

Riduzion dal riscli causât dai slacs di cret doprant une gnove tecniche probabilistiche, inte zone dal lâc di Cjavaç

A L E S S A N D R O C O C C O L O & E N R I C O A R T I N I *

Ristret. Chest studi al trate dal progjet di intervent cuintri i slacs di cret par mieç di une gnove tecniche inzejneristiche, clamade RDBD (*Rockfall Defensive Barrier Design*), che e proviôt une analisi probabilistiche sedi inte simulazion matematiche de calade dai claps, sedi intal seguitîf dimensionament dai interventi di difese. L'aspjet inovatîf de operazion al consist te assunzion di parametris probabilistics, clamâts *Safety Levels*, dilunc dut il disvilup dal progjet, in alternative a chel che a si use fâ di solit in chest setôr de inzejnerie gjeotecniche. Fasint cussi al somearès pussibil di calibrâ pas dopo pas il sisteme di difese che miôr si adate al level di sigurece necessari al senari naturâl e antropic esaminât.

Peraulis clâf. Slacs di cret, distribuzion probabilistiche Beta, bariduris pare claps.

Introduzion. Ancje se a son mancûl spettacolârs dai grancj slacs di tiere, i piçui slacs di cret e i consequents moviments di claps dilunc lis levis a son une vore frequents te region alpine italiane. Chescj fenomenis a son une vore pericolôs parcè che a puedin jessi une vore svelts e rivâ tes stradis des valadis intun moment, cun efiets une vore bruts. Dal moment che par il progjet dai sistemis di difese a puedin coventâ une vore di bêçs, e il fenomeni naturâl al presente une grande variabilitât spaziâl e temporâl, i autôrs a consein di progjetâ secont dai criteris probabilistics sedi inte simulazion matematiche iniziâl de calade dai claps, sedi intal seguitîf dimensionament des bariduris pare claps.

Inte simulazion matematiche lis liniis di calade dai claps a varan di jessi otignudis doprant parametris (coeficent di restituzion, cjanton di atrît

* Inzejnîrs Consulents a la CP Ingejneria, Glemone, Italie. E-mail alex.coc@tin.it

al rodolament e al strissinament) dotâts di une variabilitât casual “*Random*” dentri di un interval definît (Paronuzzi et al. 1999), in plui il projet des bariduris pare claps al varà di vignî disvilupât secont de teorie de afidabilitât (“*Reliability Design*”), doprant par esempli l’arbul dai vuascj o l’arbul dai events (Paronuzzi et al. 1995, Ang et al. 1984).

La zone dal Friûl considerade in chest studi si cjate da pît de Mont Naruint, in comun di Bordan, no distant de spuinde meridionâl dal lâc di Cjavaç (Figure 1). Stant che in chê zone a si cjatin ativitâts umanis e un trat di strade statâl che a son sogjets a riscli di slacs di claps, al è stât

