelnice. Na temelju tog ispitivanja, uočene su varijacije vrijednosti LTE u odnosu na širinu razdjelnice, debljinu ploče, vrstu temelja, vrstu i oblik agregata, jačinu opterećenja te broj ponavljanja opterećenja. Metodologija i rezultati tog ispitivanja smatraju se realnom osnovom za buduća istraživanja [37-39].

Jensen i Hansen [15] istraživali su 2001. godine odnos LTE-CW na dvije vrste reprezentativnih američkih agregata (glacijalni šljunak i vapnenac). Oni na kraju svog rada zaključuju da bi se mogle razlikovati tri razine učinkovitosti. Na prvoj CW iznosi do 0,5 mm za vrijednost LTE od otprilike 100 %. Na drugoj razini CW varira od 0,6 mm do 2,5 mm, a uklještenje agregata je dominantan mehanizam prijenosa opterećenja. I konačno, kada je vrijednost CW veća od 2,5 mm, više nema praktične interakcije između agregata te se prijenos opterećenja treba osigurati pomoću nekog drugog sustava.

Prema navodima nekih autora, postupno smanjenje vrijednosti LTE s povećanjem CW može se smatrati tipičnim trendom [20, 21, 39, 40]. Međutim, u Južnoj Africi su Hanekom i dr. [4]

usporedili vrijednost LTE dobivenu laboratorijskim ispitivanjima na ploči s rezultatima koje su postigli Jensen i Hansen [15] te s modelom konačnih elemenata EverFE koji je potvrđen podacima koje su dobili Colley i Humphrey [14]. Rezultati su pokazali da je prijenos opterećenja ostvaren u južnoafričkom slučaju bitno viši u usporedbi s američkim agregatom i programom EverFE. Osim toga, južnoafričke vrijednosti upućuju na posebno ponašanje u kojem, s početnim povećanjem CW, vrijednost LTE pada do točke u kojoj je smanjenje reducirano, što upućuje na gotovo asimptotsko ponašanje s povećanjem CW.

O sličnom ponašanju izvjestili su Pradena i Houben [42] nakon analize ponašanja na probnim dionicama kratkih ploča u Čileu. Objašnjavajući takvo ponašanje, autori navode da je visoka kvaliteta agregata korištenih u ispitivanju doprinijela poboljšanju odnosa LTE-CW. Kod tvrdih agregata cementna matrica najslabija je komponenta u sustavu. Stoga se pukotina otvara kroz matricu ali po obodu čestica agregata [6]. Činjenica je da su Hanekom i dr. [4] koristili agregate koji su bitno kvalitetniji od onih koje su koristili Jensen i Hansen [15]. Iako se tu radilo o najmekšem južnoafričkom agregatu (modul elastičnosti = 29 GPa), taj je agregat ipak bolji od najtvrdog američkog agregata (modul elastičnosti = 24 GPa).

### 2.3. Usporedba dinamičkog i statičkog određivanja vrijednosti LTE

Wadkar i dr. [20] računali su vrijednost LTEs pri dinamičkom opterećenju. Dobiveni rezultati uspoređeni su s vrijednošću LTEs pri statičkom opterećenju. Pritom je primjenjen dvodimenzionalni program konačnih elemenata JSLAB 2002, te terenska mjerenja progiba pomoću deflektometra s padajućim teretom eng. *Falling Weight Deflectometer* - FWD). Vrijednosti LTEs dobivene pri statičkom opterećenju bile su u prosjeku za 38 % niže od vrijednosti koje su dobivene pri dinamičkom opterećenju. U stvari, Darestani i dr. [43] također su ustanovili da je vrijednost LTE za poprečne razdjelnice, ostvarena pri dinamičkom opterećenju, nešto viša od vrijednosti dobivenih pri statičkom opterećenju.

Hanekom i dr. [4] i Brink i dr. [38] odredili su u laboratoriju razliku odziva kolnika na statička i dinamička opterećenja u smislu progiba na spoju. Nakon dva milijuna ciklusa dinamičkog opterećenja nisu zabilježena bitna oštećenja na čeonim površinama pukotina, što pokazuje da manja abrazija agregata na površini razdjelnice nije značajna. Hansen je potvrdio to činjenicu kroz nastavna ispitivanja provedena na eksperimentalnim pločama koje su korištene u studiji Jensen i Hansen [15]. Potrebno je napomenuti da je ova karakteristika objavljena unatoč činjenici da su Jensen i Hansen [15] koristili agregate koji su bili bitno slabiji od onih koje su koristili Hanekom i dr. [4].

Uz to, Brink i dr. [38] proveli su ispitivanja statičkog opterećenja na svakih pola milijuna opterećenja, te su dobiveni podaci analizirani kako bi se odredili opći trendovi. U svim je slučajevima vrijednost LTE bila veća pri dinamičkom opterećenju.

