

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

Tesi di laurea in
Cave e Recupero Ambientale

VARIABILITÀ DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DEL MARMO DELLE ALPI APUANE

Tesi di Laurea di:
ALBERTO DIOLAITI

Relatore:
Chiar.mo Prof. Ing. PAOLO BERRY

Correlatori:
Dott. Ing. ANNALISA BANDINI
Dott. Ing. CARLO CORMIO

SESSIONE II
ANNO ACCADEMICO 2007 - 2008

Parole chiave

Marmo

Onde elastiche

R.I.H.N.

Diffrattoграмма

Sezioni sottili

Indice

INTRODUZIONE.....	1
Capitolo 1	
CARATTERISTICHE DEL MATERIALE STUDIATO.....	3
1.1 Le rocce metamorfiche	3
1.2 Il marmo	5
1.3 Materiale studiato	6
Capitolo 2	
METODOLOGIA SPERIMENTALE.....	9
2.1 Introduzione	9
2.2 Preparazione dei campioni cilindrici	11
2.3 Proprietà fisiche: porosità e massa volumica	12
2.3.1 Introduzione	12
2.3.2 Massa volumica apparente.....	13
2.3.2.1 Procedura	13
2.3.2.2 Espressione dei risultati	13
2.3.3 Porosità aperta.....	14
2.3.3.1 Procedura ed espressione dei risultati.....	14
2.3.4 Massa volumica reale.....	15
2.3.4.1 Procedura	15
2.3.4.2 Espressione dei risultati	15
2.3.5 Porosità totale	16
2.3.5.1 Procedura ed espressione dei risultati.....	16
2.4 Proprietà dinamiche	16
2.4.1 Prove ultrasoniche.....	19
2.4.1.1 Procedura	19
2.4.1.2 Espressione dei risultati	21
2.5 Proprietà meccaniche.....	23
2.5.1 Prova di compressione monoassiale	23
2.5.2 Indice di resistenza R.I.H.N.....	24
2.5.2.1 Introduzione	24
2.5.2.2 Ricerche sulle modalità d'esecuzione del R.I.H.N. test.....	27

2.5.2.3	Procedura del R.I.H.N. test	29
2.5.2.4	Procedura del R.I.H.N. test a numero di colpi fisso	32
2.5.2.5	Osservazioni sull'indice R.I.H.N.	33
2.5.2.6	Osservazioni sulla strumentazione per il R.I.H.N. test.....	34
2.6	Proprietà chimico-mineralogiche	35
2.6.1	Analisi calcimetriche	35
2.6.1.1	Procedura ed espressione dei risultati.....	35
2.6.1.2	Preparazione dei campioni.....	38
2.6.2	Analisi diffrattometriche.....	38
2.6.2.1	Procedura	42
2.7	Sezioni sottili	44
 Capitolo 3		
RISULTATI SPERIMENTALI.....		45
3.1	Caratteristiche fisiche	45
3.2	Caratteristiche dinamiche	49
3.3	Caratteristiche meccaniche	54
3.3.1	Resistenza a compressione monoassiale.....	54
3.3.2	R.I.H.N. test	58
3.3.2.1	R.I.H.N.....	58
3.3.2.2	R.I.H.N. a numero di colpi fissi.....	71
3.3.2.3	Analisi calcimetrica del residuo R.I.H.N.....	73
3.3.2.4	Analisi diffrattometrica del residuo R.I.H.N.	74
3.4	Caratteristiche petrografiche.....	78
 Capitolo 4		
INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI SPERIMENTALI		85
4.1	Interpretazione dei diffrattogrammi.....	85
4.2	Modello di Tourenq e Fourmaintraux	87
4.2.1	Determinazione della velocità teorica V_{PC}	88
4.2.2	Determinazione dei contributi di porosità	91
 Capitolo 5		
CONCLUSIONI.....		93
 BIBLIOGRAFIA		95

ALLEGATI	99
A.1 Risultati R.I.H.N.	99
A.2 Risultati R.I.H.N. a numero di colpi fisso	126

INTRODUZIONE

Lo svolgimento di questa tesi ha riguardato la caratterizzazione di una roccia carbonatica metamorfica, marmo proveniente da un bacino estrattivo delle Alpi Apuane, mediante prove di laboratorio: in particolare, si è esaminato il comportamento di tale materiale sia mediante prove distruttive, sia mediante prove non distruttive.

Lo studio è stato condotto su diverse tipologie di campioni (cilindri di diametro differente ma con uguale rapporto tra diametro e altezza, campioni informi di materiale), tutti ottenuti da blocchi informi prelevati nel bacino estrattivo dell'Arnetola, sito nel comune di Vagli Sotto (LU).

Sui campioni carotati sono state eseguite più prove standard (distruttive e non), mentre i campioni informi sono stati utilizzati per la determinazione, mediante prova distruttiva, dell'indice di resistenza R.I.H.N. (acronimo di Rock Impact Hardness Number). Tale prova è in grado di fornire utili informazioni sulla resistenza dei materiali rocciosi, risultando particolarmente utile nell'industria estrattiva grazie alla semplice apparecchiatura che dà la possibilità di eseguire un numero elevato di determinazioni nei centri stessi di produzione, con bassi costi unitari.

Data la variabilità dei risultati ottenuti, sono state eseguite ulteriori analisi (studio tessiturale in sezione sottile, analisi calcimetrica e analisi diffrattometrica) che mettessero in luce la composizione mineralogica e la struttura microscopica del materiale testato, in modo da interpretare i risultati delle prove di laboratorio effettuate.

Alla luce dei risultati ottenuti, sono state elaborate alcune correlazioni tra le varie prove, facendo anche uso di alcuni abachi.

La tesi è strutturata in 5 capitoli: nel primo viene fornita una sintetica descrizione del materiale testato accompagnata da alcune nozioni di geologia, nel secondo vengono descritte le varie procedure e i riferimenti normativi delle prove di laboratorio effettuate. Nel terzo capitolo vengono presentati i risultati sperimentali; nel quarto capitolo vengono riportate le correlazioni tra i risultati

ottenuti con prove diverse mentre, nell'ultimo capitolo, vengono presentate le conclusioni di questo studio.

Capitolo 1

CARATTERISTICHE DEL MATERIALE STUDIATO

1.1 Le rocce metamorfiche

Tutte le rocce, nelle vicende di movimento della crosta terrestre, possono venire a trovarsi in condizioni diverse da quelle dell'ambiente in cui si sono formate; è possibile quindi che una determinata formazione rocciosa possa essere sottoposta a un aumento progressivo di temperatura e pressione. Poiché ogni minerale ha un suo campo limitato di stabilità, oltre determinati valori di temperatura e pressione, si innescano reazioni chimiche tra i diversi minerali di una roccia, per cui gli elementi si combinano in nuovi raggruppamenti in equilibrio col nuovo ambiente. Le rocce si adattano così a condizioni chimico-fisiche diverse dalle originali. Si indica, con il termine *metamorfismo*, la trasformazione allo stato solido di una roccia in un'altra a temperature e pressioni elevate (indicativamente $T > 300^{\circ}\text{C}$) accompagnata in varia misura da deformazioni dovute a sforzi tettonici; questa trasformazione modifica la tessitura delle rocce attraverso il processo di ricristallizzazione (riorganizzazione lentissima allo stato solido del reticolo cristallino dei minerali presenti nelle rocce) e, in caso di presenza di fluidi idrotermali, anche attraverso il processo di metasomatismo (processo chimico che consiste in uno scambio di ioni tra reticoli cristallini e fluidi interstiziali con conseguente cambiamento della composizione mineralogica della roccia).

Le rocce che si formano mediante questo processo prendono il nome di *rocce metamorfiche*. Questa tipologia di rocce può derivare dalla trasformazione di rocce sedimentarie, magmatiche o da altre rocce metamorfiche (per distinguere si

usa il prefisso *para-* per le rocce metamorfiche derivate dalle sedimentarie e il prefisso *orto-* per quelle derivate da rocce magmatiche).

Il processo di trasformazione avviene comunque allo stato solido in condizioni di aumento di temperatura, o aumento di pressione, o aumento di entrambe, e comporta modificazioni nella tessitura e nella struttura della roccia originaria: gli atomi dei minerali in queste particolari condizioni si dispongono in modo da formare nuovi reticoli cristallini.

Il metamorfismo è un processo che avviene non in superficie ma in profondità, salvo casi molto limitati come, ad esempio, nelle aree dove si espande una colata di lava e nei luoghi di impatto di grandi meteoriti. I processi di trasformazione delle rocce avvengono in profondità, e le rocce metamorfiche che possiamo vedere in superficie sono risalite grazie all'attività di agenti atmosferici o a movimenti della crosta terrestre

All'aumentare della profondità si ha, sia un aumento di temperatura variabile tra i 10°C e i 30°C per ogni chilometro (gradiente geotermico) a seconda della costituzione della parte profonda delle diverse regioni della crosta, sia un aumento della pressione detta *di confinamento*: questa è di tipo idrostatico, in quanto agisce con uguale intensità in tutte le direzioni, e il gradiente di pressione è valutato intorno ai 250-300 bar ogni km di profondità (1 bar = 1 atmosfera = 1 kg/cm²).

Quanto più il processo metamorfico è accentuato, tanto maggiori sono le trasformazioni che i minerali originali subiscono; a partire da una data roccia si possono ottenere rocce metamorfiche differenti per grado di metamorfismo. Il grado di metamorfismo esprime l'intensità delle azioni, principalmente quelle della temperatura, alle quali è stata sottoposta la roccia durante le trasformazioni metamorfiche: si distinguono metamorfismo di basso, medio, alto grado e a temperature ancora più elevate si arriva alla fusione (anatessi) con formazione di rocce ignee.

Possono essere distinti tre principali tipi di metamorfismo (il primo a scala regionale, gli altri due con effetti più circoscritti):

- *metamorfismo regionale*: prodotto per aumento contemporaneo di temperatura e pressione, si sviluppa nelle parti profonde di una catena montuosa (gradiente geotermico variabile, basso nella parte esterna della catena ed elevato nella parte interna) ed è necessariamente associato a deformazioni tettoniche, principalmente di tipo duttile. Produce le più comuni rocce metamorfiche, sia con tessiture orientate (filladi, scisti, gneiss) che con tessiture saccaroidi (marmi, quarziti);

- metamorfismo dinamico o cataclastico: dipende dalla pressione, si sviluppa in zone di taglio caratterizzate da forti dislocazioni tettoniche, in cui le fasi di ricristallizzazione metamorfica si alternano, e talora si associano, a fasi in cui i cristalli vengono frammentati o distorti: il regime deformativo è principalmente fragile in condizioni più superficiali, mentre diventa progressivamente più duttile all'aumentare della profondità e della temperatura. Ne derivano rocce metamorfiche a tessiture grossolana e fine, che solitamente mostrano anche vari gradi di ricristallizzazione;
- metamorfismo di contatto: dovuto all'aumento di temperatura, è prodotto dal calore e dalla diffusione di fluidi derivati dal magma che circondano un corpo intrusivo (elevato gradiente geotermico); non è necessariamente associato a deformazioni tettoniche. Produce rocce metamorfiche a tessitura cristallina non orientata, la cui composizione varia in funzione della composizione del magma, della composizione delle rocce incassanti e della distanza dal corpo intrusivo.

La grande varietà di rocce metamorfiche dipende in primo luogo dalla composizione originaria della roccia, poi dal tipo di metamorfismo subito e infine dal grado maggiore o minore di intensità di esso

1.2 Il marmo

Il marmo è una roccia metamorfica di composizione essenzialmente carbonatica: ciò significa che una roccia già esistente, di natura carbonatica, subisce delle trasformazioni che la rendono marmo. La roccia di origine del marmo è solitamente sedimentaria, e per lo più di composizione calcarea: la deposizione di questi sedimenti avviene in ambiente marino. Si tratta di sedimenti spesso ricchi di fossili, le cui forme sono poi riconoscibili in alcuni marmi. I marmi sono generati attraverso un processo di metamorfismo regionale o anche da metamorfismo di contatto dovuto ad aumenti notevoli temperatura a causa del contatto diretto con magmi che innescano la trasformazione dei calcari in marmi saccaroidi, ovvero costituiti da grossi cristalli. I marmi possono avere vari tipi di grana e contenere fino ad oltre il 99% di calcite (CaCO_3).

1.3 Materiale studiato

I campioni di materiale utilizzati nelle prove di laboratorio sono stati ottenuti da blocchi informi prelevati dal ravaneto della cava “Fossa dei Tomei” ubicata in località Bancario Alto, nel bacino estrattivo di Arnetola, comune di Vagli Sotto (LU). La cava ricade all’interno del Foglio n. 96, denominato “*Massa*”, (scala 1:100000) della Carta Geologica d’Italia. Il giacimento è situato in corrispondenza di un esteso affioramento della formazione dei “*marmi (m)*” in posizione mediana tra due strutture note in letteratura come “*Anticlinale di San Viviano*” e “*Sinclinale di Arnetola*”. La formazione dei *marmi* è rappresentata da diverse varietà merceologiche ed è costituita da calcari metamorfici a struttura saccaroide, di colore variabile dal bianco al grigio (età Lias Inferiore). Dal punto di vista merceologico, si individuano all’interno della formazione dei *marmi* le varietà denominate “*Venato*”, “*Arabescato*” ed “*Ordinario*”:

- *Venato*: marmo con fondo di colore da bianco sporco a grigio chiaro, con venature grigio-blu non uniformi dovute alla presenza di pirite microcristallina;
- *Arabescato*: breccia costituita da clasti marmorei di colore bianco di dimensioni medie dell’ordine del decimetro, in cemento a composizione prevalente carbonatica di colore grigio per la presenza di pirite microcristallina;
- *Ordinario*: marmo di colore variabile dal bianco livido al grigio chiaro, a grana media, con venature grigie non uniformi dovute alla presenza di pirite microcristallina.

I blocchi utilizzati in questo studio, in totale 11, sono stati denominati ciascuno mediante una lettera maiuscola (A, B,...) ed hanno tutti dimensioni dell’ordine del decimetro (Figura 1.1). Ad una analisi visiva, alcuni blocchi risultano simili tra loro; infatti i blocchi (B, C, H, M, N) presentano una grana fine o media-grossa e colore bianco perlaceo fino a grigio chiaro, sono piuttosto omogenei e risultano punteggiati da macchie grigie più o meno ampie e sfumate dovute probabilmente a presenza di pirite microcristallina. Raramente si osservano sottili vene di colore grigio chiaro o scuro. L’aspetto più comune è quindi quello di una roccia massiva e compatta priva di distribuzioni preferenziali degli elementi che la compongono. Il blocco D presenta una grana fine o media di

colore grigio chiaro ed è attraversato da sottili vene biancastre. Il blocco F si presenta a grana media, di colore biancastro, con diffuse vene di vario spessore dell'ordine del centimetro; tali vene presentano una colorazione variabile dal grigio più o meno scuro al verde scuro con intercalati cristalli di pirite microcristallina e probabilmente di quarzo. I blocchi A, E, G, L sono caratterizzati da una grana fine, sono di colore grigio chiaro e presentano sottili vene di colore più chiaro.



Figura 1.1. Blocchi utilizzati in questo studio; la riga misura 40cm.

Capitolo 2

METODOLOGIA SPERIMENTALE

2.1 Introduzione

Per questo lavoro di tesi sono state eseguite sia prove di laboratorio non distruttive, sia prove di laboratorio distruttive; svolgendo, in ordine temporale, prima le prove non distruttive, è stato possibile effettuare test di laboratorio differenti sui medesimi campioni di materiale al fine di ottenere una correlazione tra prove diverse. I test effettuati sono:

- misura della massa volumica apparente e della massa volumica reale;
- misura della porosità aperta e della porosità totale;
- misura della velocità di propagazione delle onde elastiche nel mezzo mediante ultrasuoni su provini in condizioni sature e secche;
- misura della resistenza a compressione monoassiale;
- determinazione dell'indice R.I.H.N.;
- determinazione del contenuto in carbonati presente nel materiale (analisi calcimetrica);
- comportamento del materiale all'incidenza di raggi X (analisi diffrattometrica);
- studio petrografico con microscopio ottico di sezioni sottili di materiale.

Per effettuare queste prove sono state utilizzate varie tipologie di provini di materiale:

- campioni cilindrici (carote) con diametro 38mm e 54 mm circa e rapporto tra diametro e altezza pari a 1:2;
- campioni informi di peso approssimativamente pari a 68 g;
- frantumato (passato al setaccio da 63 μm) ottenuto per frantumazione e macinazione dai campioni informi;
- campioni per lo studio in sezione sottile.

In particolare, i provini cilindrici sono stati utilizzati per la misura delle porosità aperta e totale, delle masse volumiche apparente e reale, della velocità di propagazione delle onde elastiche nel mezzo e della resistenza a compressione uniassiale; i campioni informi sono stati impiegati per la determinazione dell'indice R.I.H.N. e, dopo opportuna frantumazione, per la misura della percentuale di carbonato di calcio (CaCO_3) presente nel materiale e per il test mediante diffrattometro; infine, sono stati ricavati dai blocchi dei dischetti di materiale del diametro di 2,54 cm e altezza pari a circa 1 cm utilizzati per la preparazione delle sezioni sottili necessarie per lo studio al microscopio ottico.

Per le varie prove di laboratorio, l'incertezza associata alle grandezze determinate a partire da grandezze misurate, è stata calcolata mediante la formula di propagazione della varianza, considerando indipendenti gli errori relativi ad ogni grandezza misurata.

Nei paragrafi seguenti sono riassunte le procedure di esecuzione e le normative di riferimento per ognuna delle prove effettuate; viene ora descritta la procedura di preparazione dei campioni cilindrici (utilizzati come si è appena visto per più test di laboratorio) mentre, per la metodologia di preparazione dei campioni utilizzati per il R.I.H.N. test, per la misura del quantitativo di CaCO_3 , per il test al diffrattogramma e per le sezioni sottili, si rimanda direttamente ai paragrafi relativi.

2.2 Preparazione dei campioni cilindrici

Per ottenere questi campioni si è dapprima proceduto al taglio, mediante sega circolare diamantata, di ciascun blocco secondo due piani paralleli distanziati in maniera opportuna in modo da ottenere due superfici su cui eseguire i carotaggi; nell'effettuare questa operazione si è tenuto conto delle condizioni del blocco prestando attenzione all'eventuale presenza di discontinuità tipo venature, fratture, ecc.

Si è quindi cercato di ottenere da ciascun blocco il maggior numero possibile di carote di diametro pari a 38 e 54 mm (altezza 76 e 108 mm circa); è stato scelto l'utilizzo di due diametri differenti al fine di verificare la validità dei risultati indipendentemente dalle dimensioni dei campioni.

Inoltre, per misurare l'eventuale variabilità dei risultati sperimentali secondo direzioni diverse si è deciso, dove possibile, di eseguire i carotaggi sui blocchi lungo due direzioni tra loro perpendicolari.

Una volta effettuati i carotaggi, si è eseguita la rettifica delle facce superiori e inferiori di tutti i provini mediante mola diamantata in modo da ottenere due superfici piane e parallele con uno scostamento massimo di 0,02 mm misurato con comparatore centesimale; è stato inoltre verificato che la perpendicolarità di tali facce piane rispetto all'asse del campione non si discostasse per più di 3,5' e, infine, ci si è assicurati che la superficie laterale di tutte le carote fosse liscia, priva di irregolarità e con profilo rettilineo (Raccomandazioni I.S.R.M., R.I.G. 3/94).

Il diametro dei provini è stato misurato mediante calibro centesimale calcolando la media delle misure di due diametri fra loro ortogonali, effettuate nella parte superiore, a mezza altezza e nella parte inferiore del campione; anche l'altezza dei campioni è stata misurata mediante calibro centesimale e l'incertezza della misura sia del diametro che dell'altezza è pari a 0,1 mm.

Ciascuna carota è stata denominata con una lettera maiuscola che indica il blocco di origine e un numero arabo crescente (ad esempio *H1* è la carota numero 1 del blocco *H*); se lungo una determinata direzione sono stati effettuati due carotaggi ottenendo due carote, una delle due è stata denominata nello stesso modo con l'aggiunta del termine "*bis*" (ad esempio *H1bis* indica un campione prelevato lungo la medesima direzione del campione *H1*); infine, per i provini carotati in direzione perpendicolare si è adottata la stessa denominazione con

l'aggiunta della lettera "p" (ad esempio *HIp* è la carota numero 1 nella direzione perpendicolare).

2.3 Proprietà fisiche: porosità e massa volumica

2.3.1 Introduzione

In relazione alla normativa di riferimento (UNI EN 1936 2001), utilizzando i campioni cilindrici di diametro 38 e 54 mm, si è proceduto alla misura della massa volumica apparente, della massa volumica reale, della porosità aperta e della porosità totale definite come segue:

- massa volumica apparente (ρ_b): rapporto tra la massa del provino secco e il suo volume apparente (volume delimitato dalla superficie esterna del provino stesso compresi tutti i vuoti);
- massa volumica reale (ρ_r): rapporto tra la massa del provino secco ed il volume della sua parte solida;
- porosità aperta (p_o): rapporto (espresso come percentuale) tra il volume dei pori aperti e il volume apparente del provino;
- porosità totale (p): rapporto (espresso come percentuale) fra il volume dei pori (aperti e chiusi) ed il volume apparente del provino.

Dopo essiccazione dei provini fino a massa costante, la massa volumica apparente e la porosità aperta sono state determinate mediante assorbimento d'acqua sotto vuoto e pesata in acqua dei provini, mentre, la misura della massa volumica reale e la conseguente determinazione della porosità totale richiedono la macinazione del materiale e l'utilizzo del picnometro: data quindi la necessità di macinare finemente il materiale, la determinazione della massa volumica reale e della porosità totale è stata eseguita dopo aver effettuato sui medesimi campioni carotati la misura della velocità di propagazione delle onde elastiche e la misura della resistenza a compressione uniassiale.

2.3.2 Massa volumica apparente

2.3.2.1 Procedura

Per la misura di questa grandezza si è proceduto nel seguente modo: i campioni cilindrici vengono essiccati in stufa a 75° C fino a massa costante (ovvero quando la differenza tra due pesate successive in un intervallo di 24±2 h è minore dello 0,1% della massa del campione); in seguito vengono raffreddati fino a temperatura ambiente in un essiccatore contenente sali assorbiti umidità, pesati determinando così la loro massa secca (m_d), e successivamente inseriti in un recipiente a vuoto dal quale si estrae l'aria mediante una pompa fino ad ottenere una pressione di circa 0,48 Pa (valore inferiore rispetto a quanto prescritto dalla normativa, ovvero 2±0,7 kPa); tale valore viene mantenuto per 24±2 ore al fine di eliminare il più possibile l'aria contenuta nei pori aperti dei provini.

Dopo questo tempo, mantenendo la pressione all'interno del recipiente a vuoto sul valore di 0,48 Pa, si introduce nel recipiente acqua demineralizzata e deareata a temperatura ambiente ad un ritmo tale che i provini vengono completamente immersi in un tempo non inferiore ai 15 minuti; dopo aver lasciato i provini immersi in queste condizioni per 24±2 ore, si riporta il recipiente alla pressione atmosferica e si lasciano i campioni immersi in acqua per altre 24±2 ore alla pressione atmosferica.

Successivamente, ogni provino viene prima pesato in acqua e si registra tale valore (m_h), poi, una volta asciugato tamponandolo con un panno umido, si determina il peso saturo (m_s); inoltre, si misura attraverso un termometro sensibile a 0,1°C la temperatura dell'acqua nella quale si effettua la misura della massa del provino immerso in modo da avere un valore di densità dell'acqua il più preciso possibile.

Ciascuna misura (m_d , m_h , m_s), viene ripetuta tre volte e il valore preso è la media di questi tre valori.

2.3.2.2 Espressione dei risultati

Note quindi le varie masse del campione (secco, saturo, immerso in acqua) e la densità dell'acqua ricavata indirettamente dalla sua temperatura, si determina la massa volumica apparente (ρ_b) espressa in kg/m³:

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \cdot \rho_{rh} \quad (2.1)$$

dove:

$m_d \rightarrow$ massa del provino secco (g)

$m_s \rightarrow$ massa del provino saturo (g)

$m_h \rightarrow$ massa del provino immerso in acqua (g)

$\rho_{rh} \rightarrow$ massa volumica dell'acqua (kg/m^3)

Tutte le misure (provino secco, provino in acqua e provino saturo) sono eseguite con una bilancia sensibile a 0,01 g; in base a queste incertezze e ai valori delle misure, si ottiene un'incertezza associata alla massa volumica apparente pari a circa $0,4 \text{ kg/m}^3$. Poiché la pesatura del provino in condizioni sature è influenzata dall'operazione di asciugatura mediante panno umido, in quanto si rischia di lasciare uno strato d'acqua sul campione se lo si asciuga troppo velocemente (sovrastimando quindi il peso saturo) o di assorbire l'acqua presente nei pori aperti più superficiali se lo si asciuga per troppo tempo (sottostimando il peso saturo), si considera un'incertezza associata alla massa volumica apparente pari a 1 kg/m^3 , per tenere conto di questa incertezza associata alla massa del provino saturo.

2.3.3 Porosità aperta

2.3.3.1 Procedura ed espressione dei risultati

La determinazione della porosità aperta avviene con le stesse modalità adottate per la misura della massa volumica apparente in quanto si utilizzano i medesimi dati: peso secco del provino m_d , peso saturo m_s , e peso immerso in acqua m_h .

La porosità aperta (percentuale) è data da:

$$p_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \cdot 100 \quad (2.2)$$

Considerata l'incertezza associata alle misure e i valori delle misure stesse, si ricava un'incertezza assoluta associata alla porosità aperta pari a 0,01% (ovvero, un'incertezza relativa pari al 1,33%). Per le considerazioni sull'errore associato al

valore della massa in acqua, si considera un'incertezza associata alla porosità aperta pari a 0,03%, ovvero, un'incertezza relativa pari al 4%.

2.3.4 Massa volumica reale

2.3.4.1 Procedura

Dopo aver determinato la massa volumica apparente, la porosità aperta, la velocità di propagazione delle onde elastiche e la resistenza a compressione monoassiale, i campioni vengono macinati fino a che tutte le particelle non passano attraverso un setaccio con maglia di apertura pari a 0,063 mm; il macinato viene essiccato in stufa a 75°C fino a massa costante e ne viene prelevata una quantità (m_e) di circa 25 g. Si introduce acqua deionizzata nel picnometro riempiendolo per circa metà, si aggiunge la massa m_e di provino macinato e si agita il liquido per disperdere il componente solido. Si porta il picnometro sotto vuoto a $2 \pm 0,7$ kPa fino a che non risalgono più bolle d'aria, quindi si rabocca con acqua deionizzata fin quasi all'orlo e si lasciano sedimentare le particelle solide finché l'acqua sovrastante si presenta chiara. Dopo aver colmato accuratamente il picnometro con acqua deionizzata, si inserisce il tappo molato e si asciuga delicatamente ogni goccia d'acqua fuoriuscita. A questo punto si pesa il picnometro, riempito fino all'orlo con acqua deionizzata e contenente la massa m_e , registrando il valore m_1 . Successivamente il picnometro viene vuotato, asciugato, riempito fino all'orlo con solo acqua deionizzata e nuovamente pesato registrando tale valore (m_2); inoltre si misura la temperatura dell'acqua con un termometro sensibile al 0,1°C per avere un valore sufficientemente preciso della sua densità.

Durante tutte le operazioni ci si è sempre assicurati che la temperatura dell'aria dell'ambiente fosse di $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

2.3.4.2 Espressione dei risultati

Noti quindi i valori m_e , m_1 , m_2 tutti misurati con una bilancia sensibile al 0,01 g e il valore di densità dell'acqua ricavato dalla sua temperatura, si determina la massa volumica reale (ρ_r), in kg/m^3 , espressa come il rapporto tra la massa del provino macinato ed essiccato e il volume del liquido spostato da tale massa:

$$\rho_r = \frac{m_e}{m_2 + m_e - m_1} \cdot \rho_{rh} \quad (2.3)$$

dove:

m_e → massa del provino macinato ed essiccato (g)

m_1 → massa del picnometro riempito con acqua e con il provino macinato(g)

m_2 → massa del picnometro riempito con acqua (g)

ρ_{rh} → massa volumica dell'acqua (kg/m³)

Considerate le incertezze associate alle misure (0,01 g) e i valori delle misure, si ricava un'incertezza associata alla massa volumica reale pari a circa 2 kg/m³.