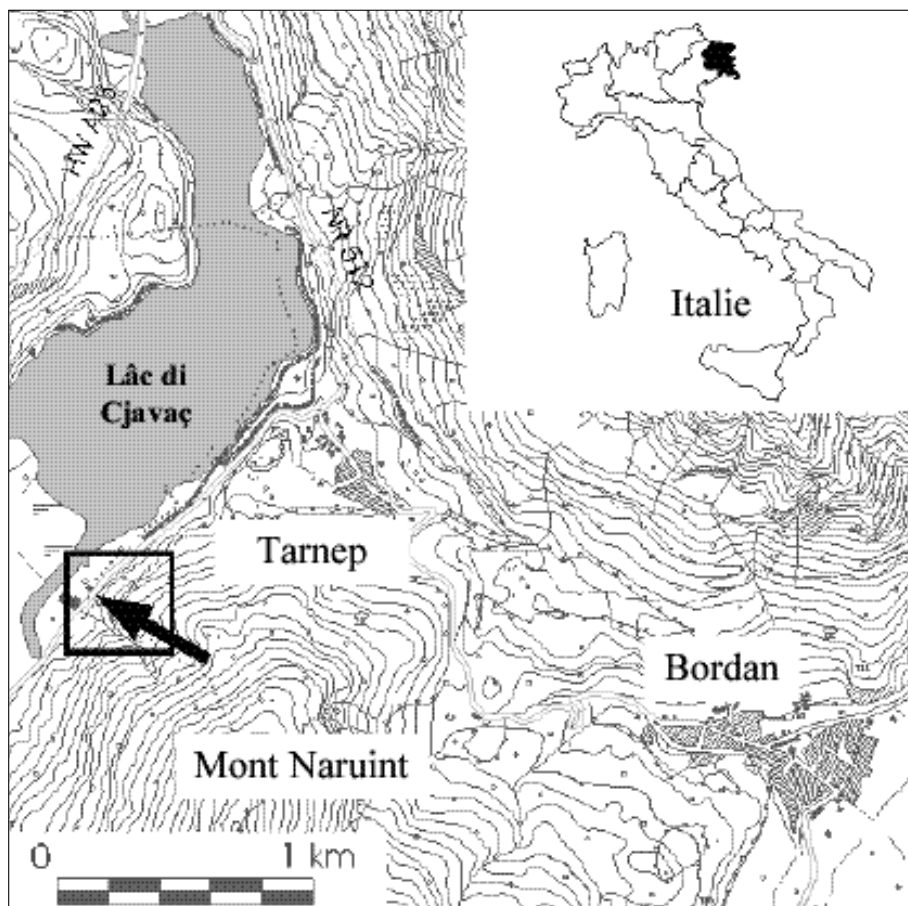


Figure 1. Posizion de zone studiade.

interessant provâ in chê particulâr situazion il gnûf mût di progettâ. In-tai cjapitui seguitîfs a si fevelarà propit di chest argoment.

Materiâi, metodologjie e risultâts

La tecniche ingegneristiche RDBD. Cheste gnove tecniche, clamade RDBD (*Rockfall Defensive Barrier Design*, par inglês) e proviôt diviers pas, colegâts e organizâts intun diagramme di flus (Figure 2), dulà che si pues controlâ il disvilup dal projet par mieç di parametris probabilistics, clamâts “Livei di Sigurece” (*Safety Levels*, par inglês) (Coccolo et

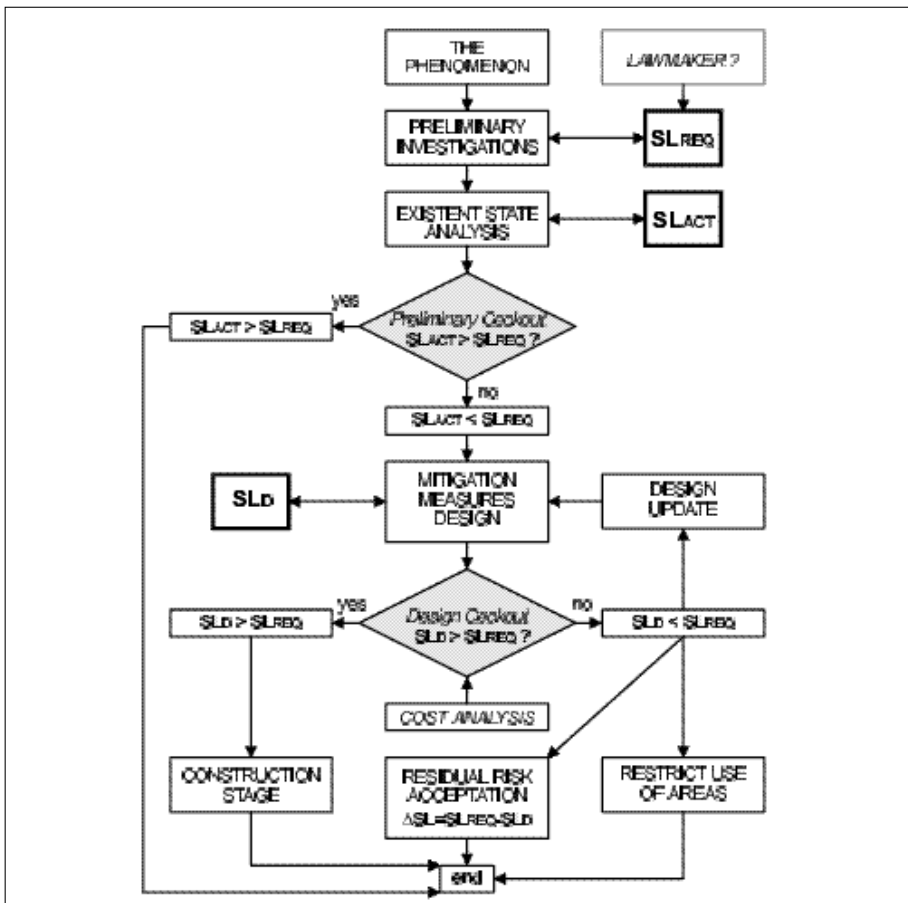


Figure 2. Diagramme di flus de tecniche RDBD, version 1.0 (par inglês).