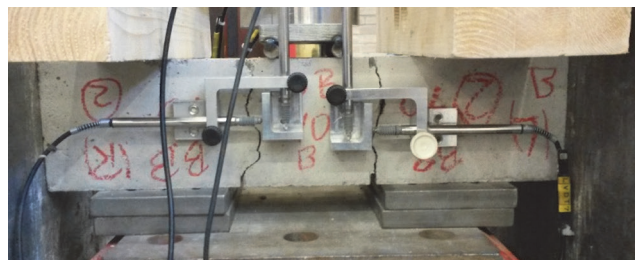
Istražujući metodu kojom bi se definirao praktičan odnos LTE-CW za tradicionalne laboratorije za ispitivanje betona, Pradena

i dr. [45] razvili su ispitivanje za ocjenu ponašanja spoja u umanjenom mjerilu. U prvoj fazi, oni su analizirali vrijednosti LTE na dionicama kratkih ploča u Čileu, te su rezultate usporedili s ispitivanjima statičkog opterećenja (pri čemu su koristili iste one agregate koji su korišteni na probnim dionicama). Vrijednost LTE dobivena tijekom ispitivanja bila je podudarna sa stanjem na terenu. Međutim, zbog kontroliranih uvjeta u laboratoriju, više vrijednosti LTE ipak su dobivene tijekom ispitivanja. Iako Pradena i dr. [45] zaključuju da se na temelju te metode može razviti odnos LTE-CW, još uvijek se treba ocijeniti odziv pri dinamičkom opterećenju.

## 3. Predloženo laboratorijsko ocjenjivanje vrijednosti LTE

### 3.1. Postav ispitivanja

U literaturi su prikazana istraživanja koja su provedena u okviru nastojanja da se razviju metode ispitivanja kojima bi se pojednostavnilo ocjenjivanje učinkovitosti na spoju između ploča [46, 47]. Te se preporuke temelje na korištenju greda čije dimenzije odgovaraju onima koje se koriste za ispitivanje nanošenjem cikličnog opterećenja. Oprema potrebna za provođenje ispitivanja još uvijek je velika prepreka mnogim tradicionalnim laboratorijima za ispitivanje betona, i to uglavnom zbog primjene postupka cikličnog opterećenja. Kako bi se olakšalo eksperimentalno određivanje vrijednosti LTE te premostilo spomenuto ograničenje, razvijen je prijedlog koji se prikazuje u ovom radu. Prijedlog je razvijen tijekom studentskog boravka na Tehničkom sveučilištu u Delftu (TU Delft) u Nizozemskoj, gdje su uspoređeni rezultati LTE za statička i dinamička opterećenja primjenom predloženog laboratorijskog postava. Prema prijedlogu Thompsona [46] i Arnolda i dr. [47], priprema uzorka sastoji se od otvaranja dviju pukotina u gredi i to tako da se dobiju tri sekcije uzorka. Uzorak se postavlja u okvir za nanošenje opterećenja, a prostor između sekcija prilagođava se za analiziranu vrijednost CW. Nakon toga se s bočnih sekcija skidaju drveni potporni blokovi na gornjim stranama, pa je kod nanošenja opterećenja omogućeno pomicanje metalnih ploča na bočnim stranama sa središnjim blokom od 100 mm (slika 5.).



Slika 5. Postav eksperimenta

Ovakav postav generira diferencijal opterećenja između dviju strana pukotina, što dovodi do dvostrukog posmičnog

naprezanja pa se tako smanjuje mogućnost rotacije [46, 47]. U vezi s ovim ispitivanjem u umanjenom mjerilu, Pradena i dr. [45] utvrdili su da nanošenje opterećenja od 4 kN u središnjem dijelu uzrokuje naprezanje od 250 kPa, što odgovara posmičnom naprezanju na stvarnom kolniku JPCP pri nanošenju opterećenja standardne osovine od 80 kN (40 kN po kotaču).

Osim toga, Pradena i dr. [45] predlažu izraz (3) za određivanje vrijednosti LTE pomoću vertikalnog relativnog pomaka (RM) zabilježenog pomoću linearno varijabilnih diferencijalnih transformatora (LVDT) postavljenih vertikalno na obje strane grede.

$$LTE = \frac{100 - 100RM}{1 + RM} \quad (3)$$

Mehanizam uklještenja agregata aktivira se interakcijom između ploha pukotina, koje su po svojoj prirodi nepravilne. Stoga, zbog suštinske nepravilnosti mehanizma, moguće su manje varijacije između rezultata dobivenih ispitivanjem uzoraka. Iz tog se razloga mogu uočiti određene varijacije povezane s tim mehanizmom, i to bez obzira na činjenicu da su eksperimenti provedeni u strogo kontroliranim laboratorijskim uvjetima [45].

Prednost odabrane konfiguracije ispitivanja sastoji se u usvajanju dviju pukotina po gredi; podaci o ponašanju obiju pukotina bilježe se pomoću vertikalnih uređaja LVDT. Osim toga, horizontalno su postavljena po dva uređaja LVDT na svakoj strani kako bi se pratila i vrijednost CW.