2.3.5 Porosità totale

2.3.5.1 Procedura ed espressione dei risultati

La porosità totale viene ricavata una volta note la massa volumica apparente (ρ_b) e la massa volumica reale (ρ_r), ed è espressa in percentuale dal rapporto:

$$p = \frac{\frac{1}{\rho_b} - \frac{1}{\rho_r}}{\frac{1}{\rho_b}} \cdot 100 = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_r}\right) \cdot 100 \quad (2.4)$$

Considerando i valori ottenuti e le incertezze associate alla massa volumica apparente e alla massa volumica reale, l'incertezza assoluta associata alla porosità totale è pari a circa 0,08% (ovvero, si ha un'incertezza relativa pari al 6%).

2.4 Proprietà dinamiche

Mediante queste prove non distruttive si misura la velocità di propagazione di onde elastiche attraverso campioni di forma regolare di materiale roccioso.

Queste tecniche di indagine si basano sulla generazione di onde acustiche direttamente sulle superfici dei campioni da testare attraverso la percussione con trasduttori elettrodinamici; il fascio d'onde si propaga nel materiale da esaminare con una velocità che dipende dalle caratteristiche elastiche del materiale attraversato e dalla sua densità.

Le sollecitazioni meccaniche fanno oscillare le molecole costituenti il campione attorno all'originaria posizione di equilibrio e, tale perturbazione, si propaga progressivamente dalle molecole che ricevono l'oscillazione dall'esterno a quelle attigue, da queste alle successive e così via, finché non risultano interessate tutte le molecole che costituiscono il corpo del campione. Quando il fascio incontra una disomogeneità all'interno del campione (dovuta a fessure, zone degradate, cavità, presenza di fluidi,...), viene riflesso, assorbito, deviato o rifratto secondo le leggi comuni a tutti i fenomeni di propagazione delle onde provocando un'alterazione della velocità di propagazione dell'onda.

Dalla misura della lunghezza del campione, relativa alla direzione lungo la quale si propagano le onde acustiche, e del tempo che impiega l'onda stessa ad interessare tutto il campione, si ricava la velocità di propagazione delle onde elastiche nel mezzo.

La generazione e la ricezione delle onde viene attuata per mezzo di strumenti detti *trasduttori* che sfruttano le proprietà piezoelettriche di alcuni cristalli, cioè la loro capacità di contrarsi ed espandersi sotto l'azione di un campo elettrico o di un campo magnetico alternato: le vibrazioni del cristallo producono le onde elastiche che si propagano nel campione. Il fenomeno fisico della piezoelettricità (o magnetostriazione), che viene sfruttato per generare l'onda, è reversibile e da ciò deriva che lo stesso cristallo capace di emettere onde acustiche (effetto piezoelettrico indiretto) può generare un segnale elettrico o magnetico, quando sia investito da un fascio d'onde elastiche (effetto piezoelettrico diretto); perciò, quando il segnale emesso arriva al trasduttore ricevente, questo genera un impulso elettrico. Il sistema di misura è dotato di un dispositivo che fa scattare un contatore di tempo nel momento in cui la sorgente emette le onde soniche mentre, nell'istante in cui l'onda arriva al trasduttore ricevente, questo invia un segnale che interrompe il contatore. Il metodo di misura consiste nell'eccitare il trasmettitore con un impulso sinusoidale e nell'individuare il primo arrivo dell'onda al ricevitore. Il tempo intercorso tra l'inizio dell'eccitazione del trasduttore trasmittente e la rilevazione dell'impulso ricevuto è assunto come tempo di propagazione dell'onda nel mezzo. Il segnale, opportunamente

amplificato e filtrato, viene visualizzato sul quadrante di un oscilloscopio a doppia traccia che consente la visualizzazione del segnale in ingresso e del segnale in uscita per la determinazione grafica del tempo di transito. In fase d'acquisizione è fondamentale il perfetto contatto tra il campione e i trasduttori; per questo motivo, tra trasduttori e provino, vengono posti particolari materiali che, oltre a garantire il perfetto accoppiamento, sono in grado di contenere il disadattamento d'impedenza acustica e trasferire l'onda dal trasduttore al provino senza eccessivo assorbimento.

In questo studio sono state utilizzate onde con una frequenza rientrante nel campo degli ultrasuoni (valore della frequenza compresa tra 20 kHz, e 1000 MHz); inoltre, sono state utilizzate due tipi di onde di volume (Figura 2.1):

- onde longitudinali (onde "P", di compressione, dette anche "primarie"): le molecole oscillano secondo la direzione di propagazione dell'onda; queste onde si propagano sia nei solidi che nei fluidi;
- onde trasversali (onde "S", di taglio, dette anche "secondarie"): le molecole oscillano perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda; queste onde si propagano solo nei mezzi che trasmettono sforzi di taglio, quindi solo nei solidi.

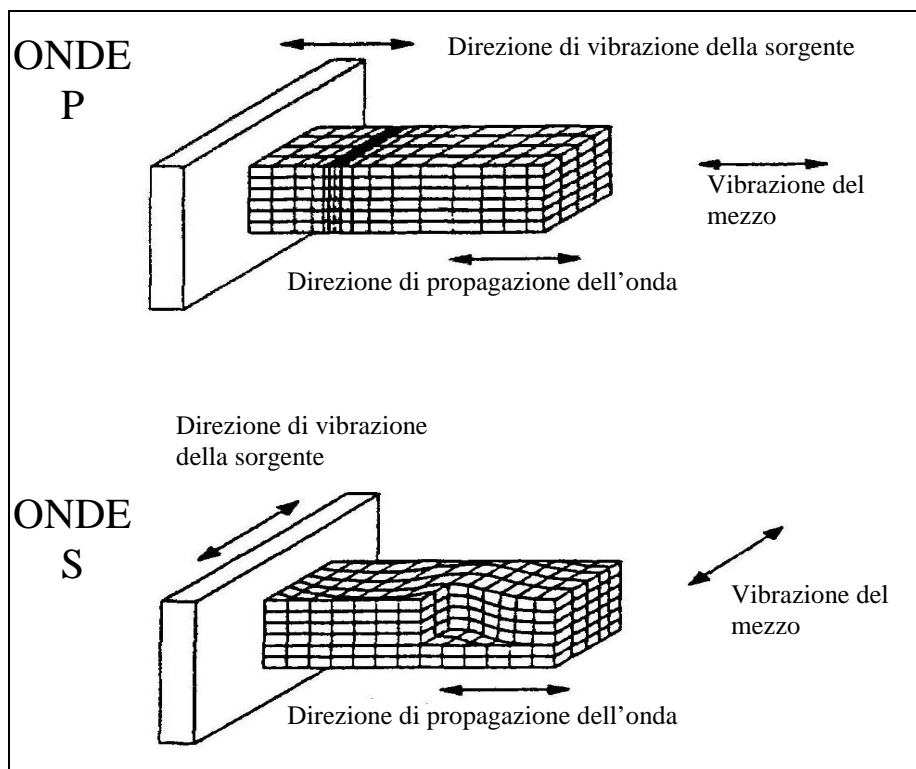


Figura 2.1. Tipi di onde di volume.

Si dimostra che per un mezzo elastico, omogeneo e isotropo, la velocità delle onde longitudinali (V_p) e la velocità delle onde trasversali (V_s) sono date da:

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.5)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{2(1+\nu)}} \quad (2.6)$$

dove:

$E \rightarrow$ modulo di Young

$\rho \rightarrow$ densità del materiale

$\nu \rightarrow$ coefficiente di Poisson

Si verifica che $V_p > V_s$, ovvero le onde P impiegano un tempo inferiore rispetto alle onde S a percorrere la stessa sezione di materiale; da qui il termine “primarie” per le onde longitudinali.

2.4.1 Prove ultrasoniche

2.4.1.1 Procedura

La prova è stata eseguita seguendo le indicazioni presenti nella normativa di riferimento (Raccomandazioni I.S.R.M., R.I.G. 3/95): i provini sono costituiti dai campioni cilindrici, di diametro pari a 38 e 54 mm, precedentemente utilizzati per la misura della massa volumica e della porosità.

L'apparecchiatura di misura (Figura 2.2) è composta da due trasduttori piezoelettrici (uno emittente, l'altro ricevente) posizionati alle estremità opposte del provino cilindrico da testare in modo che le onde si propaghino lungo l'asse dei campioni cilindrici; inoltre i trasduttori sono collegati al sistema amplificatore-oscilloscopio che permette la visualizzazione del segnale dell'onda. L'oscilloscopio è collegato a sua volta ad un computer dotato di software per la registrazione delle forme d'onda. I trasduttori utilizzati hanno testine piezoelettriche rice-trasmittenti con frequenza 1 MHz, diametro 54 mm e sono posti all'interno di una pressa oleodinamica che permette la misura della velocità

di propagazione delle onde al variare del carico di compressione applicato al provino di materiale.

Inoltre, i trasduttori utilizzati generano contemporaneamente un'onda P e due onde S polarizzate ortogonalmente che si propagano lungo due piani ortogonali tra loro ed entrambi contenenti l'asse del campione cilindrico.

In questo studio, le misure di velocità di propagazione delle onde P e delle onde S sono state eseguite sottoponendo i provini ad una tensione di compressione pari a 4 MPa.

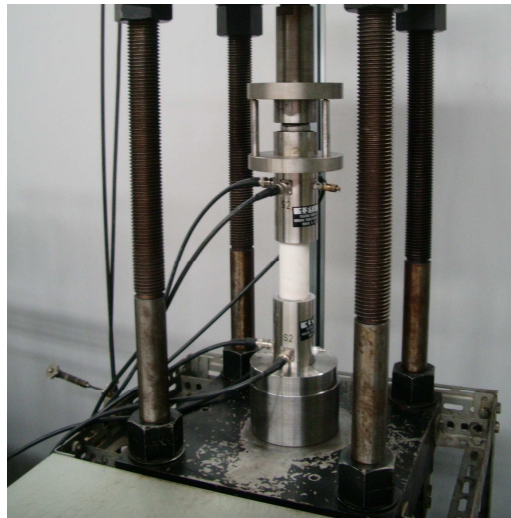


Figura 2.2. Campione sottoposto a test ultrasonici con testine piezoelettriche.

Le prove sono state effettuate su campioni sia in condizioni sature che in condizioni secche: in questo modo è possibile correlare la variazione dei valori di velocità con la porosità dei campioni, come sarà mostrato nei capitoli seguenti. Per eseguire le misure in condizioni secche i campioni sono lasciati in stufa a 75°C per due giorni e successivamente raffreddati fino a temperatura ambiente in essiccatore con sali assorbenti umidità; preparati così i campioni, la misura è stata eseguita interponendo un sottile strato di un gel eco/elettro conduttore in modo da garantire un perfetto accoppiamento tra le superfici dei trasduttori e le superfici dei provini. La misura in condizioni sature è stata effettuata sui provini cilindrici lasciati immersi in acqua distillata per almeno tre giorni: i campioni così saturati sono stati lasciati in acqua fino al momento della prova; in questo caso non si è reso necessario l'utilizzo del gel eco/elettro conduttore in quanto l'accoppiamento tra trasduttori e provini in queste condizioni è garantito dallo strato d'acqua superficiale rimasto sui campioni stessi.

Inoltre, prima di iniziare le misure e ad intervalli regolari di tempo, si è proceduto alla taratura del sistema di misura interponendo tra i trasduttori una barra di acciaio di cui è noto il valore del tempo di percorrenza delle onde longitudinali.

2.4.1.2 Espressione dei risultati

Il tempo di propagazione delle onde elastiche nel mezzo viene letto direttamente sull'oscilloscopio, il quale fornisce un grafico continuo delle onde elastiche a partire dai segnali elettrici dei trasduttori emittenti e riceventi con, in ascisse, il tempo (espresso in μs) e, in ordinata, la tensione elettrica (espressa in Volt). Nella figura seguente (Figura 2.3) viene riportato, a titolo di esempio, un grafico con le forme delle onde P, S1 e S2 ottenute su un provino.

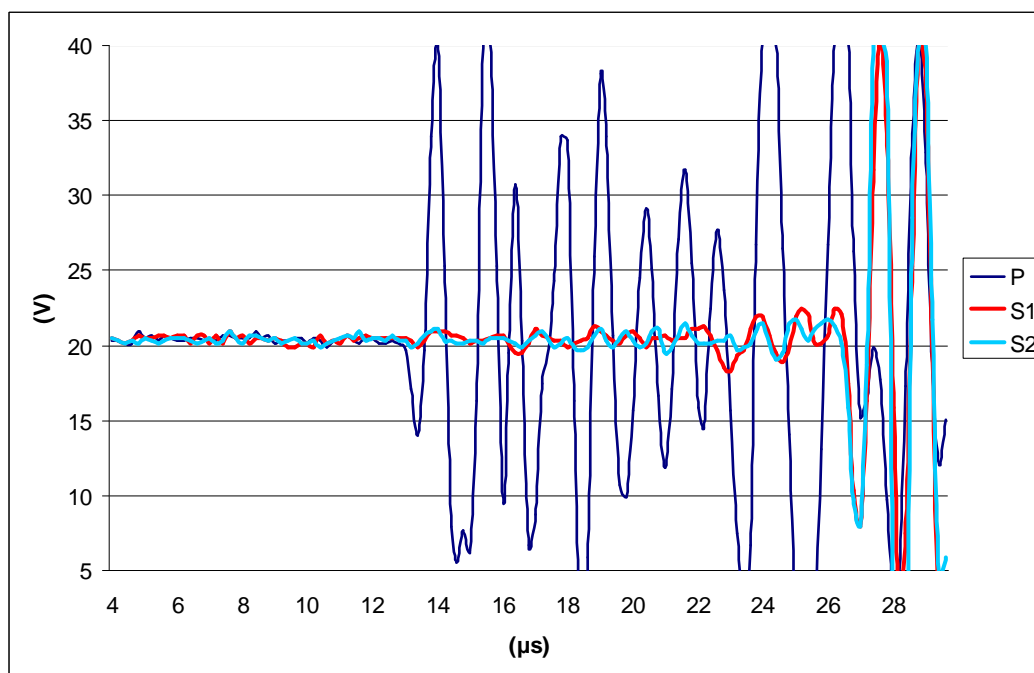


Figura 2.3. Grafico delle forme d'onda.

Nell'istante in cui il trasmettitore viene eccitato, parte la misura del tempo e sull'oscilloscopio viene visualizzata una forma d'onda sub-orizzontale; nell'istante in cui l'onda arriva al ricevitore, si ha il passaggio dalla forma d'onda sub-orizzontale ad una forma d'onda sub-verticale. Il primo arrivo di un fascio d'onde corrisponde al primo arrivo di un'onda longitudinale che, come detto, risulta più veloce di un'onda trasversale; nel passaggio dalla traccia sub-

orizzontale ad una traccia più ripida, il tempo di arrivo è preso in corrispondenza dell'inizio del tratto curvo: in corrispondenza di tale punto si legge sul grafico il corrispettivo valore di tempo, in microsecondi, sull'asse delle ascisse.

La procedura si ripete allo stesso modo per le onde trasversali; in questo caso però la lettura può risultare difficoltosa in quanto l'arrivo dell'onda di taglio può essere mascherato dalle vibrazioni dovute al fenomeno di “*ringing*” dei trasduttori e dalle onde di taglio generate dalle riflessioni dell'onda di compressione, che si sovrappongono con l'onda trasversale generata dalla testina piezoelettrica. Per questo motivo le misure di velocità sono state effettuate sottoponendo i provini cilindrici ad una tensione di compressione pari a 4 MPa: al di sotto di tale valore le onde S risultano difficili da identificare sull'oscilloscopio.

La difficoltà nel leggere i tempi di arrivo delle onde sull'oscilloscopio è risultata ancora più evidente nel caso delle onde trasversali con i provini in condizioni sature: in tal caso infatti, i segnali delle onde sono risultati di debole intensità e difficilmente distinguibili dal rumore di fondo. Tale fenomeno può essere dovuto alla presenza dell'acqua nei pori superficiali dei provini che non permette, o attenua enormemente, il passaggio delle onde di taglio che non si trasmettono nei fluidi. Per questo motivo, non vengono considerate le onde trasversali nel caso di campioni saturi.

Una volta ottenuti i tempi di percorrenza delle onde, si ricava la velocità di propagazione dividendo la lunghezza del provino relativa alla direzione di propagazione delle onde (in questo caso l'altezza dei campioni cilindrici) per il tempo stesso di propagazione:

$$V = \frac{h}{T} \cdot 1000 \quad (2.7)$$

dove:

$V \rightarrow$ velocità di propagazione onda (m/s)

$h \rightarrow$ altezza dei provini cilindrici (mm)

$T \rightarrow$ tempo di percorrenza delle onde nel campione (μ s)

L'equazione (2.7) viene applicata in tutte le misure effettuate determinando così le velocità delle onde longitudinali in condizioni secche e sature e le velocità delle onde trasversali in condizioni secche (V_{P-sec} , V_{P-sat} , V_{S1-sec} , V_{S2-sec}) a partire

dai rispettivi tempi di percorrenza. In particolare, V_{S1} e V_{S2} si riferiscono alle due differenti velocità trasversali misurate lungo direttrici tra loro ortogonali (onde polarizzate perpendicolarmente).

Considerando un errore di misura di 0,1 mm per l'altezza dei campioni, 0,1 μ s per i tempi di arrivo delle onde, si ottengono le seguenti incertezze associate alle velocità (Tabella 2.1):

	V_{P-sec}	V_{P-sat}	V_{S-sec}
Incertezza associata (m/s)	25	41	7

Tabella 2.1. Valori delle incertezze associate alle velocità di propagazione delle onde P e S.

2.5 Proprietà meccaniche

2.5.1 Prova di compressione monoassiale

Questa prova è finalizzata alla misura della resistenza a compressione uniassiale di campioni di roccia di forma regolare; la misura è stata effettuata con una pressa oleodinamica che sottopone i provini a carico di compressione uniassiale incrementato uniformemente fino a produrre la loro rottura.

La prova è stata eseguita seguendo le indicazioni presenti nella normativa di riferimento (Raccomandazioni I.S.R.M., R.I.G. 3/94): i provini sono costituiti dai campioni cilindrici, di diametro pari a 38 e 54mm (già utilizzati per la misura della massa volumica, della porosità e della velocità di propagazione delle onde elastiche), preliminarmente essiccati fino a massa costante alla temperatura di 75°C e successivamente lasciati raffreddare fino al raggiungimento dell'equilibrio termico con la temperatura ambiente; i provini così preparati vengono inseriti direttamente tra le piastre della pressa senza l'interposizione di alcun tipo di materiale. Nella piastra superiore della pressa è presente uno snodo sferico che adatta la piastra in modo che le sollecitazioni siano uniformemente distribuite su tutta la superficie piana del provino; per migliorare l'uniformità del carico applicato sul provino è inoltre necessario porre attenzione alla posizione del campione, delle piastre e dello snodo sferico che devono essere perfettamente centrati; infine, onde evitare concentrazioni puntuali di tensione, è necessario

pulire le superfici dei piatti della pressa di prova e rimuovere ogni particella dalle facce di appoggio dei provini.

Il carico di compressione viene applicato al provino in modo continuo con un incremento costante di velocità pari a 0,5 MPa/s (valore limite inferiore stabilito dalla normativa che contempla incrementi di velocità di carico pari a $1\pm 0,5$ MPa/s).

Considerando positive le sollecitazioni di compressione, la tensione di compressione σ (in MPa) di ogni provino si calcola dividendo il carico di compressione P (in N) agente sul campione per l'area iniziale della sezione trasversale A_o (in mm^2) misurata prima della prova:

$$\sigma = \frac{P}{A_o}. \quad (2.8)$$

In particolare, la tensione di compressione del provino portato a rottura viene indicata con σ_u (MPa).

La pressa utilizzata misura con continuità, durante tutta la durata della prova, la forza applicata (P) con una accuratezza dell'1%: in base a questo valore, all'errore associato alla misura del raggio dei campioni pari a 0,1 mm e ai valori di σ_u ottenuti, risulta un'incertezza associata a σ_u di circa 1,5 MPa.



Figura 2.4. Rottura di un provino sottoposto a compressione.

2.5.2 Indice di resistenza R.I.H.N.

2.5.2.1 Introduzione

Il R.I.H.N. (Rock Impact Hardness Number) è un indice di qualità della roccia ricavato tramite una prova speditiva; è in grado di fornire utili informazioni

sulla resistenza dei materiali rocciosi risultando particolarmente utile nell'industria estrattiva grazie alla semplice apparecchiatura di prova che dà la possibilità di eseguire un numero elevato di determinazioni nei centri stessi di produzione con bassi costi unitari.

Fu proposto nel 1970 (Brook e Misra, 1970) in sostituzione dell'indice di Protodyakonov: il test di Protodyakonov prevede la scelta di 5 campioni, di forma qualsiasi, ognuno dei quali viene colpito varie volte da una massa di 2,4 kg lasciata cadere da un'altezza di 640 mm. Il frantumato viene setacciato e si misura il passante al setaccio di 0,5 mm con un volumometro di 23 mm di diametro. L'indice di Protodyakonov si ottiene mediante la seguente relazione:

$$f = \frac{n}{l} \quad (2.9)$$

dove:

$n \rightarrow$ numero di colpi

$l \rightarrow$ altezza della colonna dei fini

La prova, così com'è stata proposta, è suscettibile di errori: non vengono infatti fissati il volume dei campioni, né il tempo di setacciatura, né, infine, il grado di compattazione dei fini all'interno del volumometro.

L'apparecchiatura di prova per l'indice R.I.H.N. è identica a quella proposta da Protodyakonov e, analogamente, le variabili sono il numero di colpi e il peso dei fini prodotti da colpi successivi.

La prova consiste nel frantumare in un mortaio cilindrico tubolare un campione di roccia (detto "carica") attraverso una serie di urti successivi ottenuti con una massa d'acciaio di 2,4 kg in caduta libera da un'altezza di 640 mm; il materiale così frantumato viene vagliato manualmente per 90 secondi attraverso un vaglio con maglia di apertura pari a 0,5 mm, il passante ottenuto viene pesato ed il suo peso viene espresso come percentuale della massa della carica iniziale; la procedura viene ripetuta su campioni diversi della stessa roccia aumentando, di volta in volta, il numero di colpi (ad esempio. primo campione 10 colpi, secondo campione 20 colpi, terzo campione 30 colpi, etc.), fino a quando, nel corso di una prova, si ottiene una percentuale di passante pari, al massimo, al 30% del peso della carica iniziale.

I dati ottenuti da ciascuna carica vengono inseriti in un grafico che riporta, in ordinata, la percentuale di passante e, in ascissa, il numero di colpi esercitati: ogni determinazione su una singola carica quindi permette di individuare un punto sul grafico dato dalla percentuale di passante ottenuta e dal relativo numero di colpi effettuati per ottenerla. Dati 4 o 5 punti sul grafico, si individua la retta di regressione che meglio li approssima.

Il R.I.H.N. è definito come il numero di colpi richiesti per ottenere una percentuale di passante al vaglio pari al 25% del peso della carica iniziale e viene ottenuto direttamente dalla retta di regressione costruita sulla base dei risultati sperimentali; per ricavare l'indice R.I.H.N. sono sufficienti 4 o 5 determinazioni, ognuna con un diverso numero di colpi.

Questa appena descritta è la procedura *classica* di determinazione dell'indice di resistenza R.I.H.N.

Come si vede nell'esempio (Figura 2.5), una volta ottenuti i dati su cariche diverse sottoposte a numero di colpi diverso, si costruisce la retta di regressione che meglio approssima questi valori e, partendo dall'asse delle ordinate dal valore di 25% di passante, si individua sull'asse delle ascisse il valore di R.I.H.N. espresso come numero di colpi ad esso corrispondente (nell'esempio R.I.H.N.= 46 colpi).

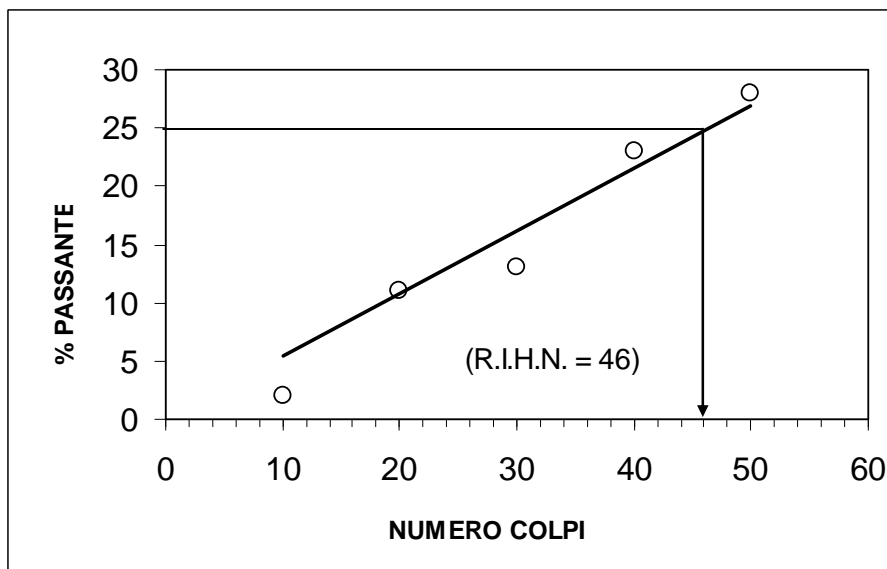


Figura 2.5. Esempio di determinazione dell'indice R.I.H.N. per interpolazione lineare.

Non è opportuno, durante la prova, superare il 30% di passante in quanto il coefficiente angolare della retta di regressione cala sensibilmente; in particolare,

l'indice R.I.H.N. tende ad aumentare (il campione resiste di più agli urti) al crescere delle polveri prodotte le quali, disponendosi attorno al frantumato, attutiscono l'effetto dei colpi successivi (Tagliavini, 2004).

2.5.2.2 Ricerche sulle modalità d'esecuzione del R.I.H.N. test

Come carica, originariamente, furono adottati campioni regolari di forma cilindrica di diametro e lunghezza, rispettivamente, pari a 25 e 50 mm per un volume complessivo di $24,54 \text{ cm}^3$. La ragione di questa standardizzazione risiedeva nella non linearità della relazione esistente tra la lunghezza del campione ed i valori di R.I.H.N. (Brook e Misra, 1970).

Esperienze successive (Rabia e Brook, 1981) hanno evidenziato l'indipendenza del R.I.H.N. dalla forma del campione: la prova è applicabile anche a campioni irregolari purché il volume della carica sia pari al volume del cilindro standard ($24,54 \text{ cm}^3$) e con spigoli maggiori di 15 mm (Paithankar e Misra, 1976). I campioni possono essere costituiti da più frammenti ma non si può aumentare indefinitamente il loro numero perché il valore del R.I.H.N. diminuisce all'aumentare della superficie iniziale della carica (Rabia e Brook, 1981). In particolare, per una carica costituita da particelle di dimensioni comprese tra $0,5 \div 1 \text{ mm}$, la riduzione del valore di R.I.H.N. può essere del 70% (Figura 2.6).

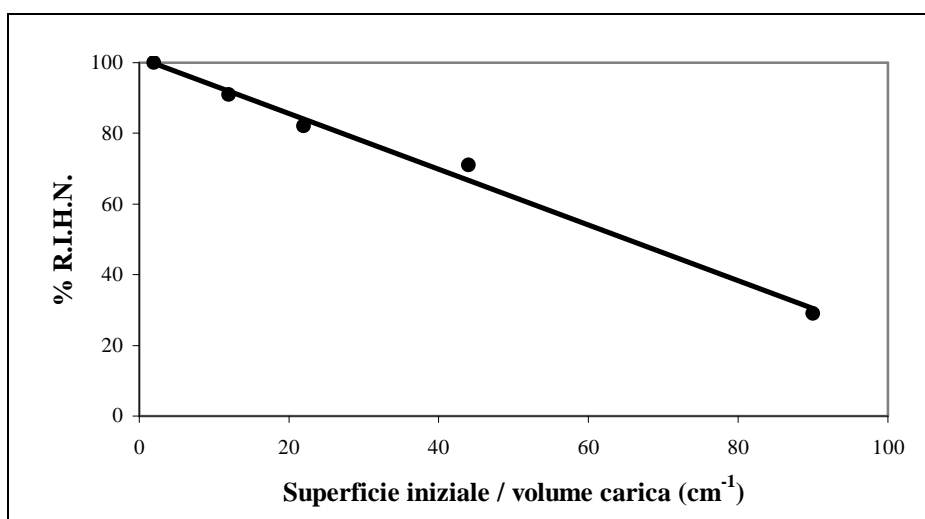


Figura 2.6. % R.I.H.N. in funzione del rapporto superficie iniziale / volume della carica (Rabia e Brook, 1981).