al. 1998). La prime grandece di definî al è il “Livel di Sigurece Domandât” SL_{REQ} (*Required Safety Level*), che al vûl indicâ il nivel di riscli ritegnût acetabil pe zone esaminade e al dipent di ce che si cjate intal teritori: ativitâts dal om, stradis, e v.i. Cheste grandece e scugne sedi cognossude prime di tacâ il projet, doprant specificchis tecnicis matematichis (Fell 1994, Einstein 1988, Hudson 1992), e al sarès ben che chest valôr al sedi simpri inserît tai plans regoladôrs comunâi e di gjestion des zonis a riscli gjeologicjic dal teritori.

La seconde grandece di cjatâ al è il “Livel di Sigurece Atuâl” SL_{ACT} (*Actual Safety Level*), che al rapresente la pussibilitât che e à la cleve di rivâ a blocâ i claps che a si movin, sevie naturalmentri (boscs, trinceis naturâls), sevie cun bariduris pare claps za esistentis. Cuant che sevie SL_{REQ} che SL_{ACT} a son cognossûts, al è pussibil confrontâ i lôr valôrs, in chê che si definîs “Verifiche Preliminâr” (*Preliminary Checkout*). Se il “Livel di Sigurece Domandât” al è minôr dal “Livel di Sigurece Atuâl”, nol covente projetâ gnovis oparis di difese, tal câs contrari sî. Praticementri lis gnovis difesis a van a inressi il “Livel di Sigurece Atuâl” fin a rivâ al “Livel di Sigurece di Proget” SL_D (*Design Safety Level*). Chest gnûf parametri al vûl indicâ la probabilitât di blocâ i claps che al pues vè un ideâl sisteme di difese, che al cjape dentri dut ce che al jude par rivâ a chest fin (boscs, trinceis naturâls, bariduris esistentis e, soredut gnovis difesis in projet). Al somee clâr che il projet des gnovis bariduris al scuen lâ indenant pas a pas, al fin di calibrâ benon l’intervent, par no risclâ di sotstimâ il probleme o di spindi plui bêçs di chei che a coventin par meti in sigurece il teritori. Par chest a ogni pas si varès di fâ une “Verifiche di Proget” (*Design Checkout*), dulà che si confronte fra lôr i valôrs di SL_{REQ} e SL_D . Tal câs che $SL_D > SL_{REQ}$ o podin dî di vè completât il projet. Tal câs contrari, se no si ves di rivâ mai a cheste condizion, si scugne acetâ une situazion di “Riscjo di Rest” (*Residual Risk Condition*), mostrate de grandece $\Delta SL = SL_{REQ} - SL_D$, o par fin, tai câs plui dôrs, spostâ lis liniis des stradis e/o impedî lis ativitâts umanis inte zone.

Lis primis indagjinis: la definizion di SL_{REQ} Lis primis notiziis storichis di slacs di cret inte zone studiade si riferissin al taramot dal 1976 (Sgobino 1982). Plui di resint (1997) a son stâts fats diviers sorelûcs, sevie par contâ e localizâ su di une cjarte topografiche, tirade fûr di un “Model

Digitâl dal Teren” (*Digital Terrain Model*), ducj i claps rodolâts jù tal passât (Figure 3), sevie par studiâ lis possibilis gnovis traietoriis dai slacs a vignî. Si è podût capî che i slacs a podaressin interessâ:

- une trate di 150 m. de strade statâl n. 512, no masse traficade;
- un bar e une discoteche, cuntune vore di clients tes gnots di fin setemane;
- un parc par machinis al servizi dal bar e de discoteche di cirche 2000 m², doprât ancje dai turiscj dal lâc.

Stant che no esist une normative specifiche a riviart di SL_{REQ} (tant mancun une sô cuantificazion intai plans regoladôrs de zone interessade), al devente inevitabil, ma no coret, a mût di viodi dai autôrs, che il so valôr al vegni determinât dal progetist dai interventi di difese. In chest câs specific, tignût cont de sismicitât de zone e des ativitâts umanis elencadis disore, al è someât acetabil di fissâ un valôr di $SL_{REQ}=0.98$. Jessint chest lavôr svilupât cun finalitâts soledut didatichis, si è ritignût di fissâ il valôr di SL_{REQ} diretementi, cence spindi timp in complicadis analisis matematichis. Cheste assunzion no je, oviementri, masse corete.