Ispitivanje se želi pojednostavniti kako bi se omogućila analiza mehanizma uklještenja agregata na praktičan način, tj. primjenom agregata veličine koja se obično koristi u kolnicima JPCP, a radi se uglavnom o rasponu maksimalnih veličina zrna od 20 mm do 40 mm [13, 48], pri čemu raspon vrijednosti CW treba odgovarati vrijednostima koje se realno mogu očekivati u stvarnim kolnicima tima JPCP. Za poseban slučaj primjene kratkih ploča u kolnicima JPCP, vrijednost CW manja je od 1,5 mm [49], pa je stoga uklještenje agregata dominantan mehanizam prijenosa opterećenja. Ustvari, tijekom prethodnih istraživanja zaključeno je da baza postaje značajan faktor u određivanju LTE samo u slučaju kada vrijednosti CW iznose 2,5 mm ili više [4, 15, 45].

Dodatne informacije o razvoju i postavu ovog ispitivanja mogu se naći u radu Pradena i dr. [45].

### 3.2. Karakterizacija agregata

Dvije vrste čileanskih agregata karakterizirane su na Sveučilištu TU u Delftu. Kako bi se definirala kvaliteta agregata, karakterizacija je provedena pomoću sljedećih ispitivanja: Micro Deval (MD), otpornost agregata na udar (eng. *Aggregate Impact Value* - AIV) i otpornost agregata na drobljenje (eng. *Aggregate Crushed Value* - ACV). Dobiveni rezultati, prikazani u tablici 1., uspoređeni su sa standardnim zahtjevima za korištenje agregata u kolnicima JPCP prema OPSS 1002 [50] za MD te prema BS 882 [51] za AIV i ACV.

Tablica 1. Karakterizacija agregata

Ispitivanja \ Agregat	Agregat 1 [%]	Agregat 2 [%]	Granica specifikacije [%]
Otpornost agregata na udar (AIV)	11	10	30
Otpornost agregata na drobljenje (ACV)	12	11	30
Micro Deval (MD)	11	7	14

Može se uočiti da agregati bez poteškoća udovoljavaju uvjetima koji su zadani u specifikacijama. Ustvari, vrijednost AIV varira u rasponu od 10 do 20 %, što se smatra područjem čvrstih agregata [52].

Čvrstoća agregata može se uočiti i usporedbom rezultata ACV s tipičnim vrijednostima za stijene kao što su bazalt i andezit (kada ACV iznosi 13 % tj. 14 %), a ulaze u kategoriju čvrstih stijena [53].

Osim toga, agregat ima više od 50 % drobljenih čestica, pa tako udovoljava minimalnim zahtjevima za betonske kolnike [48].

## 4. Rezultati LTE, analiza i rasprava

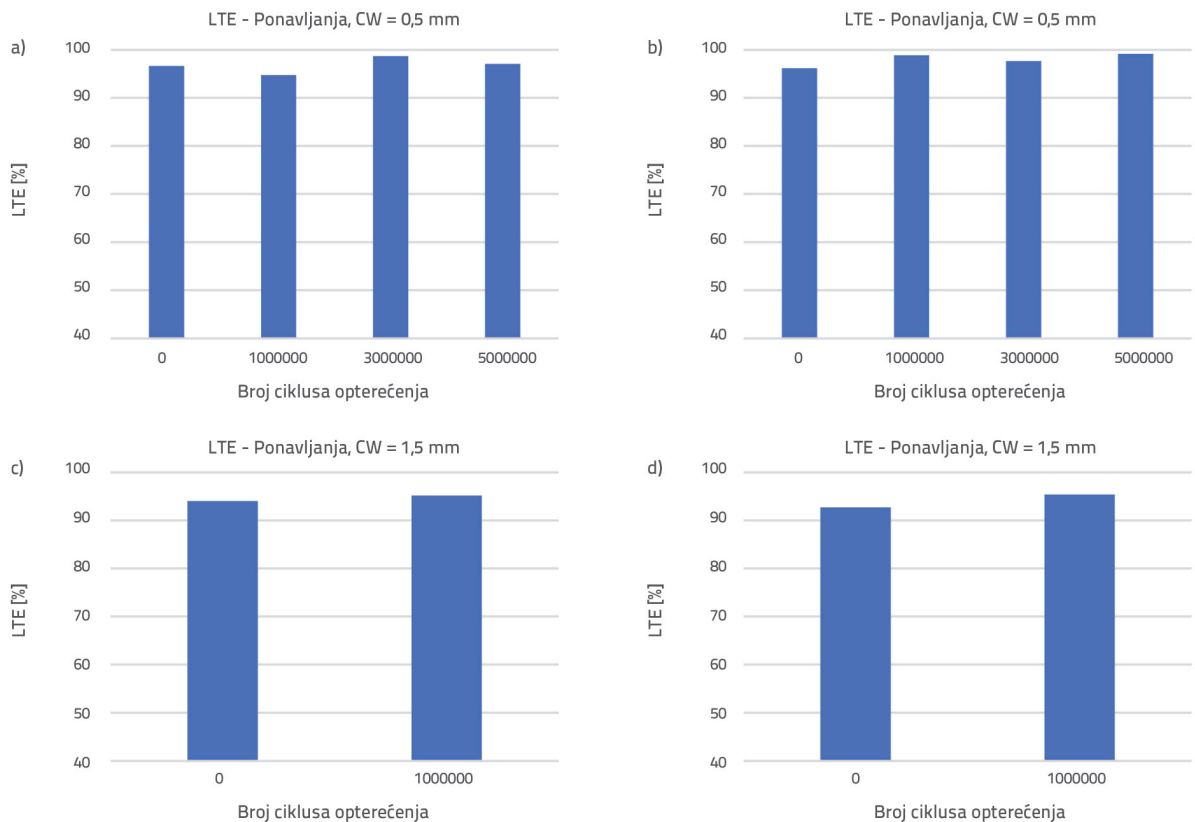
### 4.1. Usporedba dinamičkog i statičkog ispitivanja