Ulteriori ricerche volte a migliorare i procedimenti operativi del R.I.H.N. test e finalizzate all'ottenimento di risultati il più possibile attendibili e omogenei,

hanno dimostrato la validità di una diversa procedura di esecuzione che prevede l'utilizzo, non più di campioni diversi per serie diverse di colpi, ma del medesimo campione per serie successive di colpi: si sottopone il campione ad una prima serie di colpi, quindi si esegue la vagliatura manuale del frantumato per 90 secondi mediante vaglio con apertura della maglia del vaglio pari a 0,5 mm, e la misura del peso del passato e del rifiuto; questi vengono poi reinseriti nel mortaio e sottoposti ad una nuova serie di colpi. Tale procedura si ripete fino ad ottenere un valore del peso del passato non superiore al 30% del peso del campione iniziale; si costruisce quindi il grafico per la determinazione dell'indice R.I.H.N. attraverso i valori di peso del passato (espresso sempre come percentuale del peso iniziale del campione) ottenuti dopo ogni serie di colpi e il relativo numero di colpi effettuati in ogni serie successiva. È stato dimostrato che questo metodo operativo non dà risultati dissimili da quello originariamente proposto e si è giunti alla considerazione che, nel caso di materiale omogeneo ed uniforme, l' utilizzo di diversi campioni di roccia sottoposti ognuno ad una serie diversa di colpi via via crescenti in numero, risulta il procedimento operativo più idoneo ai fini che il R.I.H.N. si propone (Tagliavini 2004, Gotti 2007), mentre, nel caso in cui le prove siano da effettuarsi in cantiere o non sia possibile avere una preventiva selezione dei campioni, è opportuno invece definire il R.I.H.N. di ogni provino e quindi sottoporre il medesimo campione a serie diverse di colpi reinserendo nel cilindro di carica sia il passante al vaglio che il rifiuto (Tagliavini, 2004). Quest'ultima procedura è risultata inoltre vantaggiosa nel caso di rocce non perfettamente omogenee: si ottengono delle rette di interpolazione dei dati (rette di regressione) con coefficienti di correlazione più alti rispetto a quanto si otterrebbe con la procedura classica (Bandini, 2007). Tale metodologia presenta anche il vantaggio di richiedere un minor numero di campioni e fornisce un valore dell'indice R.I.H.N. riferito ad un unico campione e non a più campioni: non risulta quindi un valore "mediato" tra più provini di materiale.

E' stata studiata inoltre una variante ulteriore alla procedura classica che prevede sempre l'utilizzo dello stesso campione per le diverse determinazioni, ma con la differenza che dopo ogni serie di colpi viene rimesso nel mortaio solo il rifiuto della vagliatura: esperienze eseguite su un materiale omogeneo hanno evidenziato che procedendo in questo modo il valore di R.I.H.N. si abbassa di oltre il 20% rispetto al valore determinato con la procedura classica (campioni diversi per serie di colpi diversi). Questo risultato sembra dovuto all'assenza di

materiale fine (granulometria < 0,5 mm) nel cilindro di carica e quindi ad una mancata attenuazione dei colpi della massa battente (Tagliavini, 2004).

Oltre a queste metodologie, caratterizzate tutte dall'applicazione di un numero di colpi variabile e dalla ricerca del numero di colpi necessari per ottenere una determinata quantità di passante, è stata studiata anche una procedura che prevede l'applicazione di un numero di colpi fissato e la successiva analisi granulometrica del frantumato. Tale procedura viene definita *R.I.H.N. a numero di colpi fisso* e, mediante essa, si ottiene la curva granulometrica del materiale frantumato nel mortaio con un determinato numero di colpi. Anche in questo caso, si utilizza una carica composta da uno o più frammenti irregolari con spigoli superiori ai 15 mm e di volume complessivo pari al volume della carica cilindrica standard. Tale procedura è risultata efficace in uno studio effettuato su roccia carbonatica metamorfosata, caratterizzata da una spiccata variabilità sia a piccola scala (in termini di tessitura), sia per i risultati di prove di laboratorio cui è stata sottoposta: il metodo a colpi fissi, infatti, è in grado di qualificare e classificare tale materiale, in quanto il risultato della prova è influenzato dalle caratteristiche microscopiche dei provini (Bandini, 2007).

Nel seguito della trattazione, si indicherà, con il semplice termine *R.I.H.N.* la procedura che prevede il numero di colpi variabile e l'utilizzo del medesimo campione per tutta la prova con il reinserimento del rifiuto e del passante nel mortaio per serie successive di colpi, mentre, con il termine *R.I.H.N. a numero di colpi fisso*, si indicherà la procedura che prevede l'applicazione di un numero fisso di colpi e la successiva analisi granulometrica del frantumato.

2.5.2.3 Procedura del R.I.H.N. test

In base ai diversi studi citati, la prova R.I.H.N. è eseguita utilizzando un solo campione per ogni singola determinazione dell'indice: si è quindi adottata la procedura che prevede, per ciascun campione, serie successive di colpi applicati al passato e al rifiuto reinseriti entrambi nel mortaio.

Sono stati utilizzati solo campioni irregolari preparati con martello e scalpello senza alcuna preventiva preparazione od essiccazione proprio perché i frammenti da utilizzare rispecchino il più possibile le condizioni in cui si trova il materiale nei centri di produzione (materiale risultante da volata, da frantumazione, etc.).

Ciascun campione è formato da uno, due o tre elementi di forma irregolare (Figura 2.7) con dimensioni degli spigoli non inferiori ai 15 mm ed ha un peso

complessivo (in grammi) pari a quello corrispondente al volume standard di 24,54 cm³, ovvero:

$$(24,54 \times MVA_{materiale}) \pm 2,5 \quad (2.10)$$

dove $MVA_{materiale}$ è la massa volumica apparente del materiale testato (variabile per il materiale in esame tra 2,683 e 2,735 g/cm³ –capitolo seguente-).

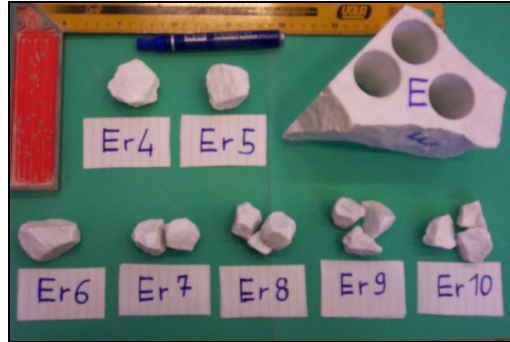


Figura 2.7. Campioni R.I.H.N. ricavati dal blocco E; si notano i fori dei carotaggi eseguiti precedentemente.

In totale sono stati preparati 10 campioni per ciascun blocco (quindi sono stati determinati 10 valori dell'indice R.I.H.N. per ogni blocco): ogni campione è denominato con una lettera maiuscola che identifica il blocco di appartenenza, seguita dalla lettera "r" e da un numero arabo da 1 a 10 (ad esempio Fr5).

Il mortaio utilizzato è un cilindro tubolare chiuso sul fondo, ha un diametro di 75mm e un'altezza, misurata internamente tra il bordo superiore e il fondo, pari a 710mm; la massa di acciaio è costituita da un blocco di forma tronco conica del peso di 2,4kg, ha un diametro alla base inferiore di 73,6mm, un diametro alla base superiore di 71,6 mm e un'altezza di 70mm. La forma è tronco conica per limitare il più possibile l'attrito con le pareti laterali del mortaio durante la caduta (Figura 2.8, Figura 2.9).

Si inserisce dall'alto la carica di materiale, lasciandola cadere nel mortaio, e si inserisce in quest'ultimo la massa di acciaio (che è legata superiormente ad una corda con la quale la si trattiene), fino a quando i bordi superiori di questi due siano pari; si lascia la corda e la massa d'acciaio si muove in caduta libera dentro il mortaio fino a colpire la carica di campione. Date l'altezza interna del mortaio e l'altezza della massa battente, l'altezza di caduta libera risulta essere pari a 640mm (710-70 mm). Tramite la corda si può sollevare la massa d'acciaio e ripetere la procedura applicando altri colpi al provino. Dopo ciascuna serie di

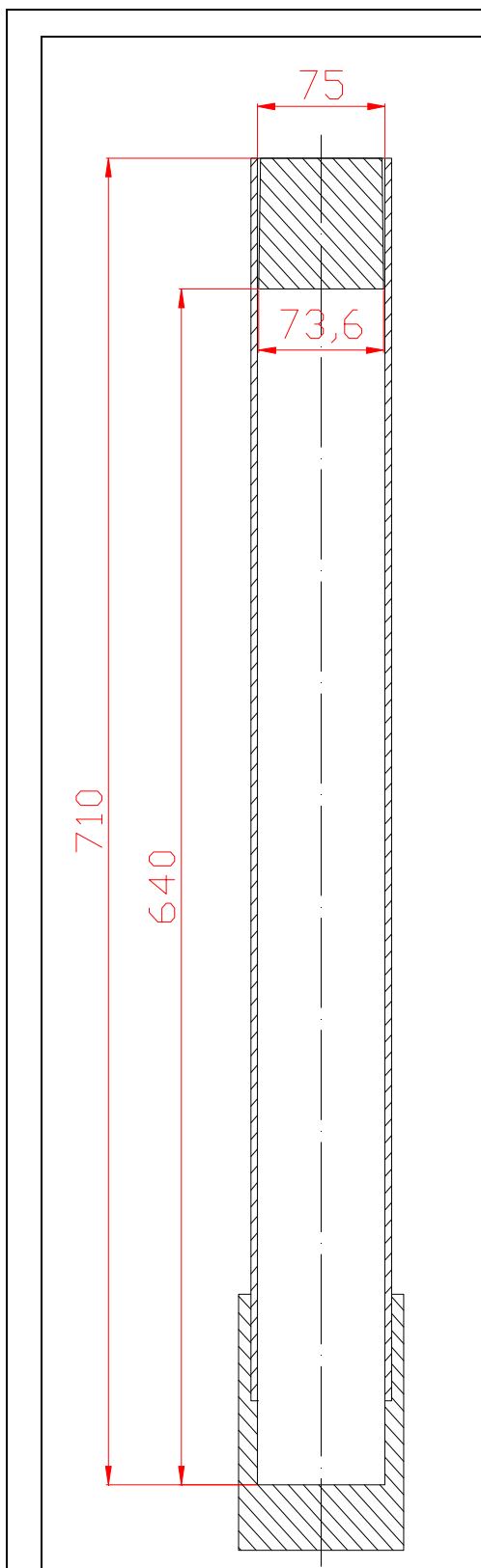


Figura 2.8. Sezione del mortaio e della massa battente

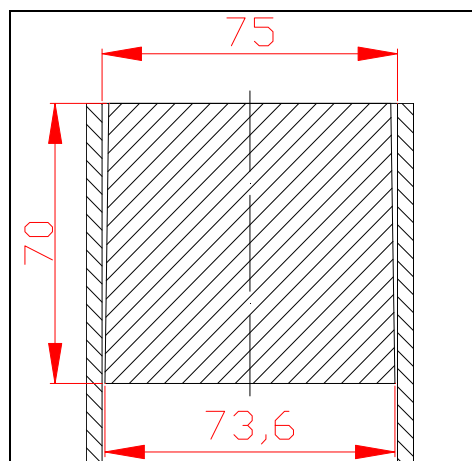


Figura 2.9. Particolare della massa battente inserita nel mortaio.



Figura 2.10. Mortaio e massa battente



Figura 2.11. Bilancia e vaglio con apertura della maglia pari a 0,5 mm.

colpi, si vuota il mortaio ribaltandolo e si effettua la vagliatura manuale per 90 secondi del frantumato mediante vaglio con apertura della maglia pari a 0,5 mm; una volta pesati il passato e il rifiuto mediante una bilancia sensibile a 0,02 g, questi vengono reinserti nel mortaio e sottoposti ad una successiva serie di colpi.

Si procede in questo modo per serie successive di colpi fino ad arrivare ad un valore del passato pari a circa il 30% del peso iniziale del campione.

Proseguendo con i colpi su uno stesso campione aumenta progressivamente la differenza tra il peso iniziale e la somma del passato con il rifiuto a causa dell'aumento della quantità di materiale fine che si perde durante la prova soprattutto nella fase di ribaltamento del mortaio; per questo motivo, il peso del passato viene determinato come differenza tra il peso iniziale del campione e il peso del rifiuto in quanto il materiale perso, essendo di granulometria fine, può essere compreso nel passato stesso. La quantità di materiale perduto si è sempre mantenuta entro il grammo.

Infine, la determinazione dell'indice R.I.H.N., può portare come risultato ad un numero di colpi con cifre decimali ma questo non è fisicamente accettabile in quanto ogni colpo è un numero intero; il numero di colpi che determina l'indice è quindi approssimato per eccesso o per difetto alla cifra intera più vicina.

2.5.2.4 Procedura del R.I.H.N. test a numero di colpi fisso

Per questa prova sono stati utilizzati campioni preparati con le stesse modalità della procedura a colpi variabili ed è stata utilizzata la medesima apparecchiatura. I campioni sottoposti a questa prova sono 10 in totale. Si è fissato il numero di colpi pari a 15, valore che, come precedenti studi hanno dimostrato, è risultato discriminante per la classificazione di materiale metamorfico di natura carbonatica (Bandini, 2007). I campioni sono stati denominati sempre con una lettera maiuscola indicante il blocco di provenienza, la lettera "r" e un numero arabo progressivo a partire dal valore 11.

Una volta applicati i colpi a ciascun campione, si determina il peso del frantumato e quindi si effettua l'analisi granulometrica del frantumato per la quale si è adottata la procedura prevista per gli aggregati per confezione di calcestruzzi (norma UNI 8520), anche se si tratta di analisi granulometriche atipiche, perché il peso dei campioni, in questo caso pari a circa 66 g, è inferiore al peso minimo richiesto dalla normativa in relazione al diametro massimo del frantumato. La setacciatura viene eseguita mediante vibrosetacciatrice: è stata utilizzata una serie di 9 setacci standardizzati UNI, di diametro pari a 200 mm e apertura delle

maglie, rispettivamente, di 16 - 8 - 4 - 2 - 1 - 0,5 - 0,250 - 0,125 - 0,063 mm. Poichè la vibrosetacciatrice utilizzata può contenere al massimo 6 setacci, dapprima ciascun campione è stato setacciato manualmente con i setacci di 16 - 8 - 4 mm, poi si è proceduto ad una setacciatura meccanica del passato a 4 mm per circa 10 minuti (la vagliatura va continuata fino a quando si verifichi un passaggio di materiale minore dello 0,1% della massa giacente su ogni setaccio, nel tempo di 1 minuto).

Si è poi proceduto con la pesatura del materiale trattenuto da ciascun setaccio mediante una bilancia sensibile a 0,02 g e, sulla base di questi valori e dell'apertura della maglia dei setacci utilizzati, si è determinata la curva granulometrica per ciascuna carica.

2.5.2.5 Osservazioni sull'indice R.I.H.N.

Da quanto emerso, la determinazione dell'indice R.I.H.N., risulta speditiva e adatta ai cicli di lavoro in cantiere in quanto l'attrezzatura richiesta è di semplice costruzione, piccole dimensioni e facilmente trasportabile; inoltre, i campioni, ottenibili facilmente con frantoio o con martello e scalpello, non richiedono alcun tipo di preparazione preventiva. Tutto questo, oltre al fatto che i risultati si sono dimostrati omogenei e ripetibili come diverse ricerche hanno messo in evidenza, fa sì che la prova sia applicabile ad un elevato numero di campioni con bassi costi unitari.

Inoltre, diversi studi condotti su materiali differenti (Berry et al. 1984, Tagliavini 2004, Gotti 2007) hanno dimostrato la correlazione esistente tra l'indice R.I.H.N. e le prove standard di caratterizzazione del materiale roccioso (compressione, trazione, point load, flessione) come mostrato in Tabella 2.2.

Questo aspetto unito ai bassi costi unitari necessari per il R.I.H.N. test, è di notevole importanza in quanto, attraverso la conoscenza dei valori del R.I.H.N., permette una stima preventiva e una conoscenza di valori ricavabili con altre prove di laboratorio molto più costose e lunghe da eseguire. Il R.I.H.N. può quindi essere preso in considerazione come parametro rappresentativo della resistenza dei materiali rocciosi per lo studio di diverse operazioni tipicamente minerarie.

Litotipi	R.I.H.N.	σ_f (MPa)	σ_t (MPa)
Tufo	5,4	7,1	0,7
Peperino rosso	7,8	22,0	2,6
Peperino grigio	10,1	21,4	2,2
Calcarea marnoso	39,6	99,7	8,6
Marna	20,6	56,1	6,9
Calcarea	46,1	165,0	7,5
Anidrite	9,6	73,0	5,0
Skarn	108,4	156,5	18,0
Skarn ad ilvaite	16,5	113,5	4,6
Skarn a hedembergite	25,0	53,0	4,1
Epidosite	54,6	136,8	12,1
Porfido quarzifero	72,9	190,0	10,4
Leucite	75,4	219,5	14,1
Eclogite	122,8	274,8	23,7

Tabella 2.2. Valori di RIHN, resistenza a compressione uniassiale e resistenza a trazione (in MPa) di alcuni litotipi (Berry et al., 1984).

2.5.2.6 Osservazioni sulla strumentazione per il R.I.H.N. test

Dalle varie prove eseguite per la determinazione dell' indice R.I.H.N., sono emerse delle criticità legate sia alla strumentazione utilizzata, sia alla procedura eseguita: l'inserimento della carica nel mortaio avviene dall'alto lasciando cadere il provino e questo può provocarne un'alterazione a causa dell'urto del campione stesso con il fondo del mortaio (possibile fratturazione o rottura che alterano l'analisi portando ad una sottostima del numero di colpi); inoltre, al termine di ciascuna serie di colpi, il mortaio contenente il frantumato viene svuotato ribaltandolo e questo può comportare sia una perdita della frazione più fine di materiale, sia una possibile variazione della granulometria a causa degli urti reciproci tra i vari frammenti di materiale.

In base a queste osservazioni, si ritiene necessaria una modifica della strumentazione: in particolare, l'utilizzo di un mortaio non chiuso dotato di un sistema di apertura alla base o svincolamento del fondo dal cilindro può eliminare le criticità emerse, in quanto permette l'inserimento della carica direttamente sul fondo e, parimenti, il prelevamento del frantumato senza necessità di ribaltare il mortaio; il sistema deve comunque garantire un'ottima tenuta per evitare le perdite di materiale più fine che andrebbe disperso nell'aria.

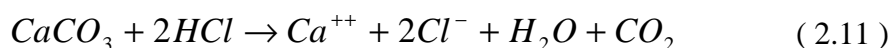
2.6 Proprietà chimico-mineralogiche

Data la variabilità dei risultati ottenuti mediante il R.I.H.N. test (come sarà mostrato nel capitolo seguente), sui residui di materiale utilizzati per questa prova sono state effettuate prove che mettessero in luce la composizione chimica e mineralogica dei campioni stessi, al fine di verificare una possibile correlazione tra queste caratteristiche e i risultati del R.I.H.N. test. Sono quindi state effettuate prove di laboratorio sui campioni utilizzati per il R.I.H.N. test con lo scopo di determinare il quantitativo di carbonato di calcio presente e il comportamento all'incidenza dei raggi X sempre dei medesimi provini.

2.6.1 Analisi calcimetriche

Per analisi calcimetrica si intende il procedimento che porta alla determinazione diretta, in una roccia, del contenuto in carbonati calcolati, per convenzione, come carbonato di calcio ($CaCO_3$).

Le apparecchiature utilizzate in questo tipo di analisi prendono il nome di calcimetri e ne esistono di diverse tipologie in base al principio di funzionamento: in questo caso si è utilizzato un calcimetro basato su principi volumetrici, ovvero si determina la percentuale in peso di $CaCO_3$ misurando un determinato volume di CO_2 prodotto attraverso la reazione del carbonato con acido cloridrico:



in questa reazione l'anidride carbonica prodotta si libera allo stato gassoso e si allontana dal sistema; dalla misura del suo volume si risale analiticamente alla quantità in peso di carbonato di calcio.

2.6.1.1 Procedura ed espressione dei risultati

Per la misura del quantitativo di carbonato di calcio presente nei campioni in esame si è utilizzato un calcimetro di Dietrich-Fruhling.

Il materiale da utilizzare viene macinato finemente fino a passare attraverso la maglia di un setaccio con apertura pari a $63\mu m$, successivamente viene messo in stufa a $75^\circ C$ per un giorno e lasciato raffreddare in un essiccatore con sali assorbiti umidità fino a portarlo alla temperatura ambiente. La quantità di materiale da utilizzare dipende dai valori di pressione e temperatura presenti in laboratorio

al momento della prova poiché essi influiscono sulla reazione chimica e quindi, sul risultato del test: si misura la pressione e la temperatura presenti in laboratorio e, per mezzo di apposite tabelle, si trova il valore corrispondente di massa di materiale (in grammi) da utilizzare; in particolare il valore della massa del campione deve essere determinato fino al decimillesimo di grammo.

Una volta determinata la quantità di materiale, con riferimento allo schema del calcimetro di Dietrich-Fruhling (Figura 2.12) si procede nel seguente modo (Rabbi, 1972): nella beuta (1) si introduce la provetta (2) contenente 6-7 cm³ di acido cloridrico (*HCl*) diluito in acqua distillata e la quantità predeterminata di campione macinato, in modo che la provetta appoggi sul fondo e su di una parete della beuta così da rimanere inclinata senza però che si versi il liquido in essa contenuto. Nella buretta (4) e nel pallone (5) aperto verso l'alto è contenuta acqua eventualmente colorata per facilitare la lettura; i due recipienti, buretta e pallone, sono messi in comunicazione mediante un tubo di plastica in modo da formare un sistema di vasi comunicanti. La buretta presenta una graduazione principale da 0 a 200 cm³ e una graduazione secondaria che permette di stimare 0,5 cm³.

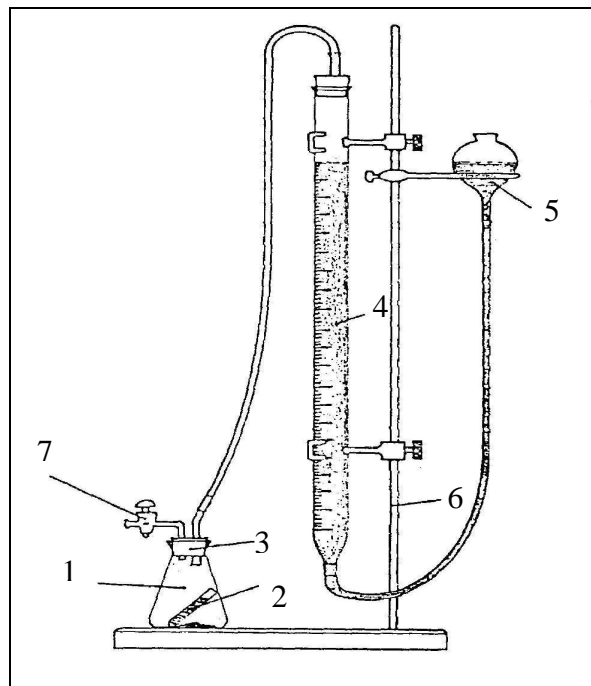


Figura 2.12. Schema del calcimetro di Dietrich-Fruhling (Rabbi, 1972).

Prima di dare inizio alla reazione fra il campione frantumato da analizzare e l'acido cloridrico, occorre azzerare la buretta, cioè portare il liquido in essa contenuto sulla tacca 0: questa operazione si esegue facendo scorrere lungo il

supporto (6) il pallone (5) in modo che il livello dell'acqua nel pallone e quello della buretta (che, come detto, sono in comunicazione tra loro) coincidano con la tacca 0 della buretta. Fatto questo si chiude bene la beuta mediante il tappo di gomma (3) e questa operazione di chiusura fa sì che l'acqua contenuta nella buretta (4) si abbassi leggermente in quanto il tappo (3) introdotto nella beuta (1), esercita una pressione sull'aria presente nella beuta stessa; per ristabilire il livello dell'acqua precedentemente fissato nella buretta è sufficiente aprire il rubinetto (7) comunicante con l'esterno: in questo modo la pressione nella beuta viene automaticamente riequilibrata con quella esterna.

A questo punto inizia l'analisi vera e propria:

- a) si inclina la beuta (1) in modo che l'acido cloridrico contenuto nella provetta (2) fuoriesca e venga a contatto con il materiale frantumato da analizzare;
- b) si agita la beuta per 2-3 minuti in modo che la reazione (2.11) possa svolgersi completamente;
- c) la colonna d'acqua contenuta nella buretta scende a causa dell'aumento di volume dovuto alla liberazione di CO_2 ;
- d) si rende necessario togliere il pallone (5) dal suo supporto e farlo discendere contemporaneamente all'acqua nella buretta (4) in modo che il liquido sia sempre approssimativamente allo stesso livello nei due tubi;
- e) si pone la beuta (1) in un recipiente pieno di acqua in modo da raffreddarlo e ricondurlo alla temperatura ambiente;
- f) una volta che si è sviluppata tutta l'anidride carbonica e il sistema è tornato alla temperatura ambiente, l'acqua nella buretta si arresta in un punto di equilibrio corrispondente al volume di CO_2 liberato: si conducono le colonne d'acqua della buretta e del pallone al medesimo livello e si effettua la lettura del volume mediante la scala graduata presente sulla buretta.

Dalla lettura del volume di gas prodotto dalla reazione si risale direttamente alla percentuale di carbonato di calcio presente nel campione mediante valori tabulati che tengono conto anche delle correzioni da apportare ai valori misurati (correzioni dovute all'anidride carbonica assorbita dalla soluzione cloridrica).

Il quantitativo di carbonato di calcio presente nel campione in esame viene espresso in percentuale.

2.6.1.2 Preparazione dei campioni

Per questa prova sono stati utilizzati alcuni campioni già impiegati nel R.I.H.N. test: fra tutti i campioni disponibili, sono stati scelti quelli che hanno dato i risultati più discordanti all'interno di ciascun blocco, ovvero il valore più alto e più basso di R.I.H.N.

Una volta selezionati i campioni, per ciascuno di essi, si è proceduto alla separazione del passato e del rifiuto mediante vaglio con maglia di apertura pari a 0,5 mm e successivamente, sia passato che rifiuto, sempre tenuti separati, sono macinati finemente fino ad una granulometria inferiore a 0,063 mm. Passato e rifiuto di ciascun campione R.I.H.N. scelto vengono quindi sottoposti separatamente alla prova mediante calcimetro per la determinazione del quantitativo di carbonato di calcio.

Per identificarli, si è utilizzata la nomenclatura già usata per i campioni R.I.H.N. con l'aggiunta di una lettera maiuscola "P" o "R" a seconda che si tratti del passato del rifiuto del R.I.H.N. test: ad esempio, il campione Gr3P, è il campione sottoposto ad analisi calcimetrica ottenuto dal passato del campione R.I.H.N. Gr3.

2.6.2 Analisi diffrattometriche

L'analisi diffrattometrica a raggi X permette di individuare, attraverso il fenomeno della diffrazione, le distanze interplanari del reticolo cristallino caratteristiche delle diverse fasi mineralogiche e quindi, di riconoscere le fasi mineralogiche stesse presenti in un campione opportunamente preparato.

La prova si basa sul fenomeno della diffrazione che avviene quando un'onda elettromagnetica, nello specifico una radiazione X, colpisce il reticolo cristallino dei minerali componenti il campione (Ciabatti e Del Monte). Si utilizzano i raggi X poiché sono onde elettromagnetiche con lunghezza d'onda dello stesso ordine di grandezza delle dimensioni dei reticoli cristallini, e questa condizione è necessaria affinché avvenga il fenomeno della diffrazione.

Quando un'onda elettromagnetica si propaga attraverso una porzione di materia, ogni punto materiale, colpito dal moto ondulatorio, diventa esso stesso un centro di riemissione di onde che si propagano in tutte le direzioni con fronti d'onda sferici. Mentre nei gas, nei liquidi e nelle sostanze amorfe, caratterizzate da un ordinamento statistico delle particelle, l'onda incidente viene diffusa con intensità circa uguale nelle diverse direzioni dello spazio, nei cristalli,

caratterizzati da un ordinamento omogeneo con punti materiali situati in posizioni fisse del reticolo fra loro equidistanti, la diffusione dei raggi avviene in modo da realizzarsi un aumento dell'intensità in quelle direzioni nelle quali, i raggi diffusi da due o più atomi, hanno sfasamento uguale a un multiplo della lunghezza d'onda λ dell'onda incidente.

Fu Laue che calcolò per primo le condizioni che portano a un raggio diffratto quando un fascio di raggi X colpisce un reticolo cristallino: sia F un filare e a il periodo; detto α l'angolo con cui un fascio di raggi X (AA_1) incide sul filare e i l'angolo con cui il fascio diffratto (BB_1) si allontana (Figura 2.13).