La verifiche preliminar: la definizion e la utilizazion di SL_{ACT} La definizion di SL_{ACT} e domande dal imprim di fâ des analisis gjeologjichis, geomorfologjichis e topografichis, par classificâ i diferents terens e crets che si pues cjatâ tes levis e tes crestis a riscli. In plui e à di sei fate ancje la stime dal massim e minim volum di clap che al podarès movisi a vignî, e dai valôrs che si puedin assegnâ ai coeficients di restituzion elastiche dal teren. La zone studiade e cjape dentri une parêt cretôse di nature calcârdolomitiche, alte 60 m. e largje 150, cuntun gravon a la base inclinât di cirche 35-40° rispjet ae linie orizontâl. Te ponte dal gravon si cjate cualchi spuntun di cret, e dute la sô superficie e je cuvierzude cuntun strât di 10-50 cm. di tiere dulà che a son nassûts sterps e arbui.

Prime di assegnâ SL_{ACT} e je stade fate une analisi cualitative basade dome sul concet di “Cjanton Ombre” (*Shadow Angle*) e su la topografie de zone, secont ce che al è stât sugjerît dai dotôrs Onofri e Candian (1979). Analizant 98 slacs di cret vignûts jù tal 1976 dopo il taramot, chescj gjeolics a àn cjatât che, par ogni slac, il cjanton formât de linie orizontâl cun la linie che e jonte il pont plui alt de creste dal cret, indulà che si puedin distacâ i claps, e il plui lontan pont dulà che a son rivâts i claps, al cjape valôrs comprendûts tal interval 28.34°-40.73°. In chest câs

specific il Cjanton Ombre fra la linie “creste dal cret-strade statâl n. 512” e la linie orizontâl al vâl cirche 39° , ven a stâi che la zone studiade si pues efetivementri considerâ a riscli.

I rilêfs puartâts indenant tal gravon e tal cret a àn permetût di capî che il volum dai claps fin cumò vignûts jù al varie tal interval $0.2\text{-}2\text{m}^3$, cuntun valôr mezan di cirche 0.5m^3 . Duncje al risulte pussibil tratâ cheste grandece come une variabil casual dal gjenar “beta”, cuntune funzion di densitât di probabilitât (PDF) di cheste sorte

$$\begin{cases} f_x(x) = \frac{1}{\beta(q,r)} \cdot \frac{(x-a)^{q-1} \cdot (b-x)^{r-1}}{(b-a)^{q+r-1}} & a \leq x \leq b \\ \beta(q,r) = \int_a^b x^{q-1} \cdot (b-x)^{r-1} dx \end{cases}$$

e parametris di taradure $q=1$ e $r=5$.

Par definî il valôr di SL_{ACT} al risulte necessari fâ une vore di simulazion des pussibilis traietoriis dai claps (fintremai $10^4\text{-}10^5$ traietoriis), in mût di rivâ a vê dai spazii campionariis statistics relatîfs ai parametris cinematicis e energjetics dai blocs avonde fuarts. Par chest motîf e je stade svilupade une analisi cul computer, doprant un program che al dopre la topografie bi-dimensionâl dal teren e al prodûs il moto dai claps sfrutant la leç de cinematiche dal pont materiâl. Il program al è bon di tratâ i parametris cinematicis e energjetics come grandecis “random” variabilis dentri di un cjamp definît di valôrs, che a puedin vê distribuzion normâl, lognormâl, gamma o beta. In pratiche cheste ultime distribuzion (beta) e risulte la plui adate tal cjamp aplicatîf, par vie des diviersis formis che e pues mostrâ al variâ dai parametris di taradure. Il coefficient di restituzion doprât intes simulazions probabilistichis al è stât definît studiant lis traietoriis di ducj i claps colâts inte zone fin cumò, cun analisis su cinc sezions trasversâls dal teren (S1-S5), tiradis fûr dal “Model Digjitâl dal Teren” (Figure 3). Une buine corispondence cui fats reâi si è otignude doprant une distribuzion probabilistiche beta cun parametris

$$\begin{cases} q = 3.8 & r = 2.5 \\ 0 \leq e \leq 1 & \bar{e} = 0.6 \end{cases}$$

Il prin risultât otignût des simulazions probabilistichis al è stât che i claps a àn mostrât cjantons di jessude dal sbalç, riferîts ae cleve, cun valôrs di 4.5° - 22.5° , a conferme che, se nol ves di intervignî il rodolament, i claps a tindin a sbalçâ une vore placs e tirâts.