U početku se ocjena dinamičkog opterećenja bazirala na milijun ponavljanja opterećenja. Međutim, kako su promjene na uzorku bile neznatne, donesena je odluka o povećanju broja ponavljanja za uvjete bolje interakcije i veće stabilnosti agregata. Zato se opterećenje nanosilo ciklični u pet milijuna ponavljanja za CW = 0,5 mm, tj. u jedan milijun ponavljanja za CW = 1,5 mm.

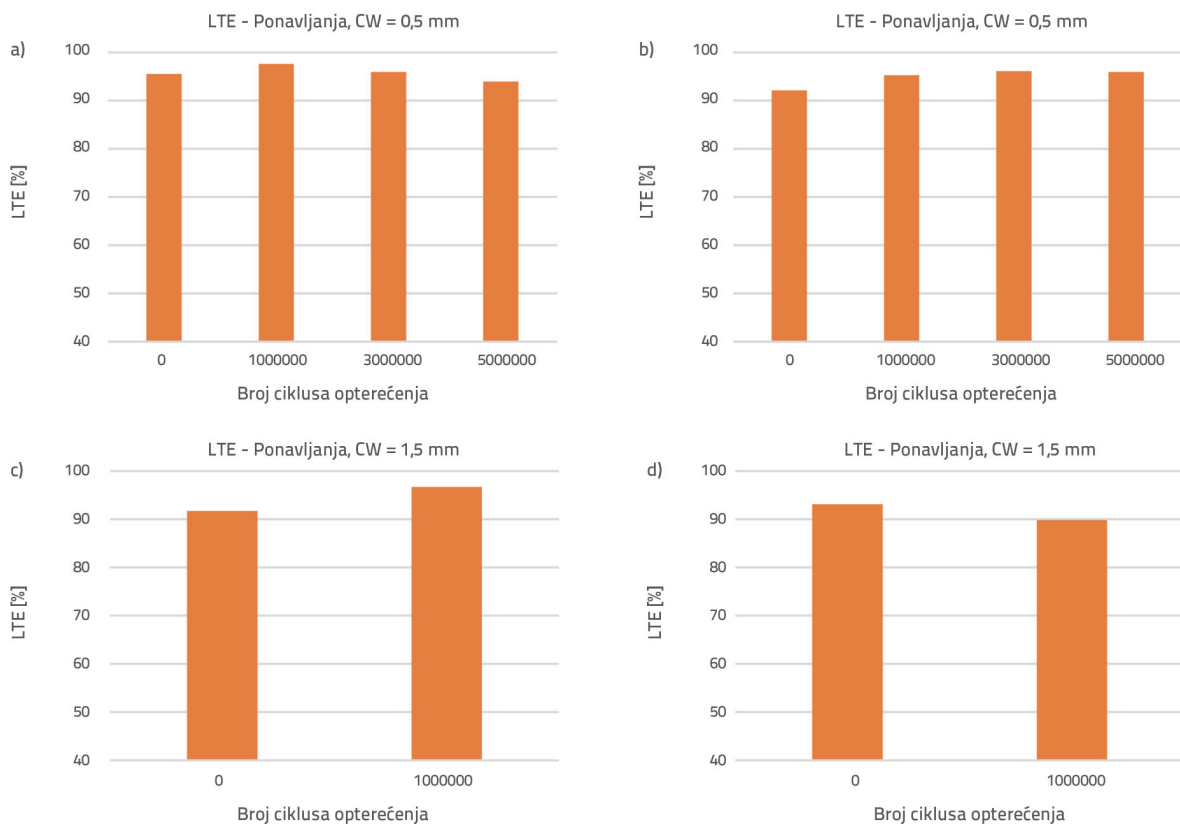
Rezultati dobiveni statičkim i dinamičkim opterećenjem agregata br. 1 pokazuju male razlike. Za grede od 40 mm i za CW = 0,5 mm dinamičkim ispitivanjem dobivene su vrijednosti LTE između 95 i 99 %, tj. dobivena je prosječna vrijednost LTE od 97 %. U statičkom slučaju (bez ponavljanja) dobiven je nešto niži prosjek LTE od 96 % (slika 6.a). Za CW = 1,5 mm, prosječna vrijednost LTE iznosila je za dinamičko ispitivanje 95 %, tj. 94 % za statičko ispitivanje (slika 6.c).