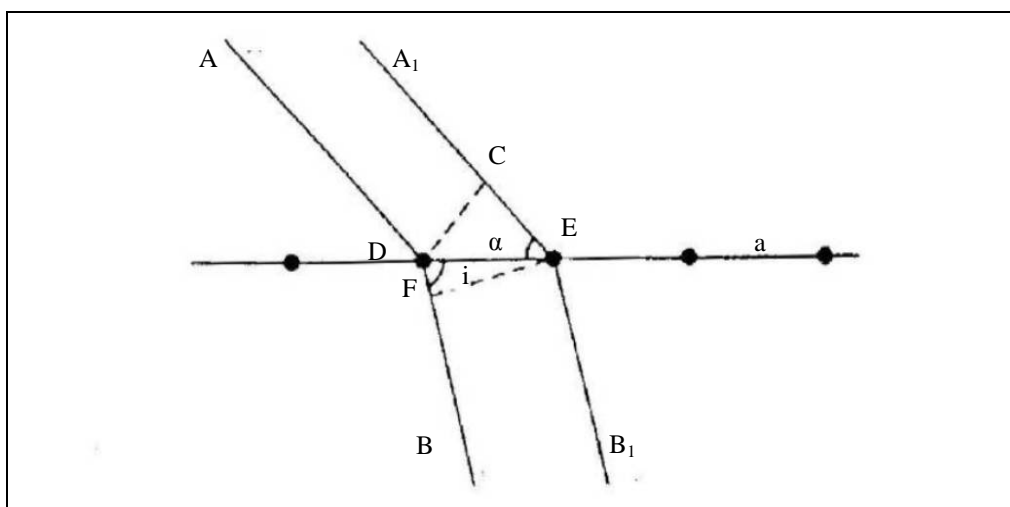


Figura 2.13. Diffrazione dei raggi X secondo Laue (Ciabatti e Del Monte).

Si dimostra che, essendo la differenza di cammino fra i due raggi AA_1 e BB_1 , cioè lo sfasamento, data da $CE-DF$, si avrà rafforzamento e quindi un raggio diffratto quando:

$$a(\cos \alpha - \cos i) = n\lambda \quad (2.12)$$

dove n è un numero intero.

In un reticolo cristallino formato da filari nelle tre direzioni dello spazio la diffrazione avrà luogo quando sarà soddisfatto il sistema di equazioni:

$$\begin{cases} a(\cos \alpha - \cos i_1) = n_1\lambda \\ b(\cos \beta - \cos i_2) = n_2\lambda \\ c(\cos \gamma - \cos i_3) = n_3\lambda \end{cases} \quad (2.13)$$

dove:

$a, b, c \rightarrow$ periodi del reticolo cristallino

$\alpha, \beta, \gamma, \rightarrow$ angoli di incidenza che il fascio forma con i tre assi

$i_1, i_2, i_3, \rightarrow$ angoli che il raggio dirifratto forma sempre coi tre assi

Un altro modo di vedere questo fenomeno fu proposto da Bragg: le onde X che colpiscono una lamina cristallina si allontanano come se fossero riflesse da piani reticolari, e poiché il potere riflettente di ogni singolo piano è molto debole, l'onda riflessa è originata dalla somma delle onde riflesse da un elevato numero di piani paralleli (cioè da un set di piani) e affinché tutte queste onde si rafforzino a vicenda è necessario che siano in concordanza di fase.

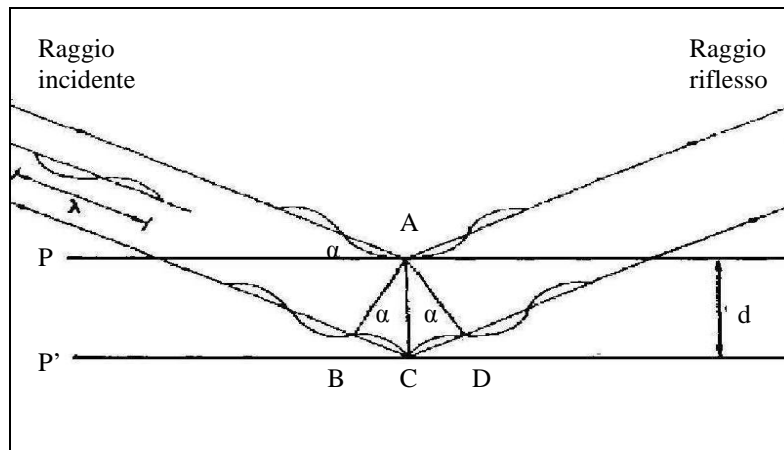


Figura 2.14. La riflessione dei RX sui piani reticolari secondo Bragg (Ciabatti e Del Monte).

Nella figura soprastante (Figura 2.14), i piani sottostanti del reticolo sono incontrati dai raggi incidenti con un piccolo ritardo rispetto a quello superficiale. I raggi riflessi dal piano P' saranno sfasati rispetto a quelli riflessi del piano P di un tratto:

$$BC + CD = \text{sfasamento} = \varphi \quad (2.14)$$

Se indichiamo con d la distanza interplanare si avrà:

$$BC = d \sin \alpha \quad (2.15)$$

dove α è l'angolo di incidenza uguale a BAC perché complementare dello stesso angolo. Ma anche:

$$CD = d \sin \alpha \quad (2.16)$$

da cui risulta:

$$\varphi = 2d \sin \alpha \quad (2.17)$$

Solo quando φ sarà uguale a un numero intero di lunghezze d'onda, cioè quando sarà soddisfatta l'equazione

$$2d \sin \alpha = n\lambda \quad (2.18)$$

con $n = 1, 2, 3, \dots$ si avrà interferenza positiva tra i raggi riflessi che abbandoneranno i cristalli nella direzione rr' . L'equazione sopra citata (2.18) è l'equazione di Bragg.

Facendo variare l'angolo di incidenza α (Figura 2.15) un fascio di raggi X di una data lunghezza d'onda λ darà luogo a riflessioni solo quando saranno soddisfatte le equazioni:

$$\left\{ \begin{array}{l} 2d \sin \alpha_1 = 1\lambda \\ 2d \sin \alpha_2 = 2\lambda \\ 2d \sin \alpha_3 = 3\lambda \\ \dots\dots\dots = \dots \\ 2d \sin \alpha_n = n\lambda \end{array} \right. \quad (2.19)$$

La riflessione dei raggi X sui reticoli cristallini differisce perciò macroscopicamente dalla riflessione di un fascio di luce su di una superficie speculare, perché in questa, per ogni valore dell'angolo di incidenza, si ha un raggio riflesso, mentre, nel caso dei raggi X, pur variando con continuità l'inclinazione del raggio incidente, si ha una riflessione discontinua corrispondente cioè a soli alcuni valori di α . Il modello proposto da Bragg è tuttavia molto più elementare di quello del Laue, in quanto vede l'interazione tra i raggi X e i reticoli cristallini, come una semplice riflessione degli X appunto sul set di piani reticolari.

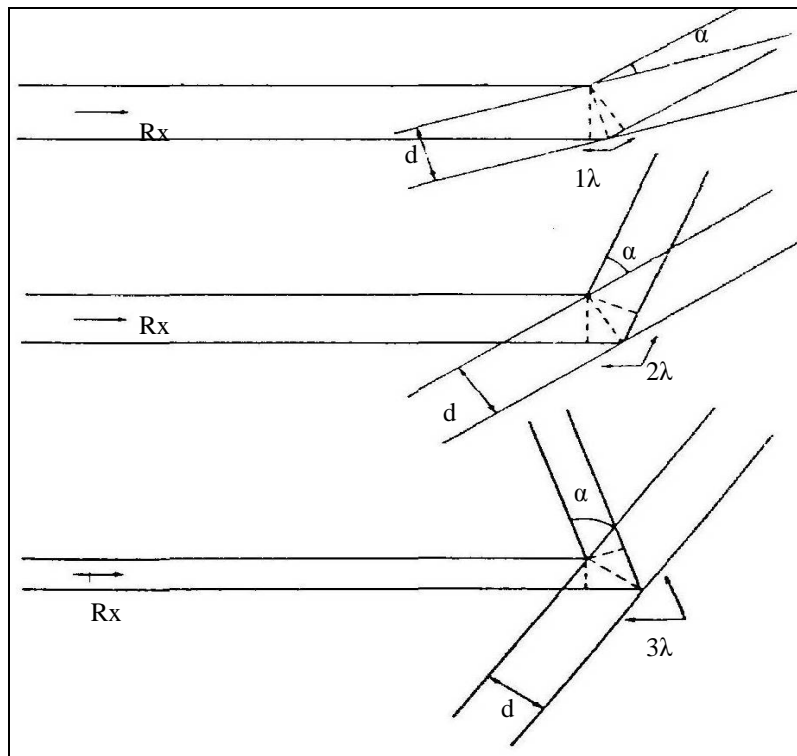


Figura 2.15. Geometria delle riflessioni di primo, secondo, e terzo ordine secondo Bragg (Ciabatti e Del Monte).

2.6.2.1 Procedura

Per eseguire l'analisi diffrattometrica si utilizza il diffrattometro che è uno strumento che permette l'identificazione di uno o più minerali sfruttando l'equazione di Bragg.

Il minerale da analizzare viene macinato (granulometria inferiore a $63 \mu\text{m}$) e una quantità di alcuni decimi di grammo viene miscelata con acqua deionizzata così da formare un impasto che viene spalmato su di un vetrino portacampione in modo da avere uno strato di materiale uniforme e il più sottile possibile. Quando il preparato è completamente asciutto si può procedere all'analisi.

Il funzionamento dello strumento si può schematizzare in questo modo (Figura 2.16): il vetrino porta campione è posto al centro di un goniometro e ruota lentamente. Il fascio monocromatico di raggi X colpisce il preparato e viene discontinuamente riflesso; il raggio riflesso viene rivelato da un contatore Geiger che, ionizzato, rileva il fascio riflesso come una corrente elettrica proporzionale all'intensità del raggio stesso. A ogni raggio riflesso corrisponde cioè un impulso che viene amplificato da una catena elettronica, e i segnali vengono infine registrati su carta o memoria digitale. Come si nota dalla Figura 2.16, l'angolo di

riflessione viene misurato rispetto al raggio incidente e non rispetto al piano di riflessione. Il contatore raccoglie quindi il raggio riflesso ad un angolo 2α per ogni angolo di riflessione α .

Il porta campione, montato sul goniometro, inizia a ruotare e contemporaneamente viene colpito dal fascio di raggi X che viene riflesso e registrato dal contatore geiger; in particolare, il fascio viene riflesso non da un singolo granulo di materiale ma da tutti i granuli isorientati.

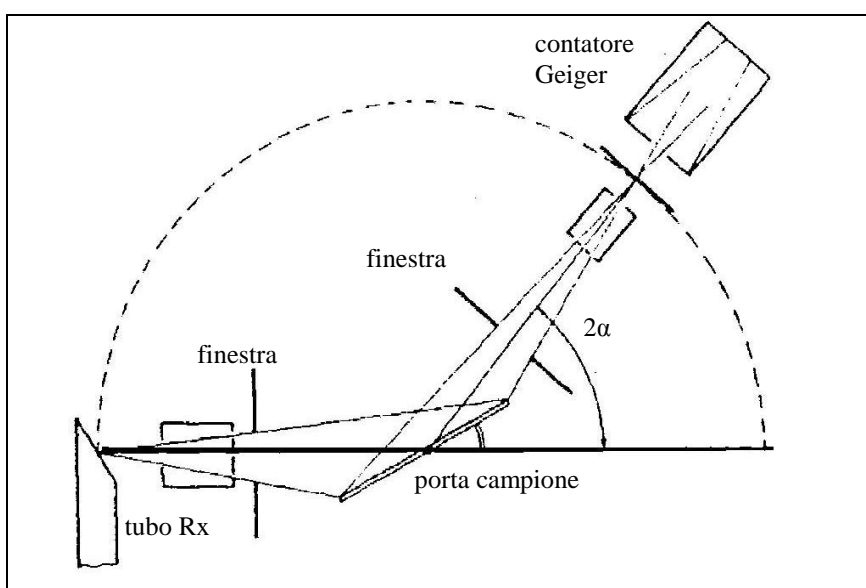


Figura 2.16. Geometria di un diffrattometro a raggi X (Ciabatti e Del Monte).

Il risultato dell'analisi è il diffrattogramma ovvero un grafico con, in ascisse, 2α , in ordinata l'intensità relativa registrata dal contatore geiger, e rappresenta gli angoli (2α) lungo i quali si ha avuto la riflessione del fascio di raggi X; se il minerale è cristallino, sono sempre visibili una serie di picchi caratterizzati ognuno dalla posizione angolare (che per ragioni strumentali è 2α , cioè due volte l'angolo di riflessione dell'equazione di Bragg) leggibile sull'ascissa, e da un'intensità (pari all'altezza del picco) che si legge in ordinata: per ogni valore di α , risolvendo l'equazione di Bragg, si ottiene un valore di d .

Posto uguale a 100 il picco più alto (h_{max} espressa in cm) le intensità relative (I/I_0) di qualunque altro picco (h_x) si ottengono con la semplice proporzione

$$h_{max} : 100 = h_x : x \quad (2.20)$$

I picchi sono in genere molti, uno per ogni set di piani per cui si è avuta riflessione; per il riconoscimento univoco del minerale incognito si utilizzano

apposite tabelle dove sono riportati i valori d dei picchi di tutti i minerali: con tre valori di d relativi ai tre picchi di maggior intensità è possibile riconoscere un minerale.

Le analisi sono state effettuate presso il laboratorio di diffrazione a raggi X del Dipartimento di Scienze della Terra e Geo-Ambientali dell'Università di Bologna ed è stato utilizzato un diffrattometro a polveri. Le condizioni operative sono state le seguenti:

- alimentazione generale 40kV, 30 mA, $\text{CuK}\alpha$;
- monocromatore secondario in grafite;
- conteggio ogni 0.020 (2α);
- velocità di scansione 1° (2α) al minuto;
- intervallo di acquisizione angolare 3° - 65° (2α).

2.7 Sezioni sottili

Per poter effettuare lo studio petrografico e tessiturale mediante microscopio polarizzatore, sono state preparate sezioni sottili a partire da campioni di materiale prelevati dai blocchi in esame.

Si è proceduto innanzitutto al carotaggio mediante carotiere di 2,54 cm di diametro, ottenendo dei provini cilindrici di altezza pari a circa 1 cm. Dal cilindro vengono tagliate porzioni di materiale a facce piane e parallele dello spessore di qualche millimetro e se ne rettifica una delle due basi con polvere abrasiva e acqua. La superficie così preparata viene incollata su un vetrino portaoggetti mediante resina epossidica. Si procede quindi alla levigatura dell'altra faccia fino ad ottenere uno spessore di roccia pari a $30\mu\text{m}$.

Capitolo 3

RISULTATI SPERIMENTALI

3.1 Caratteristiche fisiche

La determinazione della massa volumica apparente e della porosità aperta è stata eseguita su tutti i campioni carotati dai blocchi di partenza. I valori ottenuti risultano simili per campioni appartenenti allo stesso blocco e anche tra campioni appartenenti a blocchi diversi. Per questi motivi, la successiva misura della massa volumica reale mediante picnometro e la conseguente determinazione della porosità totale, è stata eseguita solo su cinque provini, ciascuno appartenente a blocchi diversi; il valore ottenuto da ognuno di questi cinque provini è stato poi assegnato a tutti i campioni dello stesso blocco e a quelli appartenenti a blocchi con valori simili di massa volumica apparente e porosità aperta. Una volta note la massa volumica apparente e la massa volumica reale, è stato possibile determinare la porosità totale per tutti i campioni.

Nella tabella seguente (Tabella 3.1), vengono riportati i valori della massa volumica reale ρ_r , espressa in kg/m^3 e misurata su cinque campioni:

Campione	Φ	h	ρ_r
	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>kg/m³</i>
A4	38,0	76,0	2759
D6p	38,0	76,3	2730
E2	38,0	76,2	2750
F2	38,0	77,1	2738
H1	38,0	72,5	2738

Tabella 3.1. Valori della massa volumica reale

Nella tabella seguente, vengono riportati i valori della massa volumica apparente (ρ_b), della massa volumica reale (ρ_r) espresse in kg/m^3 , della porosità aperta (p_o) e della porosità totale (p):

Campione	Φ	h	ρ_b	ρ_r	p_o	p
	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>kg/m³</i>	<i>kg/m³</i>	<i>%</i>	<i>%</i>
A2	38,0	75,8	2735	2759	0,54	0,86
A3	38,0	76,2	2722	2759	0,61	1,32
A4	38,0	76,0	2729	2759	0,59	1,09
A5	38,0	76,1	2728	2759	0,57	1,12
B1	38,0	72,9	2700	2738	0,90	1,38
B3	38,0	77,2	2695	2738	0,85	1,57
B4	38,0	75,2	2695	2738	0,90	1,56
B9	38,0	76,2	2699	2738	0,99	1,42
B10	38,0	77,3	2700	2738	0,87	1,36
B2	53,9	112,0	2700	2738	0,86	1,39
B2p	38,0	75,1	2697	2738	0,83	1,50
B3p	38,0	77,0	2698	2738	0,87	1,44
B1p	54,0	112,7	2703	2738	0,83	1,27
C1	54,0	110,2	2706	2738	0,62	1,15
C2	38,0	76,4	2701	2738	0,61	1,33
C2bis	38,0	76,2	2706	2738	0,65	1,16
C3	38,0	76,3	2704	2738	0,61	1,23
C3bis	38,0	75,9	2705	2738	0,69	1,18
C4	38,0	75,7	2702	2738	0,68	1,31
D1	38,0	75,8	2689	2730	1,19	1,51
D2	38,0	76,4	2688	2730	1,24	1,56
D3	38,0	76,3	2683	2730	1,27	1,72
D4	38,0	73,2	2687	2730	1,16	1,57
D5	38,0	74,5	2685	2730	1,20	1,65
D6	38,0	76,3	2685	2730	1,21	1,64
D7	38,0	74,4	2689	2730	1,13	1,50
D8	38,0	74,9	2685	2730	1,21	1,65
D5p	38,0	76,0	2688	2730	1,17	1,53
D6p	38,0	76,3	2686	2730	1,21	1,61
D2p	53,9	110,2	2685	2730	1,24	1,65

Campione	Φ	h	ρ_b	ρ_r	ρ_o	ρ
	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>kg/m³</i>	<i>kg/m³</i>	<i>%</i>	<i>%</i>
E1	38,0	78,2	2718	2750	0,70	1,16
E1bis	38,0	76,2	2707	2750	0,72	1,54
E2	38,0	76,2	2718	2750	0,68	1,15
E2bis	38,0	77,0	2719	2750	0,71	1,12
E3	38,0	74,2	2714	2750	0,69	1,29
E4	53,9	111,0	2723	2750	0,62	0,97
F2	38,0	77,1	2704	2738	0,90	1,23
F4	38,0	76,8	2692	2738	1,03	1,69
F5	38,0	77,3	2693	2738	0,98	1,63
F7	38,0	78,3	2698	2738	0,90	1,47
F8	38,0	77,3	2696	2738	0,88	1,53
F1bis	53,9	111,8	2703	2738	0,83	1,29
F3bis	53,9	112,5	2702	2738	0,73	1,33
F9bis	54,0	111,3	2708	2738	0,80	1,09
F4p	38,0	77,3	2696	2738	0,83	1,53
F1p	53,9	113,0	2696	2738	0,78	1,52
G1	38,0	76,2	2733	2759	0,54	0,92
G2	38,0	75,0	2729	2759	0,54	1,07
G3	38,0	75,6	2732	2759	0,54	0,98
G4	38,0	75,1	2726	2759	0,54	1,17
G2p	54,0	110,4	2729	2759	0,51	1,07
G6p	54,0	110,0	2726	2759	0,49	1,20
H1	38,0	72,5	2708	2738	0,67	1,07
H1bis	38,0	74,9	2698	2738	0,76	1,46
H2	38,0	73,0	2705	2738	0,66	1,18
H2bis	38,0	75,1	2701	2738	0,70	1,35
L1	38,0	76,1	2712	2750	0,61	1,37
L2	38,0	76,2	2717	2750	0,67	1,17
M1	38,0	76,0	2702	2738	0,64	1,30
M2	38,0	76,1	2702	2738	0,65	1,31
M3	38,0	75,9	2703	2738	0,69	1,25
N1	38,0	76,1	2704	2738	0,58	1,23
N2	38,0	75,6	2703	2738	0,58	1,28

Tabella 3.2.Valori delle grandezze fisiche

Nella figura seguente (Figura 3.1), viene riportato l'istogramma dei valori ottenuti per la massa volumica apparente, espressa in kg/m^3 .

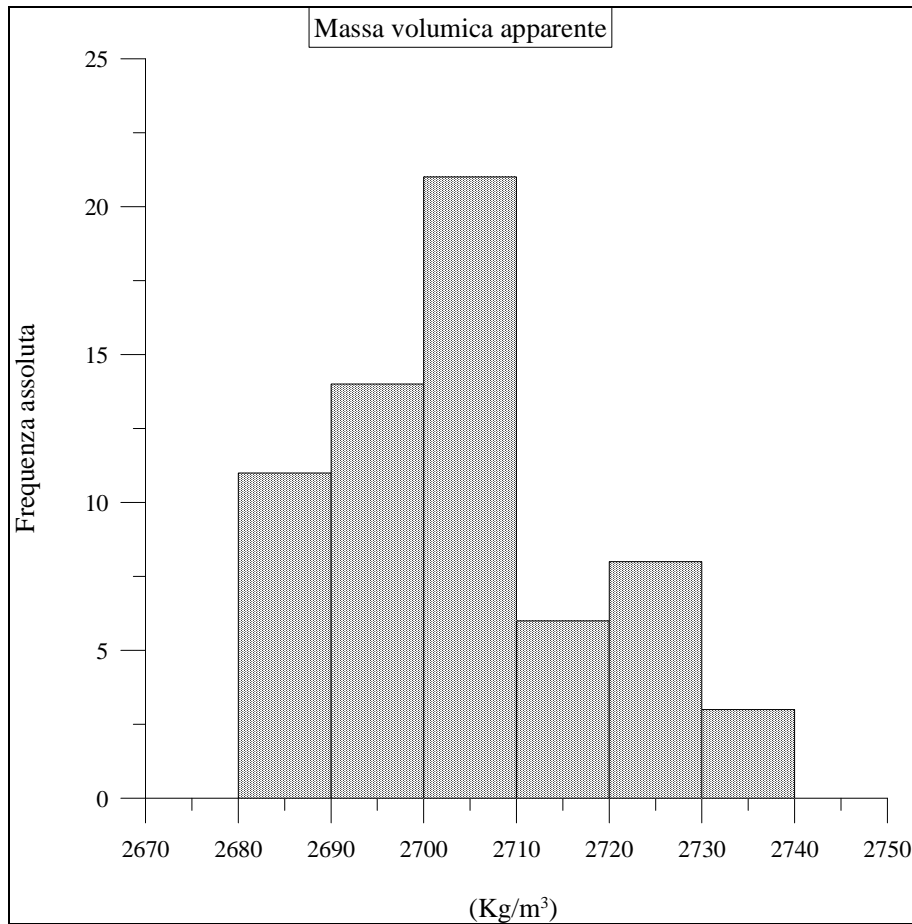


Figura 3.1. Istogramma dei valori della massa volumica apparente.

I valori variano in un intervallo compreso tra 2683 e 2735 kg/m^3 ; osservando i valori tabulati, si nota come, campioni appartenenti allo stesso blocco presentano valori molto simili tra loro e, inoltre, gruppi diversi di blocchi presentano, mediamente, gli stessi valori:

- per il blocco D i valori risultano compresi all'interno di un range tra 2683 e 2689 kg/m^3 risultando pressoché costante.
- per i blocchi B, C, F, H, M, N i valori di massa volumica apparente, risultano interni ad un intervallo con valori estremi pari a 2692 e 2708 kg/m^3 ;
- per i blocchi E ed L i valori variano tra 2707 e 2723 kg/m^3 ;

- per i blocchi A e G si ha variabilità variano all'interno di un campo compreso tra $2722 \div 2735 \text{ kg/m}^3$.

Nella figura seguente (Figura 3.2) viene visualizzato l'istogramma relativo ai valori di porosità totale espressi in percentuale.

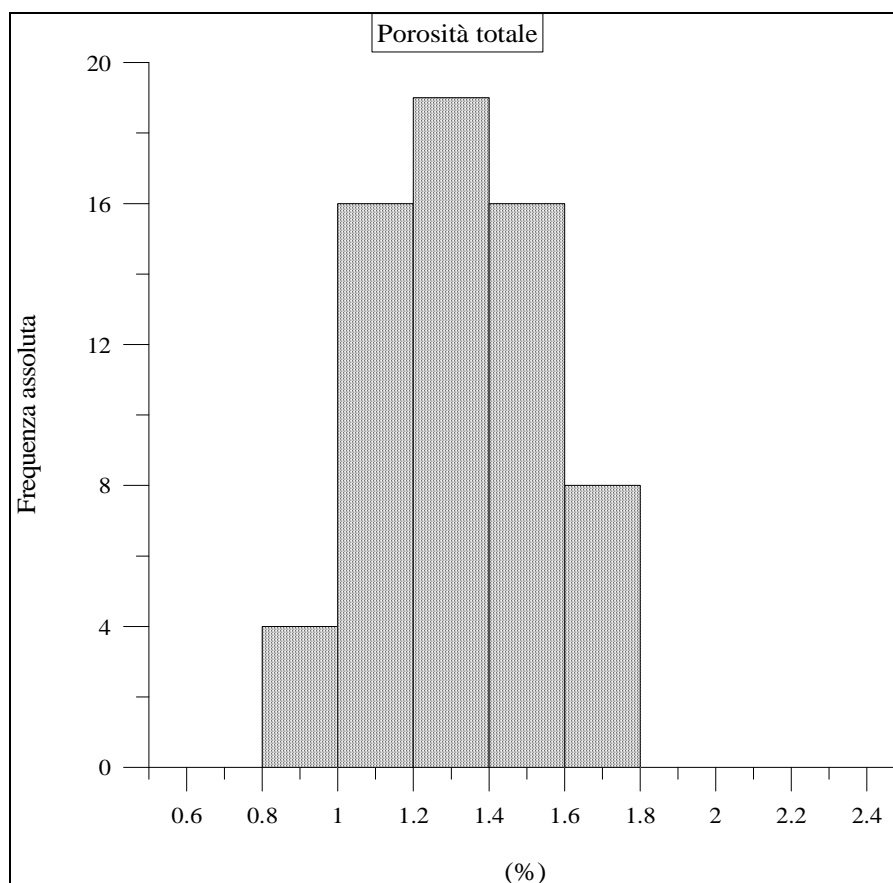


Figura 3.2. Iistogramma dei valori di porosità totali.

I valori, in generale, variano all'interno di un campo ristretto (0,86-1,72 %); la porosità totale dei campioni testati è attestata su valori molto bassi, tipici di una roccia metamorfica che ha subito un processo di ricristallizzazione.

3.2 Caratteristiche dinamiche

Vengono riportati nella tabella seguente (Tabella 3.3) i valori delle velocità di propagazione delle onde P ed S per provini sottoposti a una tensione di compressione pari a 4 MPa. In particolare, sono tabulati i valori di velocità delle

onde longitudinali nei provini in condizioni secche e saturate, e i valori delle velocità delle onde di trasversali nelle sole condizioni secche.

In particolare, i valori delle velocità di propagazione delle onde trasversali S (in condizioni secche) eseguite lungo due direttrici ortogonali dei provini cilindrici (onde S1 ed S2 polarizzate ortogonalmente) vengono mediati, e si considera la loro media come valore di velocità delle onde trasversali nei provini; tale operazione è giustificata dal fatto che i valori V_{S1} e V_{S2} risultano approssimabili.