Il secont e plui impuartant risultât al consist inte cuantificazion dal valôr $SL_{ACT}=0.876$, che al puarte a scrivi la “Verifiche Preliminâr” come

$$SL_{ACT} = 0.876 < SL_{REQ} = 0.980$$

Cheste ultime ecuazion e indiche clarementi la esistence di un efetîf stât di riscli e la consequent dibisugne di progettâ gnovis oparis di difese, come mostrât tai cjapitui seguitîfs.

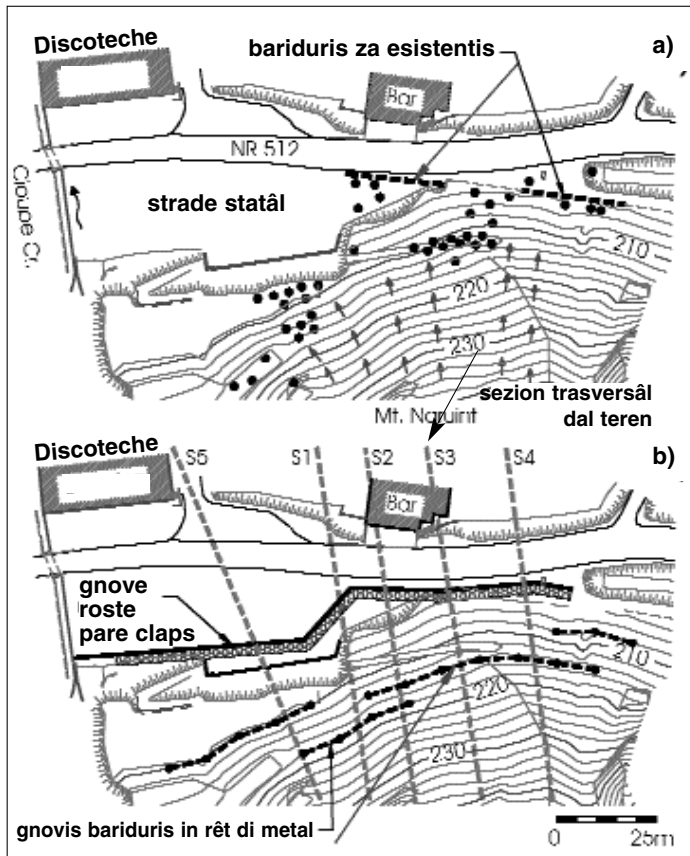


Figure 3. a) Posizionament dai claps colâts inte zone fin cumò. b) Intervents difensîfs progettâts.

La siele e l'efiet des bariduris pare claps: la definizion di SL_D e la "Verifiche di Proget". I lavôrs di riduzion dal riscli cuintri i slacs di cret si pue din classificâ in dôs categoriis gjenerâls: lis oparis "Ativis", che a cirin efetivementri di evitâ il distac di blocs dai crets (si tabaie alore di rêts di metal metudis jù in aderence al cret, tirants di açâr, cuardis di metal par incjamesâ i blocs, e v.i.); e lis oparis "Passivis", che a coventin par fermâ i blocs che a àn za tacât a movisi (galariis pare claps, bariduris fatis cun rêt di cuardin metalic, trinceis, rostis di tiere). In chest studi si è sielt di doprà lis oparis di difese dal gjenar passîf.

Prime di dut, in acuardi cui risultâts des simulazions probabilistichis puartadis indenant cence la presince des oparis di difese, si è ritignût di progjetâ une prime baridure pare claps in rêt di metal in corispondence dai ponts dulà che il vuluç des altecis di svol e des velocitâts dai claps al mostre un valôr minim dulinvie la cleve (Figure 4). La baridure sielzude, garantide dal costrutôr par une potenziâl energjie di impat dai blocs di 1100 kJ, e je costruide cun rêt a anei concatenâts dal gjenar "cuintri-silûr" e frens a atrît in cuardin di metal. Tignint cont che la rêt e à une