Pri širini pukotine od CW = 0,5 mm, vrijednost LTE varirala je između 97 i 99 % za agregat br. 2 maksimalne veličine zrna od 40 mm. Rezultati pokazuju male varijacije u vrijednosti LTE pri povećanju broja ciklusa. Treba napomenuti da su u nekim slučajevima više vrijednosti LTE dobivene u najzahtjevnijim uvjetima (veći broj ponavljanja) (slika 6.b).

Vrijednosti LTE donekle se smanjuju kada CW iznosi 1,5 mm. Dinamička vrijednost LTE zabilježena za uzorke od 40 mm varira od 94 do 95 %. Statički rezultat je i ovdje niži, s prosječnom vrijednošću LTE od 93 % (slika 6.d). Takvo ponašanje slično je ponašanju agregata maksimalne veličine zrna od 20 mm (slika 7.). Na slikama 6. i 7. može se uočiti da nema velike razlike između dinamičkih rezultata. Kao što zaključuju Brink i dr. [38], rezultati govore da male abrazije na ploham pukotine, uzrokovane



Slika 6. LTE u odnosu na broj ciklusa, maksimalna veličina zrna 40 mm: a) agregat br. 1, CW = 0,5 mm; b) agregat br. 2, CW = 0,5 mm; c) agregat br. 1, CW = 1,5 mm; d) agregat br. 2, CW = 1,5 mm



Slika 7. LTE u odnosu na broj ciklusa, maksimalna veličina zrna 20 mm: a) agregat br. 1, CW = 0,5 mm; b) agregat br. 2, CW = 0,5 mm; c) agregat br. 1, CW = 1,5 mm; d) agregat br. 2, CW = 1,5 mm

dinamičkih opterećenjem, nisu od značajnijeg utjecaja. Rezultati su konstantni kroz cijelo vrijeme trajanja pokusa. Kod dinamičkih je rezultata zabilježeno standardno odstupanje manje od 2,0 %. Veća vrijednost LTE pod dinamičkim opterećenjem u skladu je s rezultatima Hanekoma i dr. [4] i Darestani-ja [43] koji navode da je vrijednost LTE na spojevima nešto viša pod dinamičkim opterećenjem nego u slučaju statičkog opterećenja. I, na kraju, treba naglasiti da i u slučaju dinamičkih i statičkih opterećenja vrijednost LTE uvijek iznosi više od 89 %, s tim da se vrijednost LTE od 70 % prihvaća kao vrijednost koja osigurava odgovarajuće ponašanje kolnika JPCP tijekom uporabe [20, 25, 26].

## 4.2. Rasprava

Predloženo ispitivanje omogućuje definiranje vrijednosti LTE u odnosu na CW, što je izravan uzrok prijenosa opterećenja između ploča u kolnicima JPCP koji nisu pojačani moždanicima [5-8]. Izračun vrijednosti CW za kolnike JPCP može se provesti za razne uvjete pomoću odgovarajućih formula kao što su one koje predlaže Američki savez službenika državnih uprava za ceste i promet (eng. *American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO*) i one sadržane u Priručniku za mehaničko-empirijsko projektiranje kolnika (eng. *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - MEPDG*), ili se pak može primijeniti sustavni pristup poput onoga koji predlažu Pradena i Houben [55]. S obzirom na to da se u sadašnjim metodama za projektiranje kolnika predlažu fiksne vrijednosti LTE koje se uglavnom temelje na posredno definiranim varijablama [9-13], ovaj prijedlog može se smatrati pozitivnim iskorakom u praktičnom definiranju vrijednosti LTE koji bi se u budućnosti mogao uključiti u metode za projektiranje kolnika.

Iako je preporučljivo analizirati ovaj mehanizam pri većem borju ponavljanja, vrijednost LTE kod ukleštenja agregata pokazala se vjerodostojnom u ciklusima koji su ispitani u laboratoriju, a nešto je niža ako se usporedi sa stanjem bez ciklusa (statički slučaj). Dobiveni podaci pokazuju da se nešto konzervativnije vrijednosti dobivaju u analizi ponašanja vrijednosti LTE pod statičkim opterećenjem kod kolnika s niskim do srednjim prometnim opterećenjem.

Izravna primjena moguća je u ocjenjivanju kolnika JPCP s kratkim pločama. Pokazalo se da ti kolnici imaju dostatnu vrijednost LTE bez uređaja za prijenos opterećenja na cestama s niskim do srednjim prometnim opterećenjem [18]. Iako Cervantes i Roesler [54] nisu uspostavili odnose LTE-CW, oni su na probnim dionicama utvrdili da vrijednost LTE ostaje iznad 70 % nakon 57,5 milijuna ekvivalentnih jednoosovinskih opterećenja.