Campione	V_{P-sec}	V_{P-sat}	V_{S-sec}
	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>
A2	5782	6419	2897
A3	5111	5858	2770
A4	5471	6182	2740
A5	5473	6038	2752
B1	3938	5647	2112
B3	3591	5515	1968
B4	3878	5451	2119
B9	3866	5642	2126
B10	4248	5769	2209
B2	3623	5306	2097
B2p	3953	5690	2110
B3p	3949	5663	2045
B1p	3707	5635	2052
C1	3812	5537	2169
C2	4518	5784	2126
C2bis	4380	5687	2265
C3	3994	5693	2019
C3bis	4057	5791	2116
C4	4231	5694	2072
D1	3354	5191	1744
D2	3321	5161	1799
D3	3438	5375	1920
D4	3358	5229	1842
D5	3266	5101	1705
D6	3452	5155	1775

Campione	V _{P-sec}	V _{P-sat}	V _{S-sec}
	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>
D7	3293	5278	1730
D8	3499	5349	1764
D5p	3584	5277	1907
D6p	3652	5300	1860
D2p	3070	5274	1865
E1	5392	6015	2768
E1bis	4675	5817	2396
E2	5330	6002	2647
E2bis	5272	6013	2846
E3	4819	5844	2699
E4	5260	5967	2921
F2	4759	5796	2440
F4	3879	5334	1928
F5	3925	5563	2019
F7	3820	5515	2013
F8	3883	5599	1941
F1bis	3318	5647	1948
F3bis	3616	5624	2029
F9bis	4060	5676	2347
F4p	4049	5524	1905
F1p	3071	5407	1834
G1	5860	6402	2902
G2	5772	6306	2853
G3	5863	6199	2876
G4	5822	6312	3348
G2p	5842	6100	3033
G6p	5882	6044	2977
H1	4215	5619	2321
H1bis	4073	5721	2076
H2	4268	5702	2297
H2bis	4242	5732	2155
L1	5007	5899	2576
L2	4702	5728	2565
M1	4395	5848	2391

Campione	$V_{P\text{-sec}}$	$V_{P\text{-sat}}$	$V_{S\text{-sec}}$
	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>
M2	4134	5720	2180
M3	4544	5837	2418
N1	4133	5850	2227
N2	4502	5818	2208

Tabella 3.3. Valori delle velocità di propagazione delle onde elastiche

Nella figura seguente (Figura 3.3) viene visualizzato l'istogramma relativo ai valori ottenuti di velocità longitudinale in condizioni di provini secchi, espressi in m/s.

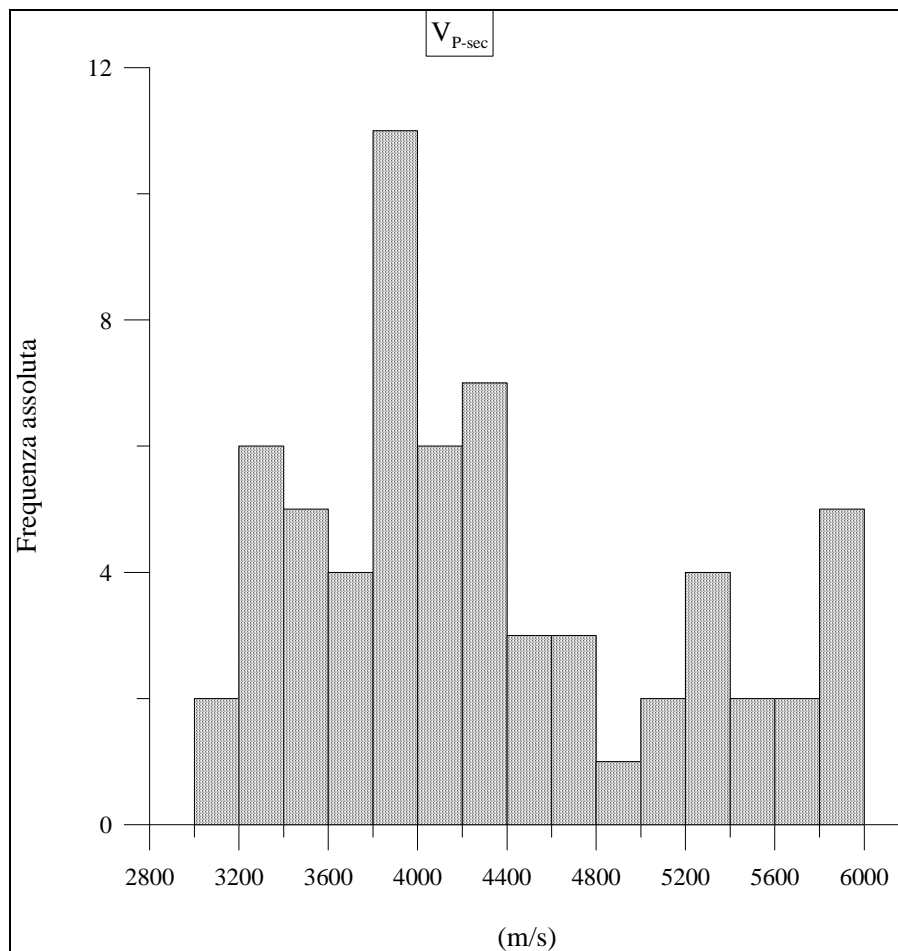


Figura 3.3. Iistogramma dei valori delle velocità longitudinali in condizioni secche.

Come si vede dall'istogramma, i valori sono variabili all'interno di un ampio intervallo, compreso tra 3070 e 5880 m/s (intervallo di variabilità pari a circa il 50% del valore massimo) Inoltre, si può affermare che nel complesso i valori si distribuiscono secondo una distribuzione bimodale.

Nella figura seguente (Figura 3.4) è riportato l'istogramma relativo ai valori di velocità longitudinale in condizioni sature, espressi in m/s.

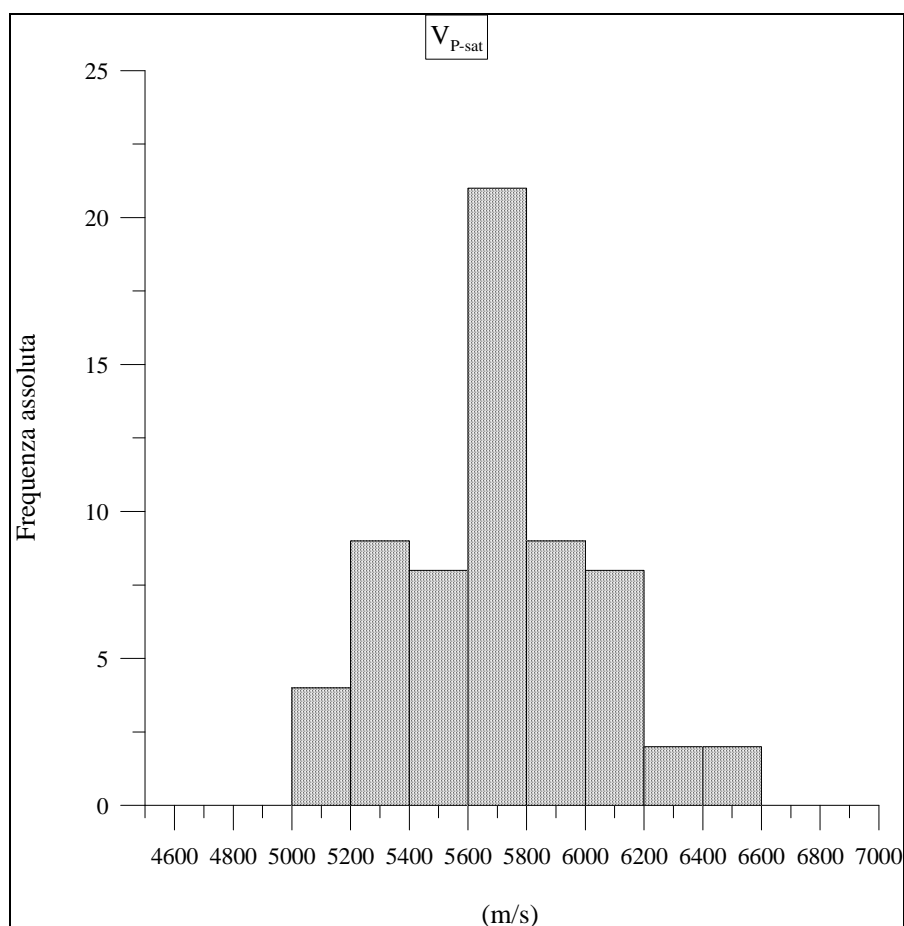


Figura 3.4. Iistogramma relativo ai valori di velocità longitudinale in condizioni sature.

Risulta innanzitutto evidente una distribuzione unimodale dei valori e, rispetto al caso delle velocità longitudinali in condizioni secche, si ha un notevole restringimento dell'intervallo di variabilità. Infatti, nel caso di provini secchi, l'ampiezza del campo di variabilità risulta essere di quasi 3000 m/s riferito a un valore massimo di 5880 m/s, mentre, in questo caso, l'ampiezza dell'intervallo si riduce a circa 1500 m/s, con una variabilità tra 5101 e 6402 m/s (valor medio pari a 5696 m/s e coefficiente di variazione pari al 5%). Si nota quindi un aumento dei valori di velocità tra la misura dalle condizioni secche alle condizioni sature.

Questi fenomeni sono dovuti alla presenza dell'acqua nei pori superficiali dei campioni.

Nella figura sottostante (Figura 3.5), viene riportato l'istogramma relativo ai valori di velocità delle onde trasversali in condizioni secche, espressi in m/s. I valori risultano variabili tra 1705 e 3348 m/s; anche in questo caso, come per le onde longitudinali in condizioni secche, risulta un valore di ampiezza del campo di variabilità pari a circa il 50% del valore massimo e una distribuzione bimodale.

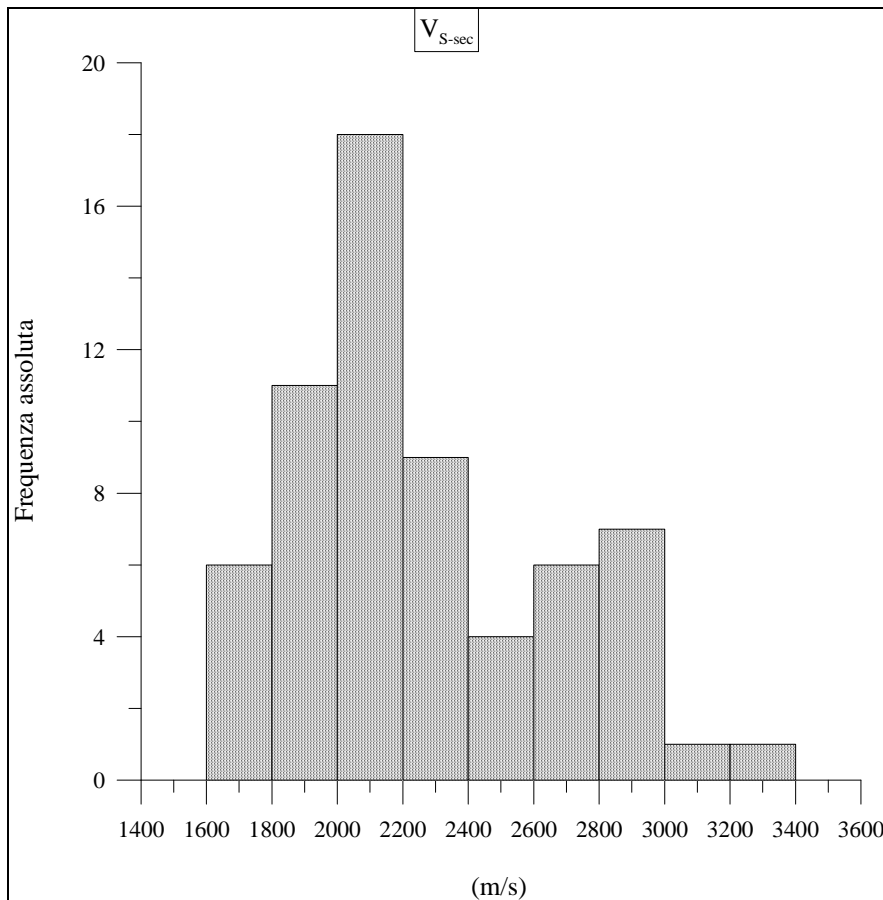


Figura 3.5. Iistogramma relativo ai valori di velocità trasversali in condizioni secche.

3.3 Caratteristiche meccaniche

3.3.1 Resistenza a compressione monoassiale

In tabella 3.4 vengono riportati, per ciascun campione cilindrico, i valori del carico massimo a rottura (P_{max}), espresso in kN, e della resistenza a compressione uniassiale (σ_u) espressa in MPa.

Campione	P_{max}	σ_u
	<i>kN</i>	<i>MPa</i>
A2	148	130,5
A3	100,9	89,0
A4	120,7	106,4
A5	135,2	119,2
B1	115,6	101,9
B3	109,6	96,6
B4	110,9	97,8
B9	105,4	92,9
B10	113,5	100,1
B2	229	100,3
B2p	102,6	90,5
B3p	109	96,1
B1p	218,5	95,5
C1	245,7	107,3
C2	107,8	95,1
C2bis	112,2	98,9
C3	115	101,4
C3bis	110,5	97,4
C4	111,7	98,5
D1	109,5	96,6
D2	112,1	98,8
D3	110,1	97,1
D4	105,9	93,4
D5	108,9	96,0
D6	110,3	97,3
D7	114,9	101,3
D8	112,8	99,5
D5p	108,2	95,4
D6p	108,4	95,6
D2p	202,7	88,9
E1	129,3	114,0
E1bis	112,5	99,2
E2	121,5	107,1
E2bis	117,5	103,6

Campione	P_{max}	σ_u
	<i>kN</i>	<i>MPa</i>
E3	125,9	111,0
E4	246,8	108,0
F2	113,9	100,4
F4	96,2	84,8
F5	98,8	87,1
F7	105,2	92,8
F8	99,4	87,6
F1bis	210,9	92,3
F3bis	196,5	86,0
F9bis	205,7	89,9
F4p	102,8	90,6
F1p	206,6	90,4
G1	157,3	138,7
G2	121,4	107,1
G3	137,7	121,5
G4	122,4	108,0
G2p	300	131,0
G6p	292,8	127,8
H1	97,3	85,8
H1bis	105,2	92,8
H2	111,8	98,6
H2bis	111,6	98,4
L1	132	116,5
L2	110,3	97,3
M1	125	110,2
M2	114	100,6
M3	117	103,3
N1	119,8	105,7
N2	110,9	97,9

Tabella 3.4. Valori di rottura a compressione uniassiale

Nella figura seguente (Figura 3.6) viene visualizzato l'istogramma relativo ai valori di resistenza a compressione uniassiale espressi in MPa. La distribuzione

dei valori risulta in buona approssimazione di tipo unimodale: il valor medio risulta pari a 101 MPa, mentre il coefficiente di variazione risulta essere pari a 11,3%.

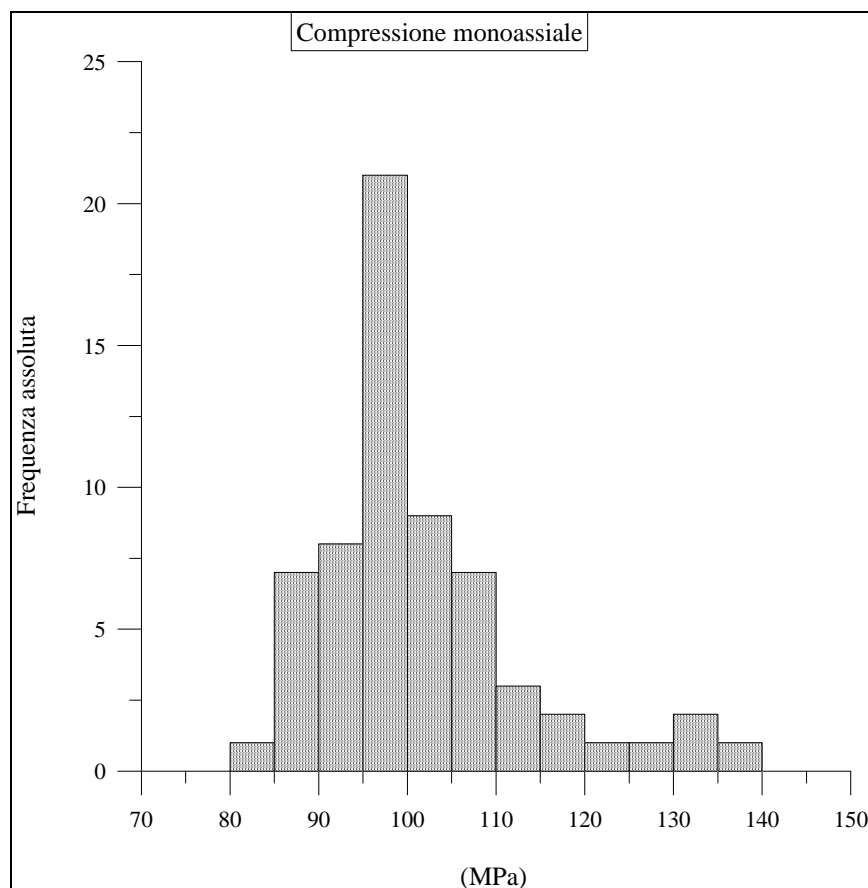


Figura 3.6. Istogramma relativo ai valori di resistenza a compressione monoassiale.

Confrontando i valori della resistenza a compressione uniassiale con i corrispondenti valori delle velocità di propagazione delle onde elastiche, della massa volumica apparente e della porosità totale, per il campione denominato A3, risultano dei valori che si discostano dai valori degli altri campioni del blocco A. In particolare, per tale provino, risulta un valore di porosità totale maggiore, un valore di massa volumica apparente inferiore e valori di resistenza a compressione uniassiale e velocità di propagazione delle onde elastiche minori. In base a ciò, si ritiene che il provino fosse caratterizzato da una fratturazione interna, che non è emersa all'esame visivo della carota, e che ha prodotto tali variazioni nelle prove sperimentali. Per questo motivo, tale campione non viene preso in considerazione nel proseguo della trattazione.

Inoltre, in base ai valori delle prove fin qui esposte, non risultano sostanziali differenze tra i campioni da 38 mm di diametro con quelli da 54 mm, e non si manifestano particolari differenze tra i provini carotati in una direzione e quelli ad essi perpendicolari.

3.3.2 R.I.H.N. test

3.3.2.1 R.I.H.N.

Vengono riportati i risultati del R.I.H.N. test per tutti i campioni di tutti i blocchi: i risultati sono espressi mediante i grafici che visualizzano, per ciascun campione, le curve di regressione ottenute mediante le quali sono calcolati i valori di R.I.H.N. riportati nelle tabelle sottostanti i grafici.

In particolare, come curve di regressione, sono state utilizzate delle rette che presentano valori dei coefficienti di correlazione superiori a 0,92. Sono state utilizzate anche curve di secondo grado che presentano valori del coefficiente di correlazione superiori; tuttavia, i valori R.I.H.N. ricavati mediante delle rette di regressione non si discostano in maniera apprezzabile dai valori ricavati mediante curve di secondo grado. Per questo motivo, data la maggior semplicità, si sono utilizzate le rette come curve di regressione.

- BLOCCO A:

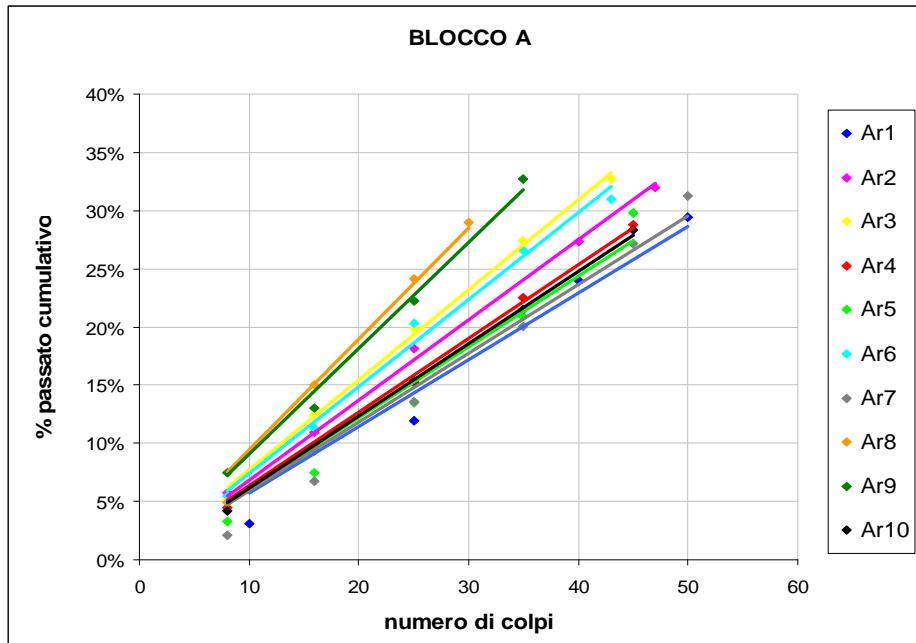


Figura 3.7. R.I.H.N. test blocco A.

Campione	R.I.H.N.
Ar1	44
Ar2	36
Ar3	32
Ar4	40
Ar5	41
Ar6	33
Ar7	42
Ar8	26
Ar9	27
Ar10	40

Tabella 3.5. Valori R.I.H.N. campioni blocco A

Per il blocco A, i valori dell'indice R.I.H.N variano tra 26 e 44 (numero di colpi) come è possibile vedere nella tabella (Tabella 3.5).

Per tale blocco risulta un valore medio dell'indice R.I.H.N pari a 36 colpi e un coefficiente di variazione pari a 17,05 %.

- **BLOCCO B:**

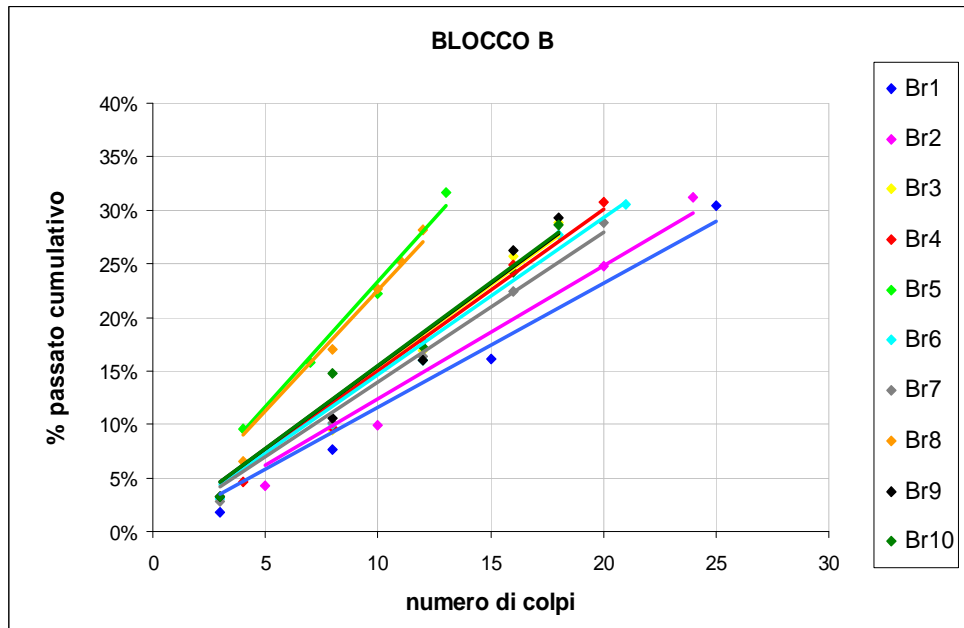


Figura 3.8. R.I.H.N. test blocco B.

Campione	R.I.H.N.
Br1	22
Br2	20
Br3	16
Br4	17
Br5	11
Br6	17
Br7	18
Br8	11
Br9	16
Br10	16

Tabella 3.6. Valori R.I.H.N. campioni blocco B.

Per il blocco B, i valori dell'indice R.I.H.N. variano tra 11 e 22 colpi come è possibile vedere nella tabella soprastante.

Per tale blocco risulta un valore medio dell'indice R.I.H.N. pari a 16 colpi e un coefficiente di variazione pari a 20,86 %.

- BLOCCO C:

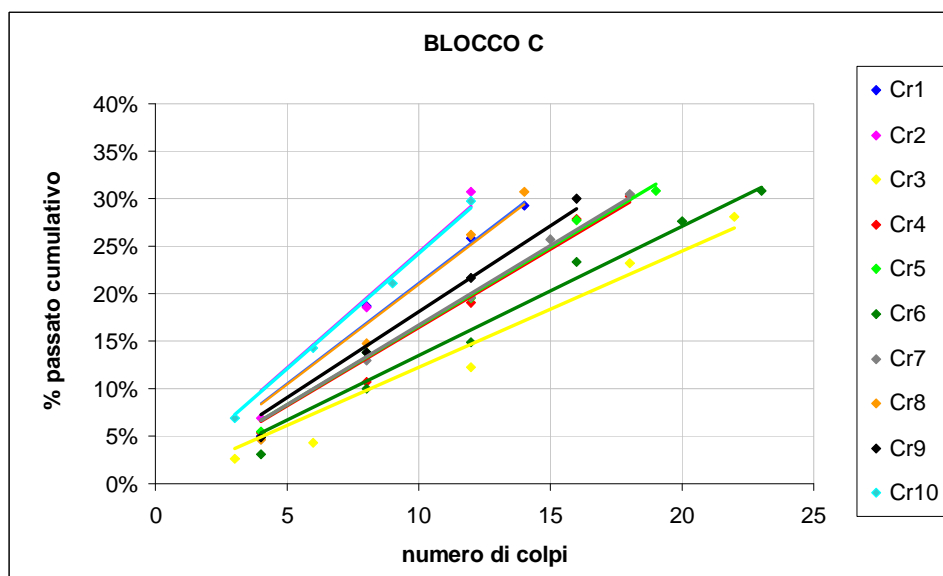


Figura 3.9. R.I.H.N. test blocco C.

Campione	R.I.H.N.
Cr1	12
Cr2	10
Cr3	20
Cr4	15
Cr5	15
Cr6	19
Cr7	15
Cr8	12
Cr9	14
Cr10	10

Tabella 3.7. Valori R.I.H.N. campioni blocco C.

Per il blocco C, i valori dell'indice R.I.H.N variano tra 10 e 20 colpi come è possibile vedere nella tabella soprastante.

Per tale blocco risulta un valore medio dell'indice R.I.H.N pari a 14 colpi e un coefficiente di variazione pari a 23,65 %.

- BLOCCO D:

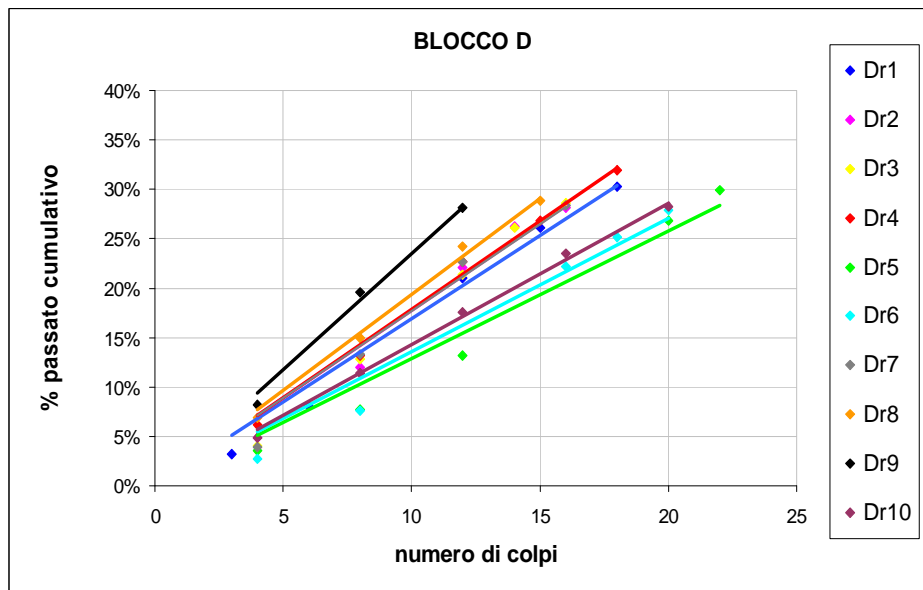


Figura 3.10. R.I.H.N. test blocco D.

Campione	R.I.H.N.
Dr1	15
Dr2	14
Dr3	14
Dr4	14
Dr5	19
Dr6	18
Dr7	14
Dr8	13
Dr9	11
Dr10	17

Tabella 3.8. Valori R.I.H.N. campioni blocco D.

Per il blocco D, i valori dell'indice R.I.H.N variano tra 11 e 19 colpi come è possibile vedere nella tabella soprastante.

Per tale blocco risulta un valore medio dell'indice R.I.H.N pari a 15 colpi e un coefficiente di variazione pari a 17,72 %.