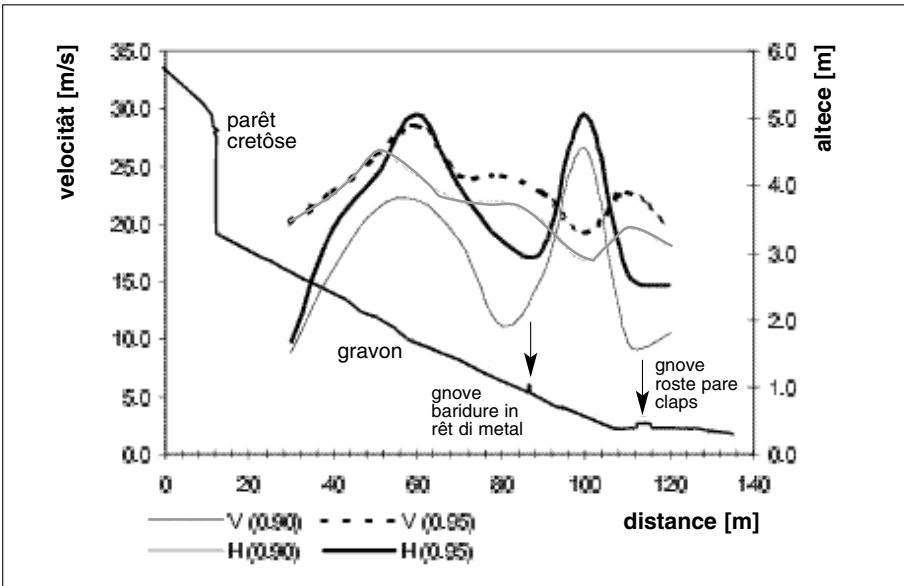


Figure 4. Vuluç des altecis di svol e des velocitâts dai claps dulinvie la cleve (percentil 90 e 95).

altece totâl di 4.0 m., si è ritignût di assumi une altece nete di intercetazion di 3.0 m., no considerant vevule al fin di blocâ i claps, par prudence, une fasce in ponte de rêl largje 1.0 m.

La afidabilitât de rêl pare claps e je stade cjetade cuntun arbul dai vuascj simplificât (FTD) (Ang et al. 1984, Paronuzzi et al. 1995). Clamant E =ineficacie de baridure (event principâl), E_1 =svol parsore de baridure, E_2 =distruzion gjenerâl de baridure, e considerant, dal pont di viste statistic, E_1 e E_2 come scambievolmentri esclusîfs, si podarà scrivi

$$E_1 \cap E_2 = \emptyset$$

la probabilitât colegade al event principâl come

$$P(E) = P(E_1) + P(E_2)$$

e finalmentri la afidabilitât de baridure cun la ecuazion

$$P_{\text{baridure}} = 1 - P(E) = 1 - P(E_1) - P(E_2)$$

Al risulte une vore util osservâ che, doprant bariduris cun resistence garantide e certificade dal costrutôr, si pues fâ di mancûl di considerâ successivis scomposizions di E_2 , tirant dentri par esempi trussadis dai blocs cuintri i diurints di fier o sbregaduris locâls de rêl. Lis probabilitâts $P(E_1)$ e $P(E_2)$ a son stadis cjetadis par ogni sezion trasversâl dal teren (S1-S5) studiade, analizant i risultâts des simulazions probabilistichis e confrontant lis altecis di svol e la energjie dai claps cun la altece nete di intercetazion (3.0 m.) e la energjie di impat de baridure (1100 kJ). I risultâts a son ripuartâts inte Tabele 1, e la seguitive disecuazion

$$SL'_D = P_{\text{fence}} < SL_{\text{REQ}} = 0.98$$

che a si pues considerâ come prime “Verifiche di Proget”, e mostre la dibisugne di potenziâ il sisteme di difese in proget. Par cheste reson, si è ritegnût di zontâ a la baridure une roste pare claps, metude jù al limit de zone dal parc machinis, paralelementri a la strade statâl.

La roste e je formade di un mûr di sostegn in ciment armât, alt 250 cm., e cuntun parament a viste in clap cimentât. Daûr dal mûr si cjate une gabionade plene di claps piçui, che e covente par dissipâ la energjie di impat dai blocs che a puedin lâi cuintri (Figure 5). Il proget dal spes-

sôt de gabionade al è stât fat doprant la formule di Kar (Kar 1978, Paronuzzi 1989):

$$\begin{cases}
 G\left(\frac{x}{d}\right) = \frac{\alpha}{\sqrt{Y}} \cdot N \cdot \left(\frac{E}{E_s}\right)^{1,25} \cdot \frac{W}{(d)^{2,31}} \cdot \left(\frac{V}{1000}\right)^{1,25} \\
 G\left(\frac{x}{d}\right) = \left(\frac{x}{2 \cdot d}\right)^2 \quad \text{if } \frac{x}{d} \leq 2 \\
 G\left(\frac{x}{d}\right) = \left(\frac{x}{d} - 1\right) \quad \text{if } \frac{x}{d} \geq 2
 \end{cases}$$

indulà che E, Es=modul di elasticitât dal cuarp che al sbat (clap) e dal açâr, W=pês dal clap, fatôr di forme dal clap, d=diametri esterni dal clap o dal cerchi inscrit, G=parametri di penetrazion, x=profonditât di penetrazion, Y=resistence statiche a la compression cence confin laterâl de gabionade.