Osim toga, dobar odziv LTE na statičko i dinamičko opterećenje objašnjava se primjenom tvrdog agregata. Tvrdi agregat omogućuje prijelaz preko cementne matrice na rubovima agregata tijekom razvoja pukotine, a to pospješuje ukleštenje agregata [6].

Zbog tog je razloga definiranje odnosa LTE-CW pomoću ispitivanja statičkog opterećenja od posebnog značenja za

slučajeve u kojima se koristi tvrdi agregat. Nadalje, statičko ispitivanje u umanjenom mjerilu omogućava tradicionalnim laboratorijima za ispitivanje betona ocjenjivanje učinkovitosti spojeva u kolnicima JPCP, povezivanjem prijenosa opterećenja s uzrokom koji objašnjava taj mehanizam, tj. sa CW.

Uz to, iako su za meke agregate potrebna detaljnija ispitivanja, preporučuje se primjena tvrdog agregata u kolnicima JPCP bez moždanika, tj. kada se odgovarajuća vrijednost LTE kolnika tijekom uporabe može održati i bez moždanika.

## 5. Zaključak

U ovom se radu predlaže praktično laboratorijsko ispitivanje za ocjenjivanje vrijednosti LTE u kolnicima JPCP bez moždanika. Prijedlog ispitivanja u umanjenom mjerilu temelji se na literaturi o osnovama prijenosa opterećenja ukleštenjem agregata, te na analizi relevantnih metoda.

Rezultati dobiveni predloženim ispitivanjem primjenom dinamičkog opterećenja ne upućuju na uočljive promjene u odzivu LTE. Ova činjenica potvrđuje da abrazija na ploham razdjelnica nije značajna u slučaju srednje jakog opterećenja. Ovo ponašanje objašnjava se tvrdoćom agregata, zbog čega do otvaranja pukotina dolazi samo u cementnoj matrici, što pospješuje ukleštenje agregata.

S druge strane, u slučaju statičkog opterećenja, vrijednost LTE nešto je niža u usporedbi s dinamičkim opterećenjem. Međutim, ponašanje LTE u vezi s CW u oba je slučaja slično. To potvrđuje da je, barem kada se koristi tvrdi agregat, vrijednost LTE dobivena statičkim opterećenjem nešto konzervativnija od dinamičke vrijednosti LTE. To je posebno povoljno za analizu načina za pojednostavljenje ispitivanja koja se sada primjenjuju za ocjenjivanje LTE.

Predloženo statičko ispitivanje omogućuje praktično određivanje vrijednosti LTE u tradicionalnim laboratorijima za ispitivanje betona, čime se izbjegava potreba za uporabom glomazne opreme, velikog prostora i znatnih resursa. Tako se istovremeno omogućuje i određivanje odnosa LTE-CW. Stoga predloženo ispitivanje može doprinijeti definiranju vrijednosti LTE pomoću uzroka koji objašnjava postignutu vrijednost, a ne na temelju posrednih faktora. Ovaj odnos predstavlja bolji način određivanja LTE za potrebe projektiranja kolničkih konstrukcija. Analiza vrijednosti LTE provedena tijekom opisanih ispitivanja pokazuje da se prikladno ponašanje razdjelnica može postići i bez primjene moždanika. Preporučuje se korištenje tvrdih agregata koji osiguravaju postizanje dobrih vrijednosti LTE na kolnicima tijekom uporabe, jer se na taj način štedi vrijeme i umanjuju troškovi građenja. To je naročito uočljivo kada je širina pukotina manja od 1,5 mm, što je slučaj kod primjene kratkih ploča na kolnicima JPCP.

## Zahvala

Za ovaj je rad dobivena potpora REDES 170111 u okviru programa CONICYT.