- **BLOCCO E:**

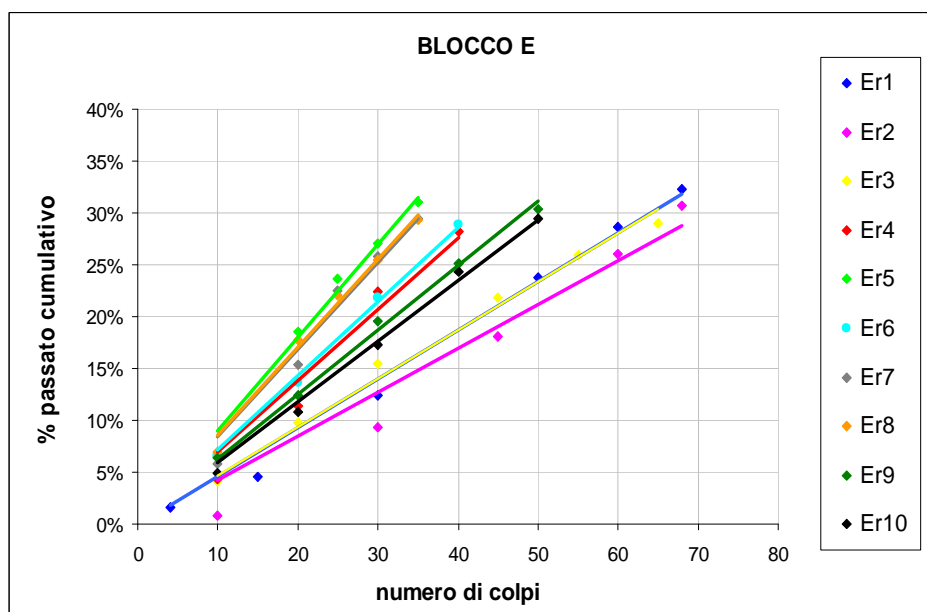


Figura 3.11. R.I.H.N. test blocco E.

Campione	R.I.H.N.
Er1	53
Er2	60
Er3	53
Er4	36
Er5	28
Er6	35
Er7	30
Er8	29
Er9	40
Er10	42

Tabella 3.9. Valori R.I.H.N. campioni blocco E.

Per il blocco E, i valori dell'indice R.I.H.N variano tra 28 e 60 colpi come è possibile vedere nella tabella soprastante.

Per tale blocco risulta un valore medio dell'indice R.I.H.N pari a 41 colpi e un coefficiente di variazione pari a 27,44 %.

- BLOCCO F:

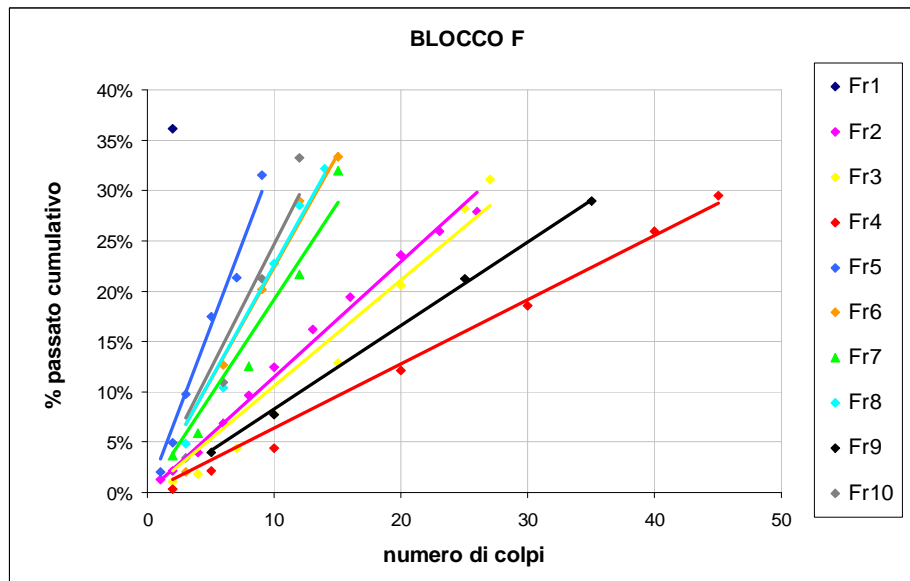


Figura 3.12. R.I.H.N. test blocco F.

Campione	R.I.H.N.
Fr1	2
Fr2	22
Fr3	24
Fr4	39
Fr5	8
Fr6	11
Fr7	13
Fr8	11
Fr9	30
Fr10	10

Tabella 3.10. Valori R.I.H.N. campioni blocco F.

I valori risultano molto variabili; l'intervallo di variabilità va dal valore 2 al valore 39. In particolare, il valore 2 ottenuto per il campione Fr1, è stato ottenuto senza l'utilizzo della retta di regressione in quanto è stata sufficiente una sola serie di 2 colpi per ottenere una percentuale di passante rispetto al peso iniziale del provino, già superiore al 35 %. Per il blocco F il valor medio vale 17 e il coefficiente di variazione risulta pari a 67,36 %.

- BLOCCO G:

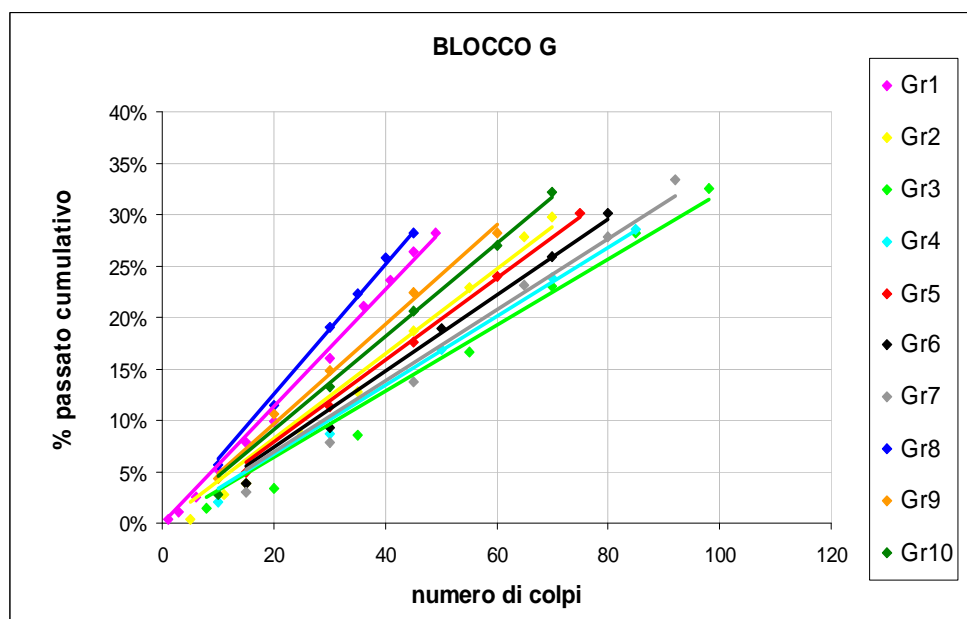


Figura 3.13. R.I.H.N. test blocco G.

Campione	R.I.H.N.
Gr1	44
Gr2	61
Gr3	78
Gr4	76
Gr5	63
Gr6	68
Gr7	71
Gr8	40
Gr9	52
Gr10	56

Tabella 3.11. Valori R.I.H.N. campioni blocco G.

Per il blocco G, i valori dell'indice R.I.H.N variano tra 40 e 78 colpi come è possibile vedere nella tabella soprastante.

Per tale blocco risulta un valore medio dell'indice R.I.H.N pari a 61 colpi e un coefficiente di variazione pari a 21,40 %.

- BLOCCO H:

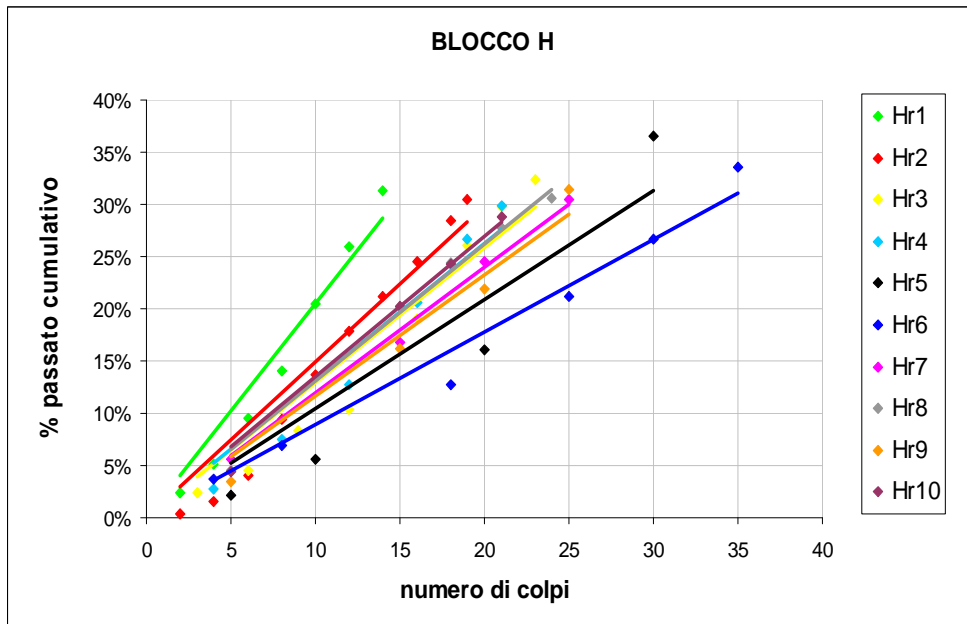


Figura 3.14. R.I.H.N. test blocco H.

Campione	R.I.H.N.
Hr1	12
Hr2	17
Hr3	19
Hr4	19
Hr5	24
Hr6	28
Hr7	21
Hr8	19
Hr9	22
Hr10	19

Tabella 3.12. Valori R.I.H.N. campioni blocco H.

Per il blocco H, i valori dell'indice R.I.H.N variano tra 12 e 28 colpi come è possibile vedere nella tabella soprastante.

Per tale blocco risulta un valore medio dell'indice R.I.H.N pari a 20 colpi e un coefficiente di variazione pari a 21,40 %.

- BLOCCO L:

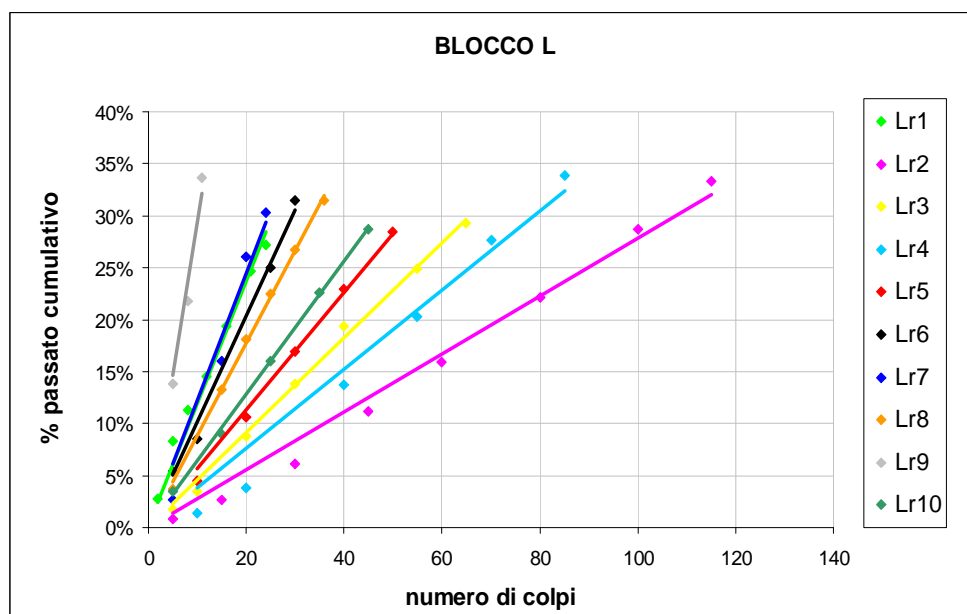


Figura 3.15. R.I.H.N. test blocco L.

Campione	R.I.H.N.
Lr1	21
Lr2	89
Lr3	54
Lr4	66
Lr5	45
Lr6	25
Lr7	20
Lr8	28
Lr9	9
Lr10	39

Tabella 3.13. Valori R.I.H.N. campioni blocco L.

Per il blocco L, i valori risultano molto variabili andando da un minimo di 9 a un massimo di 89. Per tale blocco il valor medio vale 40 e il coefficiente di variazione risulta pari a 62,14 %.

- **BLOCCO M:**

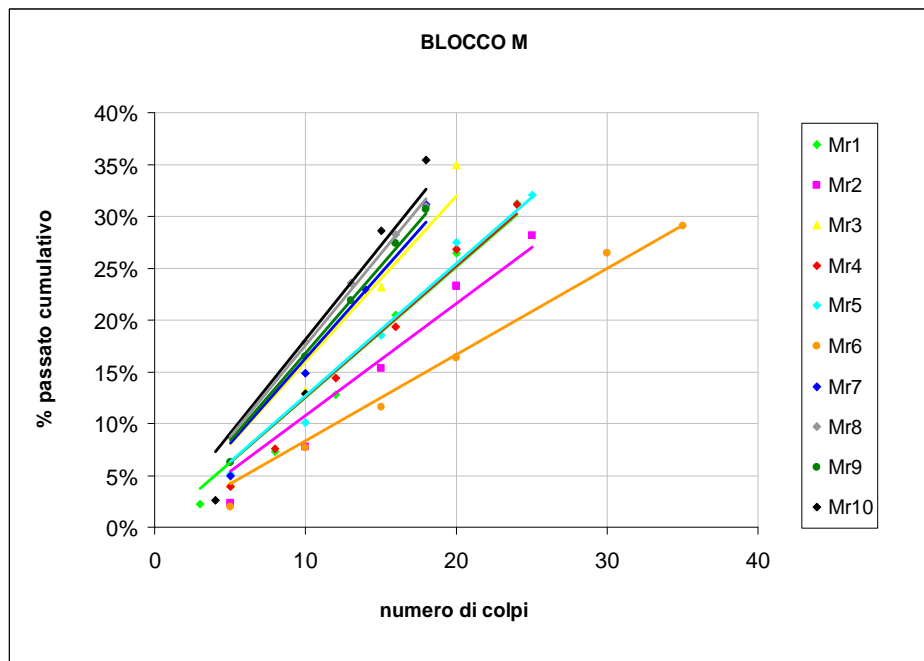


Figura 3.16. R.I.H.N. test blocco M.

Campione	R.I.H.N.
Mr1	20
Mr2	23
Mr3	16
Mr4	20
Mr5	20
Mr6	30
Mr7	15
Mr8	14
Mr9	15
Mr10	14

Tabella 3.14. Valori R.I.H.N. campioni blocco M.

Per il blocco M, i valori dell'indice R.I.H.N variano tra 14 e 30 colpi come è possibile vedere nella tabella soprastante.

Per tale blocco risulta un valore medio dell'indice R.I.H.N pari a 19 colpi e un coefficiente di variazione pari a 27,30 %.

- BLOCCO N:

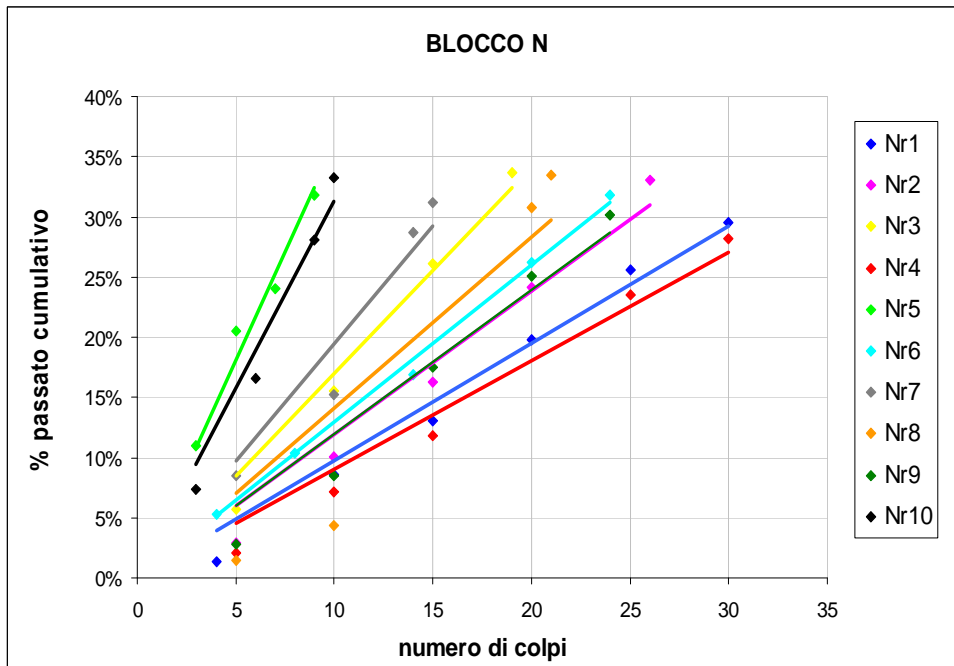


Figura 3.17. R.I.H.N. test blocco N.

Campione	R.I.H.N.
Nr1	26
Nr2	21
Nr3	15
Nr4	28
Nr5	7
Nr6	19
Nr7	13
Nr8	18
Nr9	21
Nr10	8

Tabella 3.15. Valori R.I.H.N. campioni blocco N.

Per il blocco N, i valori dell'indice R.I.H.N variano tra 7 e 28 colpi come è possibile vedere nella tabella soprastante.

Per tale blocco risulta un valore medio dell'indice R.I.H.N pari a 17 colpi e un coefficiente di variazione pari a 39,57 %.

- TUTTI I VALORI:

Nella figura seguente (Figura 3.18), si riporta l'istogramma relativo a tutti i valori R.I.H.N. determinati per tutti i blocchi, espressi in numero di colpi.

Come risulta dall'istogramma, l'indice R.I.H.N. varia all'interno di un campo di valori molto ampio, da un minimo di 2 ad un massimo di 89.

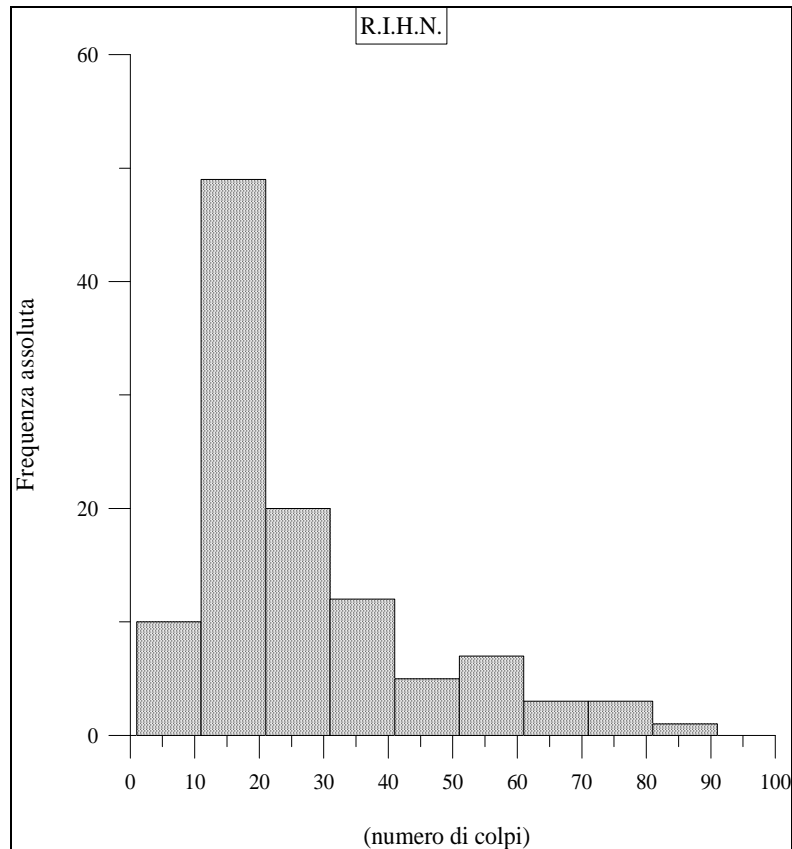


Figura 3.18. Iistogramma relativo ai valori dell'indice R.I.H.N.

Inoltre, sulla base dei valori dei coefficienti di variazione ottenuti per ciascun blocco, risulta un'alta variabilità dell'indice R.I.H.N. anche all'interno di ciascun blocco. Questa variabilità non è emersa in maniera così significativa nelle altre prove di laboratorio. In particolare, di seguito, si riporta una tabella (Tabella 3.16) di confronto tra i coefficienti di variazione ottenuti per ciascun blocco, per le prove R.I.H.N. e per la resistenza a compressione uniassiale.

Dalla tabella si nota come il blocco *F* sia caratterizzato dai valori più dei coefficienti di correlazione per tutte le prove.

Blocco	Coefficients di variazione dei valori ottenuti per ciascun singolo blocco				
	V_{P-sec}	V_{P-sat}	V_{S-sec}	σ_u	R.I.H.N.
	%	%	%	%	%
A	5,02	3,87	3,01	10,15	17,05
B	5,22	2,54	4,62	3,78	20,85
C	6,26	1,61	3,22	4,23	23,65
D	4,74	1,63	4,79	3,41	17,72
E	5,85	1,50	6,65	4,91	27,44
F	11,85	2,39	9,64	4,94	67,36
G	0,67	2,21	5,18	10,42	21,40
H	2,08	0,90	3,84	6,43	21,39
L	4,43	2,08	0,79	12,70	62,14
M	4,76	1,23	4,83	4,73	27,30
N	6,04	0,39	0,39	5,46	39,57

Tabella 3.16. Confronto tra i coefficienti di variazione di ciascun blocco per le velocità di propagazione delle onde elastiche, per la resistenza a compressione uni assiale e il R.I.H.N..

3.3.2.2 R.I.H.N. a numero di colpi fissi

Nella figura seguente (Figura 3.19), vengono riportate le curve granulometriche ottenute dal R.I.H.N. test a numero di colpi fissi. I campioni testati sono 10 e sono stati ottenuti, mediante martello e scalpello, dai blocchi che hanno dato valori dell'indice R.I.H.N. differenti tra loro; in particolare, sono stati presi:

- 2 campioni dal blocco F, caratterizzato da valori R.I.H.N. compresi tra 2 e 39 colpi; in particolare, tali provini provengono dallo stesso frammento che ha dato valori R.I.H.N. pari a 11 e 13 colpi;
- 2 campioni dal blocco B, caratterizzato da valori R.I.H.N. compresi tra 11 e 22 colpi;
- 4 campioni dal blocco M, caratterizzato da valori R.I.H.N. compresi tra 14 e 30 colpi;

- 2 campioni dal blocco G, caratterizzato da valori R.I.H.N. compresi tra 40 e 78 colpi.

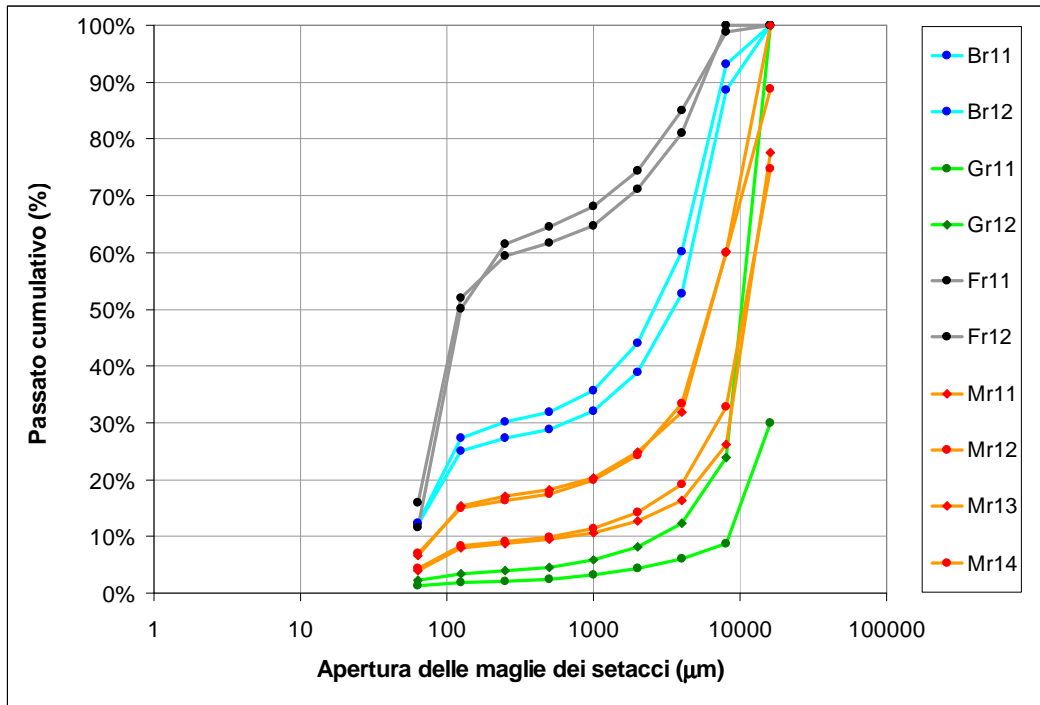


Figura 3.19. Curve granulometriche dei campioni sottoposti a R.I.H.N. a numero di colpi fisso.

Dalle curve granulometriche si evince una diversa risposta dei campioni testati alle sollecitazioni indotte dai colpi della massa battente: infatti, i campioni provenienti dai blocchi caratterizzati da valori di R.I.H.N. basso hanno manifestato una curva granulometrica ai 15 colpi più ricca in frazioni fini rispetto ai campioni prelevati dai blocchi con valori R.I.H.N. più alti. Tale distinzione è ben visibile e inoltre è possibile distinguere anche i campioni prelevati dai blocchi caratterizzati da valori dell'indice R.I.H.N. intermedio.

In base a questo, esiste una corrispondenza tra la procedura a colpi variabili e la procedura a colpi fissi: entrambe queste prove infatti permettono di qualificare e classificare efficacemente i materiali testati.

La procedura a numero di colpi fisso risulta operativamente più vantaggiosa in quanto consente di esaminare in tempi rapidi un numero elevato di campioni perché è sufficiente una singola serie di colpi.

3.3.2.3 Analisi calcimetrica del residuo R.I.H.N.

I frantumati provenienti dalla determinazione del R.I.H.N., scelti per questa prova, sono quelli che hanno dato i valori estremi per ciascun blocco o per gruppo di blocchi: in particolare sono stati scelti i campioni che hanno dato il valore massimo e minimo di R.I.H.N. per i blocchi A, D, E, F, G, L, e per l'insieme dei blocchi rimanenti (B, C, H, M, N). Nella tabella seguente (Tabella 3.17), sono riportati i risultati dell'analisi calcimetrica eseguita su tali campioni.

Campione	R.I.H.N.	Campione	CaCO ₃
	<i>n°colpi</i>		%
Ar1	44	Ar1P	97
		Ar1R	98
Ar8	26	Ar8P	98
		Ar8R	97
Dr5	19	Dr5P	99
		Dr5R	98
Dr9	11	Dr9P	99
		Dr9R	99
Er2	60	Er2P	99
		Er2R	97
Er5	28	Er5P	98
		Er5R	97
Fr1	2	Fr1P	96
		Fr1R	96
Fr4	39	Fr4P	97
		Fr4R	91
Gr3	78	Gr3P	96
		Gr3R	96
Gr8	40	Gr8P	97
		Gr8R	97
Lr2	89	Lr2P	95
		Lr2R	94
Lr9	9	Lr9P	97
		Lr9R	94
Mr6	30	Mr6P	99
		Mr6R	96
Nr5	7	Nr5P	99
		Nr5R	97

Tabella 3.17. Percentuale di carbonato di calcio nei campioni R.I.H.N.

Dai valori tabulati non risultano sensibili differenze di percentuale in peso di carbonato di calcio tra i diversi provini. Il campione Fr4R presenta il valore più basso (91%).

3.3.2.4 Analisi diffrattometrica del residuo R.I.H.N.

L'analisi diffrattometrica è stata eseguita su 16 campioni su cui era già stata eseguita l'analisi calcimetrica. Per brevità, vengono riportati solo i diffrattogrammi relativi ai campioni Fr4R, Gr3R e Nr5R in quanto sono risultati i più rappresentativi dei casi limite ottenuti: nel campione Nr5R sono stati individuati esclusivamente picchi relativi alla sola calcite, nel campione Gr3R sono state ottenute, tra tutte le prove, le intensità maggiori per i picchi della dolomite e, infine, nel campione Fr4R risultano presenti, oltre alla calcite, anche i picchi caratteristici della dolomite; inoltre, sempre per il campione Fr4R, nella zona di valori 2α compresi tra 5° e 15° , si nota una lieve presenza di miche e minerali argillosi (il diffrattogramma infatti in questo tratto del campione Fr4R, presenta un andamento più disturbato rispetto agli altri campioni).