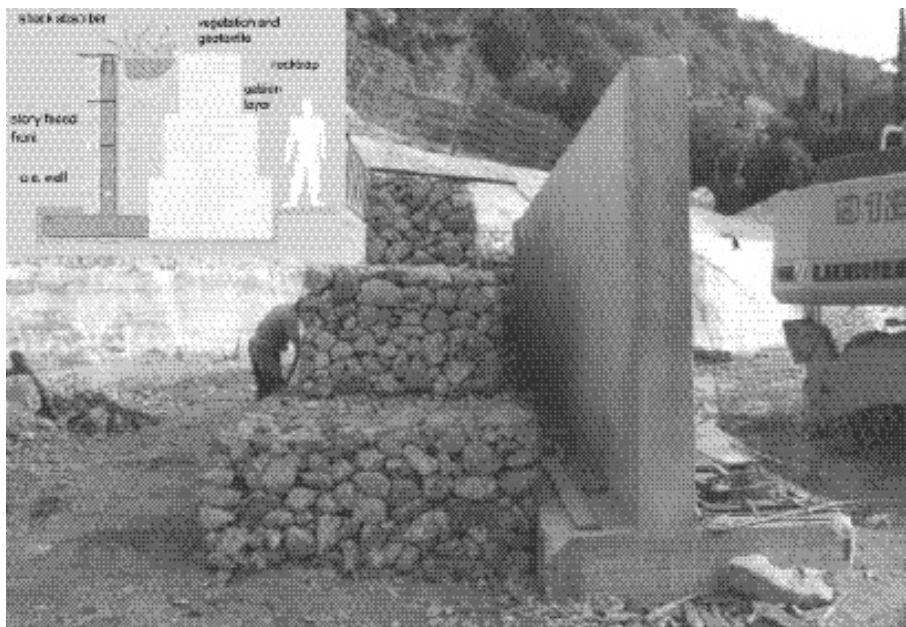


Figure 5. Une fase mezzane inte costruzion de roste pare claps.

Tabele 1. Afidabilitât dome de baridure pare claps in rêl di metal.

| | sezions trasversâls dal teren | | | | |
|-------------|-------------------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 |
| P(E1) | 0.03 | 0.045 | 0.002 | 0.09 | 0.115 |
| P(E2) | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| P(E) | 0.03 | 0.055 | 0.012 | 0.10 | 0.115 |
| P_{fence} | 0.97 | 0.945 | 0.988 | 0.90 | 0.885 |

In chê formule e je stade doprade une velocitât di impat cuintri de gabionade di valôr pâr a:

$$v_{\text{impact}} = 20 \text{ a } 25 \text{ m/s}$$

in armonie cui risultâts des simulazions probabilistichis puartadis inde-nant in presince de sole baridure. Dal moment che cun la formule scrite prime e je stade calcolade une profunditât mezane de pussibil buse inte gabionade $X_{\text{impact}} = 50 \text{ cm.}$, al somee adeguât proviodi un spessôr minim de gabionade no minôr di $X_{\text{gabion}} = 100 \text{ cm.}$

La afidabilitât dal sisteme difensîf complessîf, formât sevie de baridure sevie de roste, e je stade cuantificade fasint riferiment dome al svol dai claps parsore di ducj e doi i elements, resonant parsore di cheste considerazion. Stant che lis simulazions probabilistichis a àn mostrât che la energjie di svol dai claps dongje de baridure a no supere di tant chê che e pues incassâ la opare (1110kJ), al somearès di podê crodi che il moviment viers val dai claps intercetâts de baridure, ancje se cheste e ves di sdrumâsi intal scuintri, al puedi fermâsi dongje di jê, o, al limit, a cause dal seguitîf rodolament dilunc il trat finâl de cleve, cuintri la part basse de roste pare claps. Alore, clamant $E = \text{il svol parsore il sisteme difensîf complessîf}$, la probabilitât colegade a E e je stade cjatade par ogni sezion trasversâl dal teren (S1-S5) doprant lis simulazions probabilistichis. Cjale i risultâts inte Tabele 2. Cun i valôrs otignûts, la seguitive seconde “Verifiche di Progjet”

$$SL_D = P_{\text{system}} > SL_{REQ} = 0.98,$$

e je sodisfate su ogni sezion dal teren analizade, e e permet di podê considerâ sierât il progjet (Figure 6).