## LITERATURA

- [1] Delatte, N.: Concrete Pavement Design, Construction, and Performance, First edition, New York, 2008.
- [2] Hammons, M.I., Ioannides, A.M.: Finite element modelling for rigid pavement joints, Report I: Background investigations, Publication DOT/FAA/AR-95/85, Federal Aviation Administration, Washington, DC, 1997.
- [3] Aure, T., Ioannides, A.: Fracture analysis of aggregate interlock jointed slabs-on-grade, *ELSEVIER*, 77 (2015), pp. 340-348.
- [4] Hanekom, A.C., Horak, E., Visser, A.T.: Comparison of South African and American Aggregate Interlock Efficiency at Concrete Pavement Joints, 16<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Conference, Seattle, USA, 2003.
- [5] Nowlen, W.J.: Influence of Aggregate Properties on Effectiveness of Interlock Joints in Concrete Pavement, *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*, 10 (1968) 2, pp. 2-8.
- [6] Walraven, J.C.: Aggregate interlock: a theoretical and experimental analysis. Ph.D, Thesis, Delft University of Technology, the Netherlands, 1980.
- [7] Wattar, S.W.: Aggregate interlock behavior of large crack width concrete joints in PCC airport pavement. Ph.D, Thesis, University of Illinois, USA, 2001.
- [8] IPRF: Joint load transfer in concrete airfield pavements: final report. (Report No. IPRF-01-G-002-05-2). Rosemont, IL: Innovative Pavement Research Foundation, 2011.
- [9] Houben, L.J.M.: Structural design of pavements, part IV: Design of concrete pavements. Lecture notes CT4860, Delft University of Technology, the Netherlands, 2006.
- [10] Stet, M.J.A., Van Leest, A.J., Fréney, J.W.: Dutch Design Tool for Jointed and Continuously Reinforced Concrete Pavements, 10<sup>th</sup> International Symposium on Concrete Roads, Brussels, Belgium, 2006.
- [11] Söderqvist, J.: Design of Concrete Pavement: Design criteria for plain and lean concrete. Bachelor Thesis. KTH Royal Institute of Technology, Sweden, 2006.
- [12] Hiller, J.E.: Development of mechanistic-empirical principles for jointed plain concrete pavement fatigue design. PhD Thesis. University of Illinois, Urbana-Champaign, USA, 2007.
- [13] Chilean Highway Agency: Complement to the Technical Specifications of the Highway Manual Annex N° 1: Design Method for Concrete Pavement with Optimized Thickness Slabs. Ministry of Public Works, Santiago, Chile, 2012 (in Spanish).
- [14] Colley, B.E., Humphrey, H.M.: Aggregate interlock at joints in concrete pavements. *Bulletin HRB National Research Council*, 189 (1967) pp. 1- 18.
- [15] Jensen, E., Hansen, W.: Mechanism of Load Transfer Crack Width Relation in JPCP: Influence of Coarse Aggregate Properties, 7<sup>th</sup> International Conference on Concrete Pavements, Orlando, USA, 2001.
- [16] Poblete, M., Salsilli, R., Valenzuela, A., Bull, A., Spratz, P.: Field Evaluation of Thermal Deformations in Undoweled PCC Pavement Slabs. *Journal of the Transportation Research Board*, 1207 (1988) pp. 217-228.
- [17] Brink, A., Horak, E., Perrie, B., Strauss, P., Visser, A.: Improvement of Aggregate Interlock Equation Used in cncPave, 23<sup>th</sup> Southern African Transport Conference, Pretoria, South Africa, 2004.
- [18] Roesler, J.R., Cervantes, V.G., Amirkhanian, A.: Accelerated performance testing of concrete pavement with short slabs. *International Journal of Pavement Engineering*, 13 (2012) 6, pp. 494-507.
- [19] Chatti, K., Manik, A., Brake, N., Salama, H., Haider, S.: Effect of Michigan multi-axle trucks on pavement distress, Draft Final Report, Volume III, Project RC-1504, Michigan State University, 2009.
- [20] Wadkar, A., Mehta, Y., Cleary, D., Guo, E., Musumeci, L., Zapata, A., Kettleon, W.: Load transfer efficiencies of rigid airfield pavement joints based on stresses and deflections. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23 (2011) (8), pp. 1171-1180.
- [21] Ramirez, L.C.: Concrete mixer properties affecting the aggregate interlock mechanism of joints and cracks for rigid pavement systems. MSc Thesis, University of Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2010.
- [22] Ioannides, A.M., Korovesis, G.: Aggregate interlock: a pure-shear load transfer mechanism, *Transportation Research Record*, 1286 (1990), pp. 14-24.
- [23] Khazanovich, L., Gotlif, A.: Evaluation of Joint and Crack Load Transfer Final Report, Report No. FHWA-RD-02-088, Federal Highway Administration, 2003.
- [24] Frabizzio, M.A., Buch, N.J.: Performance of transverse cracking in jointed concrete pavements, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 13 (1999) 4, pp. 172-180.
- [25] Bordelon, A., Roesler, J., Hiller, J.: Mechanistic-Empirical Design Concepts for Jointed Plain Concrete Pavements in Illinois. (Research Report ICT-09-052). Springfield, IL: Illinois Department of Transportation, 2009.
- [26] Snyder, M.B.: Guide to Dowel Load Transfer System for Jointed Concrete Roadway Pavements. Institute for Transportation at Iowa State University. Ames, IA: National Concrete Consortium, 2011.
- [27] Maitra, S.R., Reddy, K.S., Ramachandra, L.S.: Load transfer characteristics of aggregate interlocking in concrete pavement, *J. Tran. Eng.*, 136 (2010) 3, pp. 190-195.
- [28] Maitra, S.R., Reddy, K.S., Ramachandra, L.S.: Estimation of joint and interface parameters for the finite element analysis of jointed concrete pavement using structural evaluation results, *The International Journal of Pavement Engineering and Asphalt Technology (PEAT)*, 16 (2015) 2, pp. 21-38.
- [29] Salsilli, R., Wahr, C., Delgadillo, R., Huerta, J., Sepúlveda, P.: Field performance of concrete pavements with short slabs and design procedure calibrated for Chilean conditions. *International Journal of Pavement Engineering*, 16 (2015) 4, pp. 363-379.
- [30] Covarrubias T.J.P., Covarrubias V.J.P.: TCP design for thin concrete pavements, 9<sup>th</sup> International Conference on Concrete Pavements, San Francisco, USA, 2008.
- [31] Covarrubias, J.P.: Design of concrete pavement with optimized slab geometry. *Revista Ingeniería de Construcción*, 27 (2012) 3, pp. 181-197.
- [32] Ordoñez, J.D.: Short floor concrete slabs for tertiary roads in Colombia, Report, Colombia, 2015 (in Spanish).
- [33] Lavardo, R.: Technological innovation in the construction of rigid pavements using the short slab method in the Av. 26 de Noviembre, VMT 2018 (in Spanish), Bachelor Thesis, Cesar Vallejo University, Peru, 2018.