Tutti gli altri campioni analizzati, presentano un diffrattogramma in cui si evidenziano la presenza di calcite e la presenza di dolomite; i picchi relativi a quest'ultimo minerale, in particolare, risultano caratterizzati da valori di intensità inferiori rispetto al campione Gr3R.

I risultati di tutti i diffrattogrammi saranno presentati, in forma analitica, nel capitolo seguente.

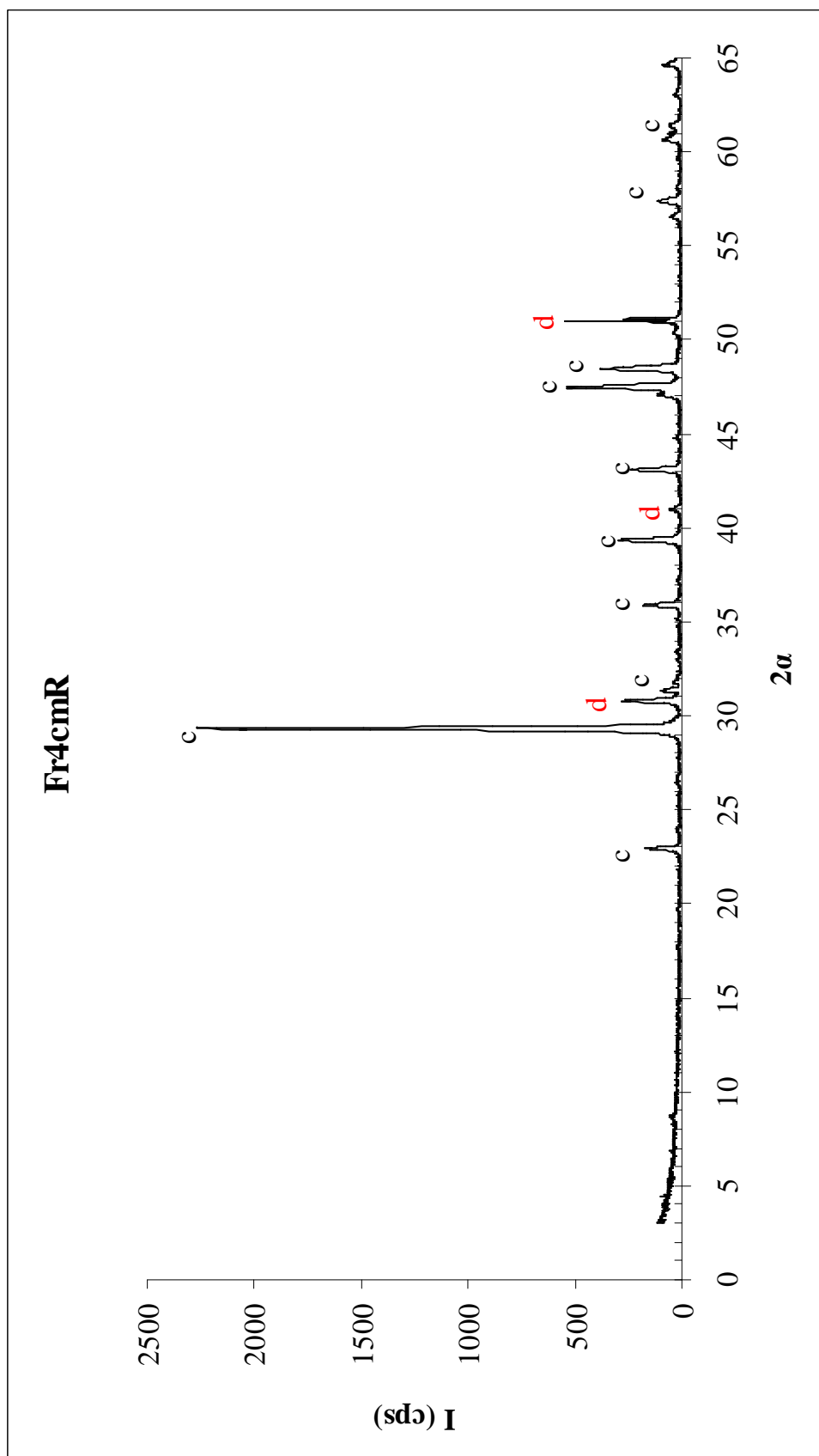


Figura 3.20. Diffratogramma campione Fr4cmR; c=calcite; d=dolomite.

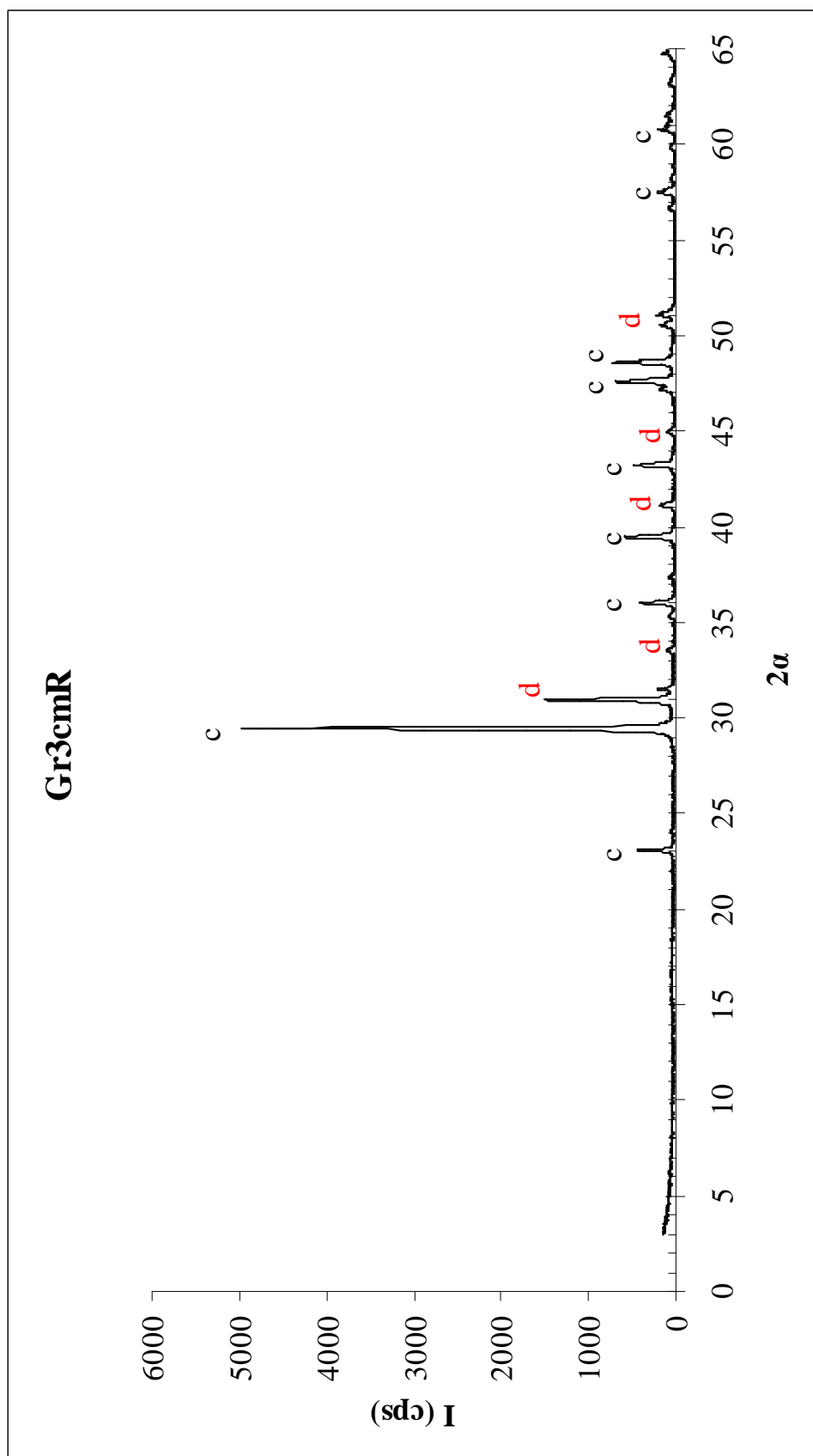


Figura 3.21. Diffratogramma campione Gr3cmR; c=calcite; d=dolomite.

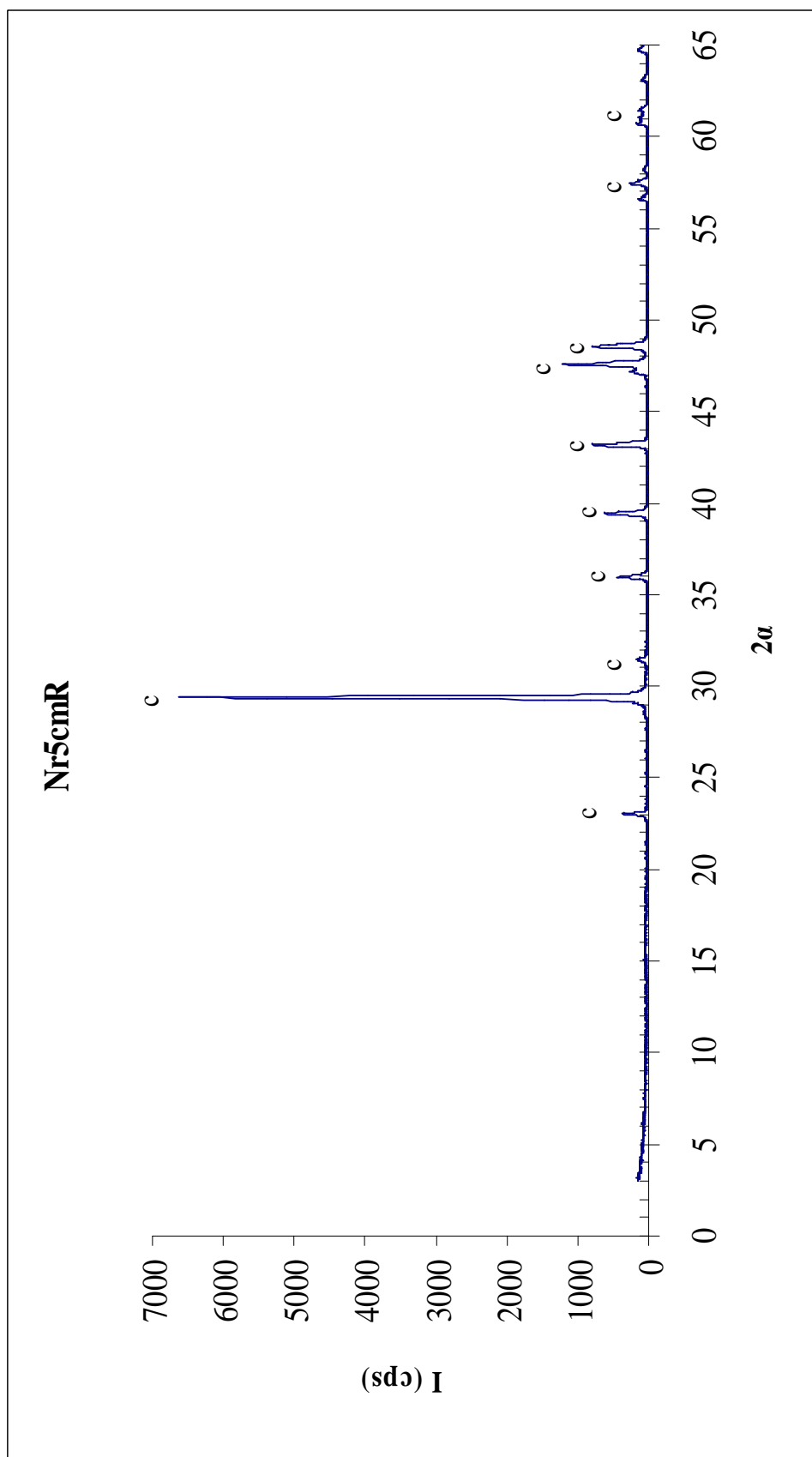


Figura 3.22. Diffratogramma campione Nr5cmR; c=calcite.

3.4 Caratteristiche petrografiche

Dallo studio condotto al microscopio polarizzatore sulle sezioni sottili, si evidenziano sostanziali differenze a livello di tessitura e dimensioni dei grani tra i campioni. Tale circostanza in particolare, si evidenzia a maggior ragione tra blocco e blocco.

Nelle figure seguenti sono mostrate le fotografie al microscopio polarizzatore delle sezioni sottili. L'ordine con cui sono presentate le immagini dipende dal blocco da cui provengono le sezioni sottili: vengono infatti mostrate prima quelle appartenenti ai blocchi caratterizzati da valori delle caratteristiche meccaniche mediamente più bassi e, via via, quelle realizzate dai blocchi con valori delle caratteristiche meccaniche più alti.

- **BLOCCO F**

La seguente sezione sottile (Figura 3.23) è stata ricavata dal blocco F, in corrispondenza del campione che ha dato un basso valore di R.I.H.N. (campione Fr5, R.I.H.N. pari a 8 colpi).

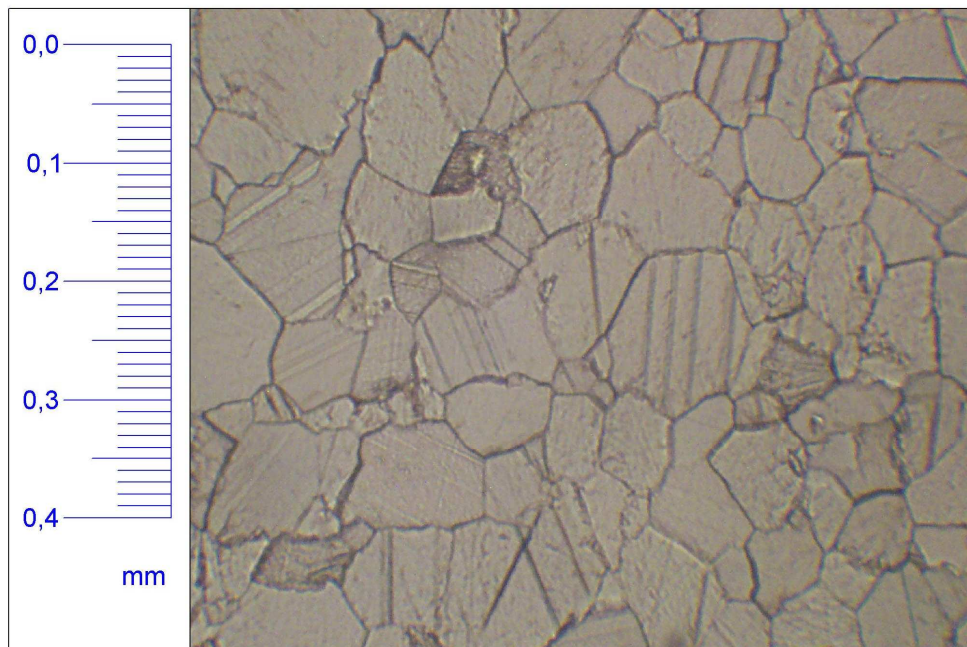


Figura 3.23. Sezione sottile, blocco F.

Come si nota dalla figura soprastante, la sezione sottile presenta una tessitura granoblastica pavimentosa con contorno poligonale dei cristalli e presenza, nei punti di contatto tra grani, di punti tripli. Le dimensioni dei gran variano approssimativamente tra i 50 e i 125 micron, con alcuni grani di dimensioni inferiori.

- **BLOCCO B:**

La seguente sezione sottile (Figura 3.24) è stata ricavata dal blocco B, in corrispondenza del campione che ha dato un basso valore di R.I.H.N. (campione Br8, R.I.H.N. pari a 11 colpi).

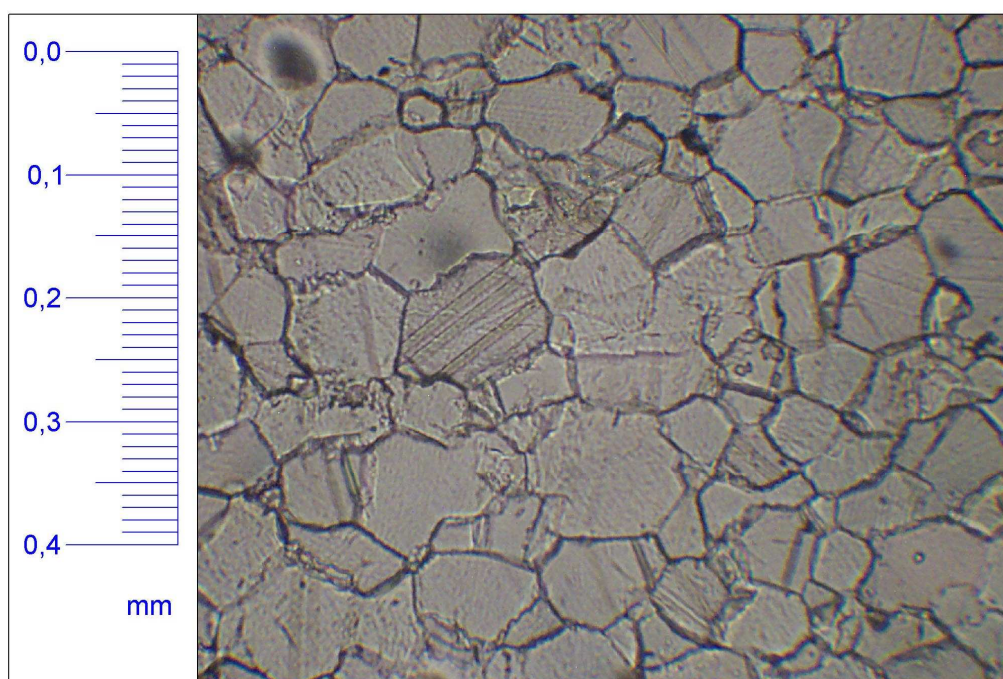


Figura 3.24. Sezione sottile, blocco B.

La sezione sottile della figura soprastante (Figura 3.24) evidenzia una tessitura granoblastica, con contorni dei grani prevalentemente regolari e, in minima parte, dentellati. I grani hanno le stesse dimensioni dei grani della sezione sottile precedente (sezione sottile blocco F).

- **BLOCCO M:**

In questo caso sono state realizzate due sezioni sottili: una è stata ricavata nel blocco M in corrispondenza del campione che ha dato un valore R.I.H.N. medio (per questo blocco), mentre l'altra è stata ricavata in corrispondenza del campione che ha dato valore R.I.H.N. alto (sempre relativamente a questo blocco).

Nella figura seguente (Figura 3.25) viene mostrata la sezione sottile denominata *M1* ricavata in corrispondenza del campione con valore R.I.H.N. medio (campione Mr4, R.I.H.N. pari a 20).

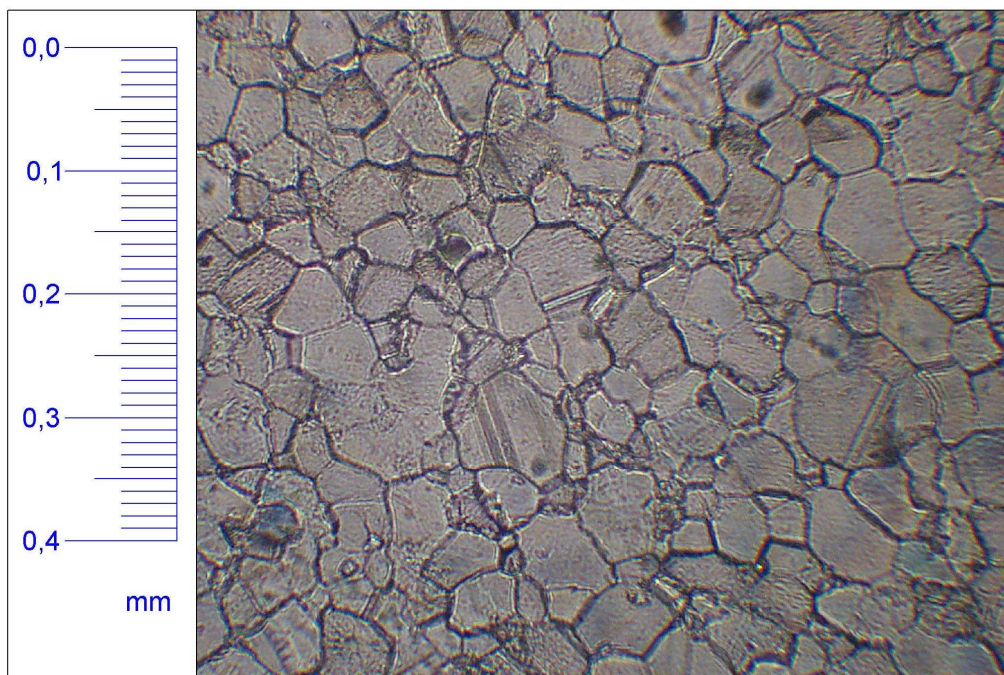


Figura 3.25. Sezione sottile M1.

La sezione sottile mostra una tessitura granoblastica con contorni dei grani prevalentemente regolari e in minima parte dentellati. Si nota la presenza di punti tripli al contatto tra i grani e le dimensioni dei grani sono inferiori rispetto alle sezioni sottili precedenti (inferiori ai 100 micron, come ordine di grandezza).

Nella figura seguente (Figura 3.26) viene mostrata la sezione sottile denominata *M2* ricavata in corrispondenza del campione con valore R.I.H.N. più alto (campione Mr6, R.I.H.N. pari a 30). La sezione sottile mostra, come la precedente, una tessitura granoblastica con contorni dei grani prevalentemente regolari e in minima parte dentellati. Si nota la presenza di punti tripli al contatto tra i grani. I grani presentano dimensioni inferiori rispetto alla sezione sottile M1.

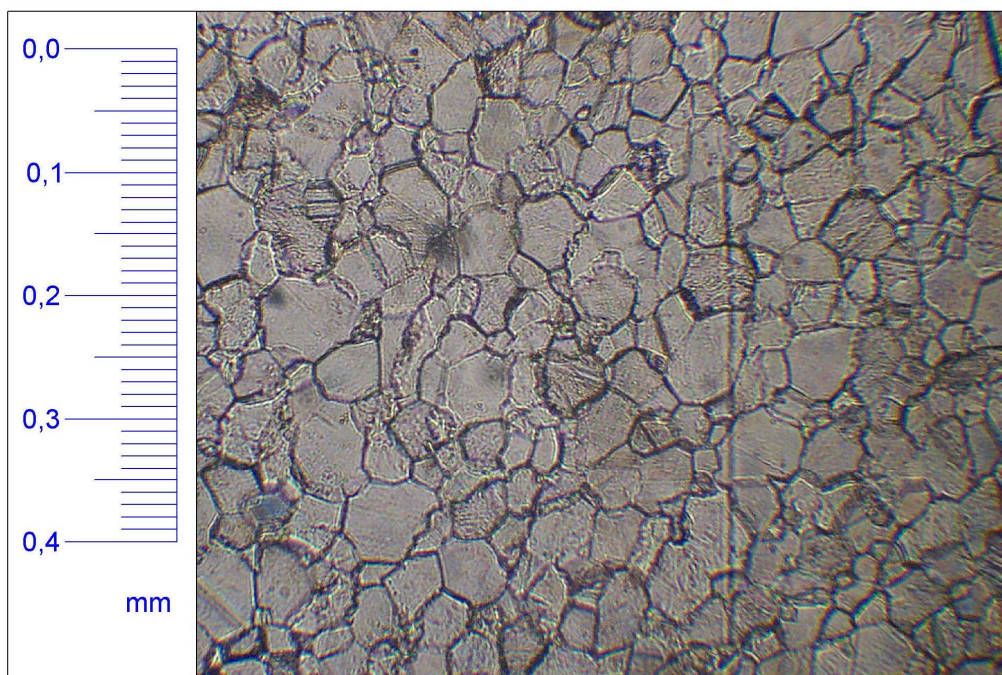


Figura 3.26. Sezione sottile M2.

- **BLOCCO A:**

Per tale blocco sono state realizzate due sezioni sottili, denominate rispettivamente *A1* e *A2*.

La sezione sottile *A1* (Figura 3.27), ricavata in corrispondenza del campione Ar7 (R.I.H.N. pari a 42 colpi), presenta una tessitura in parte granoblastica e in parte xenoblastica; i contorni dei grani risultano in parte regolari e si nota la presenza in certe zone di contatto di punti tripli. Le dimensioni dei grani risultano inferiori ai 50 micron come ordine di grandezza.

Nella figura successiva (Figura 3.28) viene mostrata la sezione sottile *A2* ricavata in corrispondenza del campione Ar1 (R.I.H.N. pari a 44 colpi). La sezione sottile presenta una tessitura xenoblastica con dimensione dei grani variabile. I contorni dei grani risultano prevalentemente dentellati e irregolari.

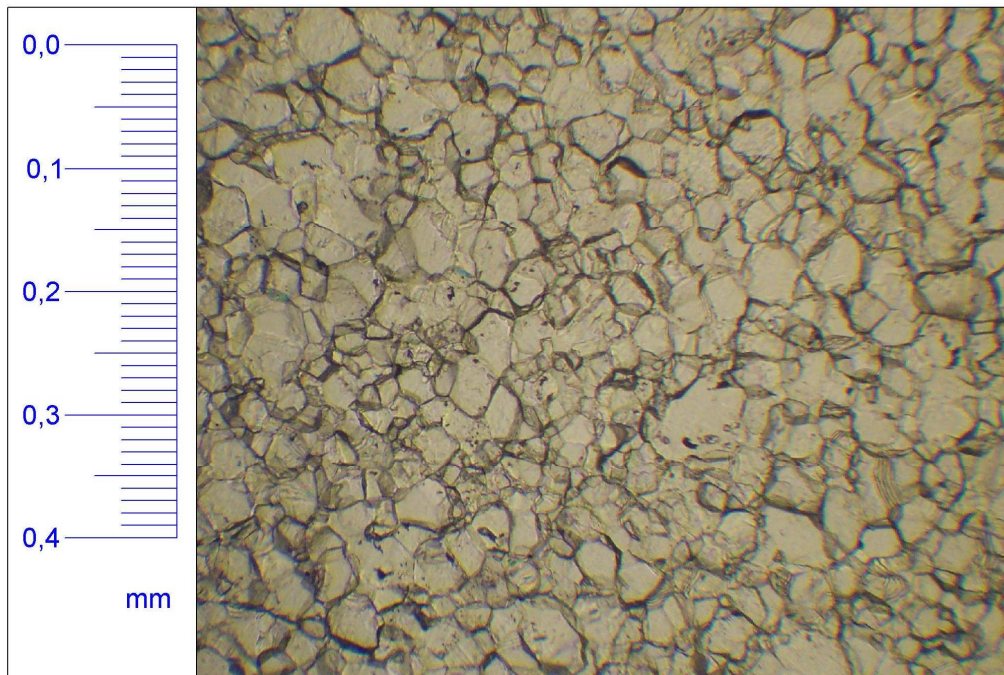


Figura 3.27. Sezione sottile A1.

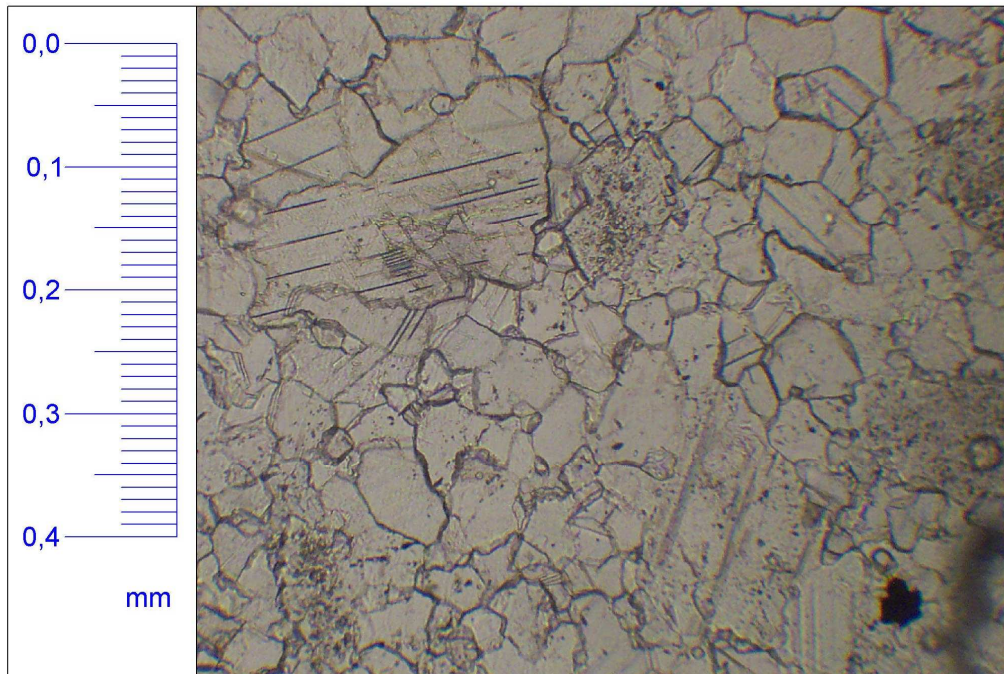


Figura 3.28. Sezione sottile A2.