Tabele 2. Afidabilitât dal sisteme formât de baridure e de roste pare claps.

| | sezions trasversâls dal teren | | | | |
|---------------------|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 |
| P(E) | 0.003 | 0.002 | 0.006 | 0.006 | 0.007 |
| P_{system} | 0.997 | 0.998 | 0.994 | 0.994 | 0.993 |

Tabele 3. Afidabilitât dome de roste pare claps.

| | sezions trasversâls dal teren | | | |
|-----------------------|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| | S1 | S2 | S3 | S5 |
| P(E) | 0.031 | 0.023 | 0.099 | 0.100 |
| p^{rocktrap} | 0.969 | 0.977 | 0.901 | 0.900 |

A titul di confront inte Tabele 3 e je stade metude la probabilitât di svol parsore de roste, intal câs che il sisteme difensîf al fos constituît dome di jê. Al va sotlineât che il valôr di afidabilitât otignût nol è compatibil cul valôr di $SL_{REQ}=0.98$ che si veve dichiarât “a priôr”, e chest fat al conferme che la siele di un sisteme difensîf dopli (baridure e roste) si dimostre corete, ancje parcè che, par motîfs di impat ambientâl, nol sarès stât pussibil tirâ su trop la altece fûr di tiere de roste pare claps.

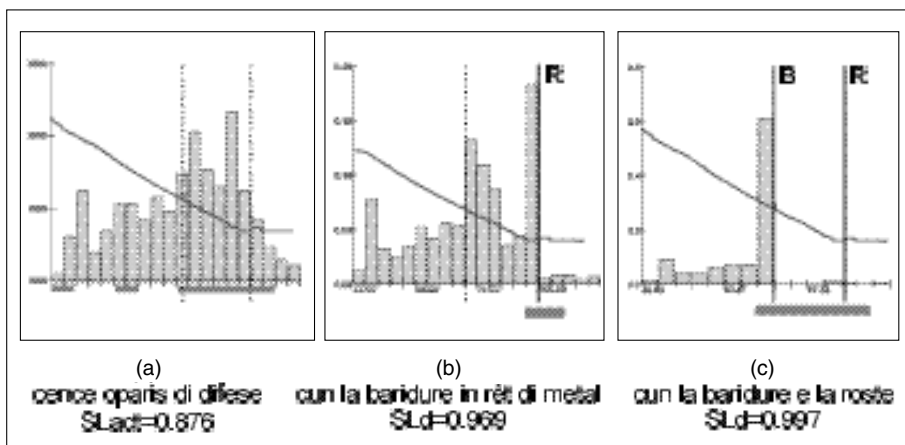


Figure 6. Distribuzion percentuâl dai ponts di arest dai claps dulinvie la cleve (B=baridure, R=roste).

Discussion. La procedure di progettazion RDBD e tire dentri diviers setôrs tecnics e difarents struments par podê projetâ oparis di difese passive cuintri i slacs di cret.

Chest articul al à mostrât cemût che une maniere di frontâ il probleme su basis probabilistichis al pues permeti di organizâ il projet seont pas dulinvie verificâts. Fin cumò, dentri di cheste tecniche di progettazion a esistin ancjemò impuartants elements e concets che a àn dibisugne di gnûfs disvilups e clariments. Fra i principâi sogjets di studiâ miôr si scuen sotlineâ la dibisugne di assegnâ prime di dut la efetive probabilitât che i slacs di cret a puedin verificâsi. In chest câs si è praticementri sotintindude la ciertece dal fenomen, e chest fat sigurementri al à compuartât une sotstime dal “Livel di Sigurece Atuâl” SL_{ACT} . Cundiplui la valutazion de afidabilitât di sistemis difensîfs plui complets, duncje cuntun numar plui alt di bariduris e rostis, dispès e compuarte la costruzion di arbui dai vuascj (FTD) une vore ramificâts. In chest câs, a puedin verificâsi events base e fra lôr dipendents, cun la dibisugne di doprâ la teorie de probabilitât condizionâl e de dipendence statistiche.

Par sierâ si pues dî che, dentri i limits indicâts disore, la tecniche svilupade e pues sei considerade un pont di inizi par un gnûf mût di projetâ lis oparis di difese cuintri i slacs di cret, tignint cont che la variabilitât e la casualitât dal fenomen reâl e compuarte sigurementri di vê di doprâ tecnicis di analisi probabilistichis.