- [34] Becerra, M.: Tópicos de Pavimentos de Concreto, Diseño, Construcción y Supervisión (Concrete Pavements Topics, Design, Construction and Supervision), CIP 792900, Peru, 2012 (in Spanish)
- [35] Paulay, T., Loeber, P.J.: Shear transfer by aggregate interlock, American Concrete Institute Special Publication SP-42: Shear in Reinforced Concrete, 1 (1974), pp. 1–16.
- [36] Neeraj, B., Michael, F.: Impact of aggregate type on performance of transverse cracks in jointed concrete pavement – a field study, International Journal of Pavement Engineering, 1 (2000) 2, 97–106.
- [37] Raja, Z.I., Snyder, M.B.: Factors Affecting the Deterioration of Transverse Cracks in JRPC, East Lansing, Michigan: Michigan Department of Transportation and Great Lakes Center for Truck Transportation Research, University of Michigan, 1995.
- [38] Brink, A., Horak, E., Visser, A.: Improvement of aggregate interlock equation used in mechanistic design software, Int. J. Concrete Pavements, 1 (2005) 1, pp. 1-22.
- [39] Barman, M.: Joint performance characterization of bonded whitetopping overlays, Ph.D. Thesis, University of Pittsburgh, USA, 2014.
- [40] Hu, C.H., Ma, X.Z.: Load transfer behavior of cracking for cement concrete pavement, Advanced Materials Research, 1120-11121 (2015), pp. 1496-1500.
- [41] Davids, W.G., Mahoney, J.P.: Experimental verification of rigid pavement joint load transfer modelling with EverFE, Transportation Research Record, 1684 (1999), 81-89.
- [42] Pradena, M., Houben, L.J.M.: Load transfer-crack width relation of non-dowelled jointed plain concrete short slabs. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 13 (2018) 1, pp. 40–45.
- [43] Darestani, M.Y., Thambiratnam, D.P., Nataatmadja, A.: Experimental study on structural response of rigid pavements under moving truck load, 22<sup>th</sup> ARRB Conference – Research into Practice, Canberra, Australia, 2006.
- [44] Brink, A.: Modelling aggregate interlock transfer at concrete pavement joints. Ph.D, Thesis, University of Pretoria, South Africa, 2003.
- [45] Pradena, M., Houben, L.J.M., César, A.: Laboratory characterization of the load transfer-crack width relation for innovative short concrete slabs pavements. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 15 (2020) 1, pp. 232-250.
- [46] Thompson, I.: Use of Steel Fibres to Reinforce Cement Bound Roadbase, Ph.D. Thesis, The University of Nottingham, England, 2001.
- [47] Arnold, S., Fleming, P., Austin, S., Robins, P.: A test method and deterioration model for joints and cracks in concrete slabs. Cement and Concrete Research, 35 (2005) 12, pp. 2371-2383.
- [48] Chilean Highway Agency: Highways Manual. Ministry of Public Works, Santiago, Chile, 2018 (in Spanish).
- [49] Pradena, M., Houben, L.J.M.: Sustainable Pavements: Correction Factor for the Modelling of Crack Width at Joints of Short Slabs, 16<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference on Nano, Bio and Green Technology for a Sustainable Future, Albena, Bulgaria, 2016.
- [50] Ontario Provincial Standard Specification, OPSS 1002: Material Specification for Aggregates, 2011.
- [51] British Standards Institute, BS 882:1992: Specification for Aggregates from Natural Sources for Concrete, 1992.
- [52] Maharjan, S., Tamrakar, N.: Evaluation of gravel for concrete and road aggregates, Rapti River, Central Nepal Sub-Himalaya. Bulletin of the Department of Geology, 10 (2007), pp. 99-106.
- [53] Harrison, D.J., Bloodworth, A.J.: Industrial Minerals Laboratory Manual Construction Materials. British Geological Survey, (CR/02/227N). Nottingham, UK, 1994.
- [54] Cervantes, V., Roesler, J.: Performance of concrete pavements with optimized slab geometry, Research Report ICT-09-053, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2009.
- [55] Pradena, M., Houben, L.: Influence of early-age concrete behaviour on concrete pavements performance, GRAĐEVINAR, 69 (2017) 9, pp. 875-883, <https://doi.org/10.14256/JCE.1931.2016>