- **BLOCCO G:**

Nella figura seguente (Figura 3.29) viene mostrata la sezione sottile ricavata dal blocco G, in corrispondenza del campione Gr6 (R.I.H.N. pari a 68 colpi).

La sezione mostra una tessitura in parte granoblastica e in parte xenoblastica, con dimensioni dei grani inferiori ai 50 micron. Si distinguono zone con contorno dei cristalli più irregolari intervallate da altre con contorni più regolari.

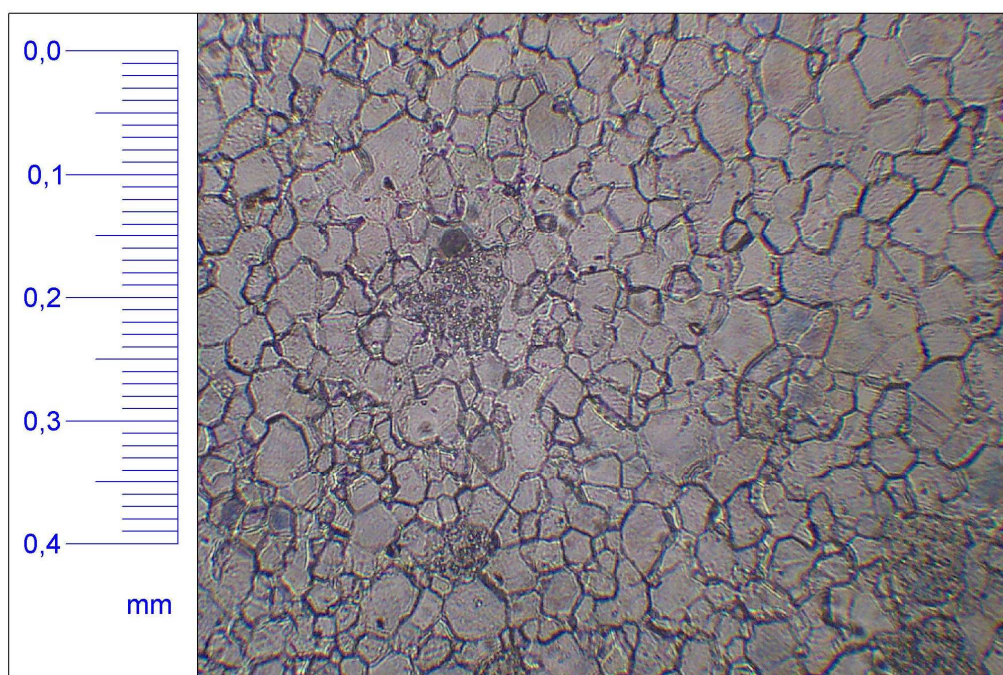


Figura 3.29. Sezione sottile blocco G.

- **BLOCCO L:**

Nella figura seguente (Figura 3.30) viene mostrata la sezione sottile realizzata dal blocco L, in corrispondenza del campione Lr2 che, tra i campioni sottoposti a R.I.H.N. test, è stato quello che ha dato il valore dell'indice R.I.H.N. più alto (pari a 89 colpi). La sezione mostra una tessitura in parte granoblastica e in parte xenoblastica, i contorni dei grani si presentano in parte regolari e in parte dentellati; si nota la presenza di punti tripli nei punti di contatto.

Mediamente i grani presentano dimensioni inferiori rispetto alle sezioni sottili precedenti.

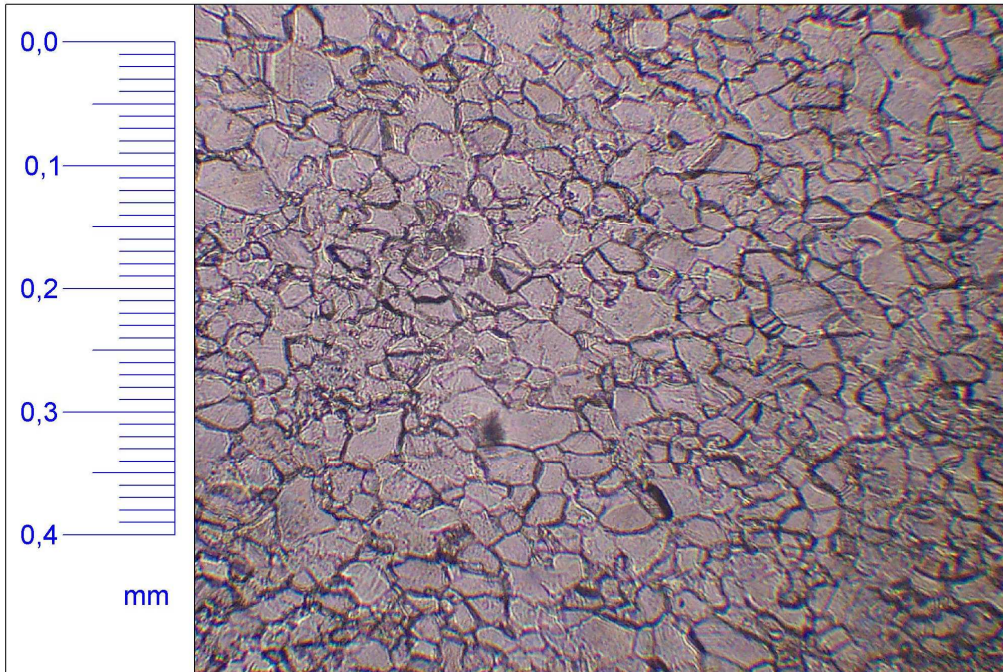


Figura 3.30. Sezione sottile blocco L.

Capitolo 4

INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI SPERIMENTALI

4.1 Interpretazione dei diffrattogrammi

I risultati ottenuti mediante analisi diffrattometrica, sono stati elaborati per cercare di ottenere i quantitativi dei minerali riconoscibili dai picchi dei diffrattogrammi.

Il calcolo è tratto dal lavoro pubblicato da Cook et al. (1975), mediante il quale si determinano le concentrazioni, sulla base dell'intensità di determinati riflessi, tenendo però conto del potere di riflessione/diffrazione delle diverse strutture cristalline: quindi, per ogni minerale, si utilizza un fattore di moltiplicazione; in questo modo non si tiene conto delle orientazioni preferenziali di certi piani cristallografici, della sostanza amorfa che può essere presente e della sostanza organica. In questo caso, il metodo di calcolo, è stato applicato facendo l'ipotesi che nei campioni analizzati siano presenti esclusivamente calcite e dolomite.

Le concentrazioni ottenute sono da ritenersi semiquantitative e l'errore relativo è piuttosto notevole (approssimabile a 10 %).

In base a queste considerazioni, nella Tabella 4.1, sono riportati i risultati delle concentrazioni percentuali ottenute su tutti i campioni analizzati.

Analizzando i valori si nota immediatamente la differenza delle percentuali di calcite ottenute con l'analisi diffrattometrica rispetto all'analisi calcimetrica. Questa differenza può essere imputata al fatto che, l'analisi calcimetrica, misurando un volume di CO₂ prodotto per reazione dell'acido cloridrico con i carbonati presenti nei provini, difficilmente riesce a discriminare efficacemente la

calcite dalla dolomite (entrambi questi minerali contengono carbonati che reagiscono con l'acido cloridrico).

Osservando i valori ottenuti per i campioni R.I.H.N. di cui sono stati analizzati sia il passato che il rifiuto, si riscontra una presenza di dolomite maggiore nei rifiuti che non nei rispettivi passati e, in generale, si notano percentuali di dolomite maggiori nei provini provenienti da campioni caratterizzati dall'indice R.I.H.N. più alto.

Queste tendenze comunque, possono essere espresse solo in maniera qualitativa in quanto, come detto, il metodo utilizzato per ottenerli risulta affetto da un errore piuttosto notevole che non consente di generalizzare quantitativamente questi risultati.

Campione	Calcite	Dolomite
	%	%
AR1P	92	8
AR1R	87	13
DR5R	97	3
ER2P	81	19
ER2R	70	30
FR1R	97	3
FR4P	98	2
FR4R	83	17
GR3R	66	34
GR8R	72	28
LR2P	88	12
LR2R	82	18
LR9P	100	0
LR9R	98	2
MR6R	96	4
NR5R	100	0

Tabella 4.1. Concentrazioni percentuali di calcite e dolomite ottenute nei campioni analizzati mediante diffrattometro, calcolate mediante il metodo di Cook et al. (1975).

In virtù della scarsa precisione del metodo, per ottenere dei valori più precisi, occorre eseguire altri tipi di prove che diano valori della composizione mineralogica più attendibili.

4.2 Modello di Tourenq e Fourmaintraux

Viene ora presentata una correlazione tra i risultati ottenuti mediante prove soniche e porosità totale, basata su un modello proposto da Tourenq e Fourmaintraux (1971).

Tale modello è basato sulla misura della porosità totale (p), e sulla misura della velocità longitudinale in condizioni secche (V_{P-sec}) e in condizioni sature (V_{P-sat}); tali valori di velocità vengono rapportati alla *velocità longitudinale teorica* (V_{PC}) del materiale, definita come la velocità longitudinale in un mezzo con medesima composizione mineralogica del materiale in esame e totalmente privo di discontinuità.

Questo modello consente di pervenire ad una distinzione tra la porosità dovuta alle micro-fessure (nF), e la porosità dovuta a pori equidimensionali (nP). In tal caso, con il termine *micro-fessure* si intendono le discontinuità materiali caratterizzate da due dimensioni nettamente superiori alla terza, mentre con il termine *pori* si indicano le discontinuità materiali caratterizzate dall'isotropia delle loro estensioni spaziali.

La porosità totale risulta dalla somma della porosità per micro-fessure e della porosità per pori:

$$p = nF + nP \quad (4.1)$$

A parità di porosità totale, la diminuzione dei valori delle velocità longitudinali in condizioni secche causata dalla presenza di micro-fessure, risulta maggiore rispetto alla diminuzione causata dai pori. Inoltre, l'aumento dei valori di velocità di propagazione delle onde in condizioni sature risulta maggiore all'aumentare del contributo delle micro-fessure.

In base a questi motivi, e definito *indice di qualità* il rapporto:

$$IQ = \frac{V_{P-sec}}{V_{PC}} \quad (4.2)$$

con ($0 < IQ < 100$), risulta la seguente relazione proposta dagli autori:

$$IQ = 100 - 22nF - 1,6nP \quad (4.3)$$

Mediante tale equazione, è possibile determinare il contributo della porosità per pori (nP) e il contributo della porosità per micro-fessure (nF) attraverso la misura delle velocità longitudinali e la misura della porosità totale.

4.2.1 Determinazione della velocità teorica V_{PC}

Per conoscere l'indice di qualità IQ e poter applicare l'equazione (4.3) è necessario conoscere il valore della velocità teorica V_{PC} .

Tale valore di velocità può essere desunto a partire dalla composizione mineralogica del materiale: una volta note le quantità dei minerali presenti, è possibile calcolare la velocità teorica del mezzo come media pesata dei valori di velocità teorica dei singoli minerali (valori noti in letteratura); i pesi sono da intendersi come le percentuali dei minerali nel mezzo.

In questo caso, non è possibile determinare con sufficiente precisione le percentuali dei minerali presenti perché, come visto, l'analisi mediante diffrattometro e successivo calcolo mediante il metodo di Cook, è affetta da un errore troppo grande.

È comunque possibile determinare la velocità teorica per via grafica: per un mezzo caratterizzato esclusivamente da porosità per pori, le velocità longitudinali non risultano influenzate dalla presenza o meno dell'acqua in quanto, essendo i pori non comunicanti, non si riempiono di fluidi; per questo motivo, non si ha variazione nei valori di velocità longitudinali tra i provini secchi e i provini saturi. Al contrario, nel caso di materiale caratterizzato esclusivamente da porosità per fessurazione, la presenza dell'acqua influisce enormemente sui valori delle velocità longitudinali, in quanto le fessure, comunicanti tra loro, si riempiono di fluido. Tale fenomeno può essere visualizzato in un grafico con, in ascissa, i valori delle velocità longitudinali in condizioni sature, e, in ordinata, i valori delle velocità longitudinali secche: per i mezzi con solo contributo di pori, i valori di velocità longitudinali sono uguali sia in condizioni secche, sia in condizioni sature. Quindi, il luogo dei punti rappresentativi di questi valori è la bisettrice del grafico. Al contrario, per un mezzo caratterizzato da porosità per micro-fessure i valori ricadono lungo una retta che non passa per l'origine del grafico e che interseca la bisettrice.

Poiché, in generale, la porosità di un materiale è data sia da un contributo per pori che da un contributo per micro-fessure, in un grafico che riporta in ascisse le velocità longitudinali in condizioni sature, in ordinata le velocità longitudinali

secche, la retta rappresentativa dei valori misurati sarà diversa dalla bisettrice. In particolare, il valore della velocità secca corrispondente all'ordinata del punto di intersezione tra la bisettrice del grafico e la retta che approssima i valori sperimentali, viene presa come valore della velocità teorica del mezzo.

Inoltre, prolungando idealmente la retta di regressione ottenuta fino ad intersecare l'asse delle ascisse, si ottiene un valore di V_{P-sat} diverso da zero, in corrispondenza di un valore nullo di V_{P-sec} ; idealmente, questa circostanza corrisponde a una situazione in cui tutto il materiale è stato sostituito da acqua. Il valore che si ottiene di V_{P-sat} corrisponde ai valori di velocità di propagazione delle onde trasversali nel ghiaccio. Tale fatto si verifica per vari tipi di materiale e questo porta alla considerazione che l'acqua nelle fessure, per via degli stati tensionali, generi una sorta di ponte solido fra i lembi delle fessure (Tourenq e Fourmaitarux 1971).

Nella figura sottostante (Figura 4.1) viene visualizzato il grafico ottenuto sperimentalmente per il materiale in esame.

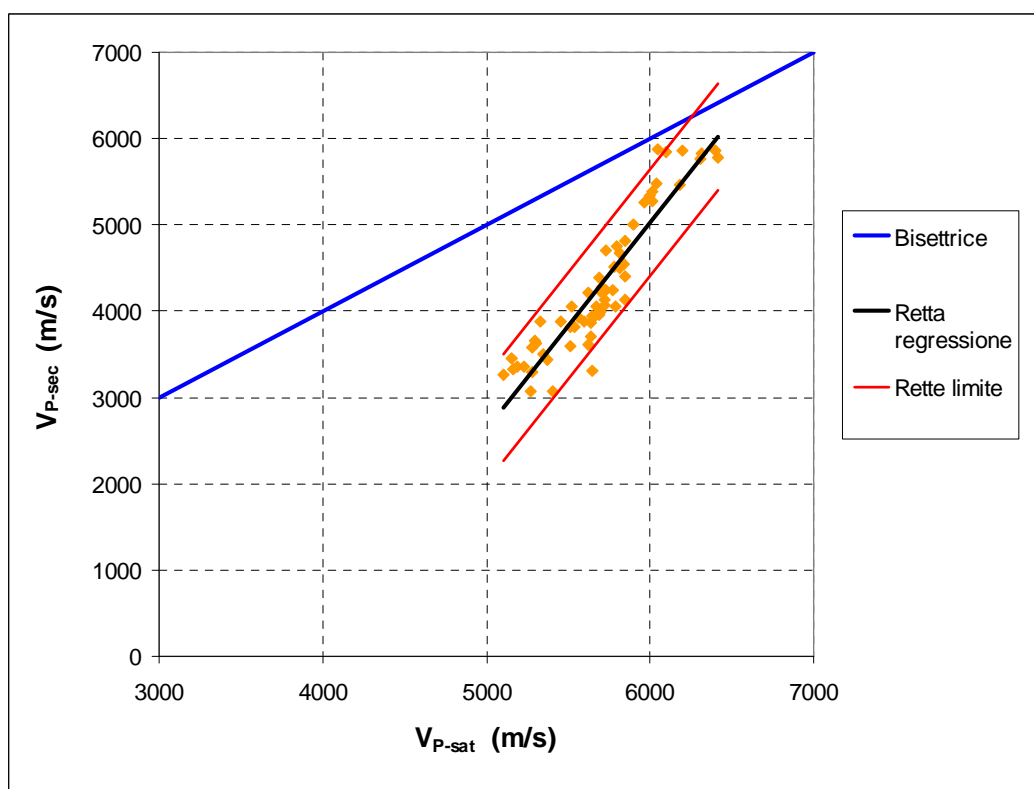


Figura 4.1. Relazione tra i valori sperimentali di velocità longitudinale secca e velocità longitudinale satura.

La retta di regressione che approssima i valori sperimentali, è definita in tal caso dall'equazione:

$$V_{P-sec} = 2,38 \cdot V_{P-sat} - 9234 \quad (4.4)$$

ed è caratterizzata da un coefficiente di correlazione pari a 0,86.

Se si considera V_{P-sat} come variabile indipendente, è possibile calcolare i valori teorici della variabile V_{P-sec} partendo dai valori sperimentali della velocità longitudinale satura e applicando l'equazione (4.4). Si definisce *errore* ε la differenza tra i valori calcolati (mediante la retta di regressione) di velocità longitudinale in condizioni secche e i corrispettivi valori misurati:

$$\varepsilon = V_{P-sec}^{calcolata} - V_{P-sec}^{misurata} \quad (4.5)$$

Per ogni provino è possibile quindi determinare un valore della variabile ε , e si considera, per tale variabile, una distribuzione normale: ciò significa che il valor medio di ε risulta nullo.

Considerando un modello di tipo lineare, si possono definire le equazioni delle rette parallele alla retta di regressione, che definiscono l'intervallo di variabilità dei valori misurati rappresentati sul grafico. Volendo considerare un intervallo all'interno nel quale ricada il 95% dei valori, le equazioni delle rette che definiscono tale intervallo sono date da:

$$V_{P-sec} = 2,38 \cdot V_{P-sat} - 9234 \pm 2\sigma_{\varepsilon} \quad (4.6)$$

dove σ_{ε} è la deviazione standard dell'errore ε (distribuzione normale) che, in tal caso, vale 309 m/s.

Note quindi le equazioni delle rette di regressione e delle rette che definiscono il campo di variabilità dei valori misurati, si ottengono i valori delle intercetta di tali rette sull'asse delle ascisse (V_{P-sat}) e di velocità longitudinale secca all'intersezione con la bisettrice (ovvero il valore della velocità teorica del materiale) riportati nella tabella seguente (Tabella 4.2).

Per la retta di regressione, si ricava un valore di V_{P-sec} all'intersezione con la bisettrice pari a 6712 m/s, e un valore di V_{P-sat} pari a 3887 m/s.

Considerando i limiti dell'intervallo di variabilità dei valori misurati, i valori di V_{P-sec} variano tra 6263 e 7160 m/s, mentre i valori di V_{P-sat} variano tra 3627 e 4147 m/s.

Retta	V_{P-sat}	V_{P-sec}
	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>
Retta limite inferiore	4147	7160
Retta di regressione	3887	6712
Retta limite superiore	3627	6263

Tabella 4.2. Valori delle velocità V_{P-sat} all'intersezione con l'asse delle ascisse e valori delle velocità V_{P-sec} in corrispondenza delle intersezioni con la bisettrice, ricavati per la retta di regressione e le rette limite.

Il valore di velocità teorica ottenuto (6712 m/s), risulta essere in accordo qualitativamente con la composizione mineralogica determinata mediante analisi diffrattometrica.

Infatti, se si considera una velocità teorica per la calcite pari a 6600 m/s e una velocità teorica pari a 7200 m/s per la dolomite (Anselmetti 1994, Woodside, Kenter e Köhnen 1998), il valore di circa 6700 m/s della velocità teorica ottenuto analiticamente, può essere anche determinato come media pesata tra questi valori, considerando una percentuale di circa il 10% per la dolomite e circa il 90% per la calcite. Indicativamente, questa composizione è in accordo con quanto ottenuto mediamente attraverso l'analisi diffrattometrica.

Anche i valori di V_{P-sat} ottenuti dall'intersezione delle rette con l'asse delle ascisse corrispondono ai valori delle velocità longitudinali nel ghiaccio.

4.2.2 Determinazione dei contributi di porosità

In base al valore determinato graficamente di velocità teorica, è possibile calcolare per ciascun campione il valore dell'indice di qualità IQ ; questi valori vengono inseriti in un grafico che riporta, in ordinata l'indice di qualità IQ , mentre, in ascissa, è riportata la porosità totale dei provini. In tale grafico, a partire dall'equazione (4.3), è possibile costruire delle rette a porosità per pori nP costante e delle rette a porosità per fessurazione nF costante.

Si costruisce così una sorta di abaco attraverso il quale, inserendo i valori di IQ e porosità totale per ogni campione, è possibile identificare in quale zona del grafico ricadano i campioni, determinando così i contributi di nP ed nF per ciascun provino (Figura 4.2).

Come si vede dal grafico, nel quale le rette sub-verticali sono a nP costante (da sinistra $nP=0$, $nP=5$, ecc), mentre le rette sub-orizzontali sono a nF costante (dall'alto $nF=0$, $nF=1$, ecc), tutti i campioni testati ricadono nelle immediate vicinanze della retta a $nP=0$; quindi, i campioni risultano caratterizzati quasi esclusivamente da porosità per fessurazione, circostanza in accordo con la natura metamorfica per ricristallizzazione del materiale.

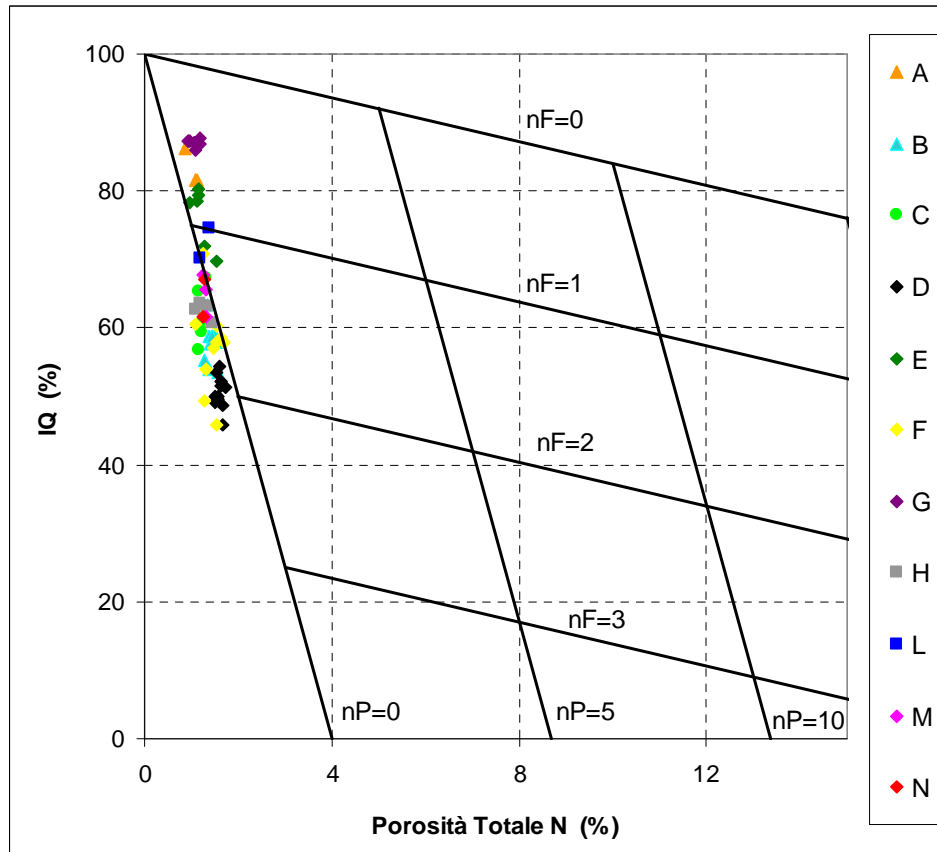


Figura 4.2. Indice di qualità in funzione della porosità totale

Capitolo 5

CONCLUSIONI

In base ai risultati sperimentali ottenuti, possono essere fatte alcune considerazioni:

- l'analisi mediante diffrattometro e la sua interpretazione non sono risultate in grado di accertare con precisione la composizione mineralogica del materiale testato. In particolare, anche se i picchi dei diffrattogrammi dimostrano la presenza di dolomite, non si può essere sicuri della natura di questo minerale: occorrerebbero indagini più approfondite per mettere in luce la forma e l'organizzazione con cui questo minerale si presenta nei campioni analizzati;
- il modello di correlazione proposto da Tourenq e Fourmaitarux, ha dimostrato qualitativamente la sua validità; esso risulta infatti un metodo sufficientemente affidabile per avere un'idea del tipo di porosità presente nel materiale a partire dalle misure soniche e della porosità totale;
- le sezioni sottili hanno messo in luce la presenza di strutture microscopiche differenti tra loro, sia per dimensioni dei grani sia per tessitura. Questi aspetti sono alla base dell'alta variabilità dei valori sperimentali ottenuti, specialmente per quanto riguarda il R.I.H.N. test: si sono riscontrati valori di R.I.H.N. superiori in corrispondenza dei campioni con dimensioni dei grani inferiori. Si ribadisce anche in questo punto, la capacità del R.I.H.N. test di identificare, anche a piccola scala, tali variazioni;
- per quanto riguarda l'indice di resistenza R.I.H.N., tale prova, sia nella variante a colpi fissi, sia nella variante a colpi variabili, risulta in grado di distinguere campioni caratterizzati da caratteristiche microstrutturali differenti, come hanno evidenziato le sezioni sottili. La prova, per entrambe

le varianti, risulta rapida, non necessita di preparazione preventiva dei campioni ed è quindi adatta per essere applicata a un numero elevato di provini. Inoltre, date le piccole dimensioni dei campioni da testare, risulta in grado di discriminare differenze a piccola scala, anche microstrutturali (come hanno messo in luce le sezioni sottili), a differenza delle altre prove di laboratorio che lavorano su provini di dimensioni superiori. Tale fatto spiega gli elevati coefficienti di variazione riscontrati per ciascun blocco per l'indice di resistenza R.I.H.N.: differenze anche sulla scala del decimetro sono riscontrabili con questa prova di laboratorio. Come già osservato, si ritengono necessarie alcune modifiche dell'apparecchiatura.

BIBLIOGRAFIA

Anselmetti F.S., *Physical Properties and Seismic Response of Carbonate Sediments and Rocks*, Dissertation ETH Nr. 10845, 1994.

Bandini A., *Approcci metodologici alla classifica tecnica di marmi sottoposti ad alta temperatura*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Bologna, Anno Accademico 2005-2006.

Berry P., Martinetti S., Retacchi F., Ribacchi R., Sciotti M., *Cataclasis alteration of a granitic rock and their influence on the geomechanical characteristics*, Proceedings of the III International Congress I.A.E.G., 4-8 September 1978, vol. 1, pag. 123-138.

Berry P., Dantini E.M., Massacci P., *Influence of mechanical characteristics of rocks on size reduction processing*, International conference: Mineral processing and extractive metallurgy, Kunming, 1984.

Berry P., De Virgilio F., *Significatività dell'indice di resistenza R.I.H.N.*, III Convegno nazionale: Attività Estrattiva dei Minerali di 2° Categoria, Bari 17-19 Gennaio 1985.

Brignoli E., Gotti M., *Misure di velocità di onde di taglio in laboratorio con l'impiego di trasduttori piezoelettrici*, Rivista Italiana di Geotecnica 1/92, pag. 5-16.

Brook N., Misra B., *A critical analysis of the stamp mill method of determining Protodyakonov rock strength and the development of a method of determining a Rock Impact Hardness Number*, Proceedings 12th Symposium of Rock Mechanics, University of Missouri, November 1970.

Brook N., *The Use of Irregular Specimens for Rock Strength Tests*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences (1977). Abstract, n. 14, pp 193 – 202.

Centro di Geotecnologie, *Carta Giacimentologica dei marmi delle Alpi Apuane a scala 1:10000 e sua informatizzazione*, Marzo 2007 (www.marmiapuane.info).

Ciabatti M., Del Monte M., *Appunti di mineralogia e geologia*, Cooperativa Libreria Universitaria, Bologna.

Cook H.E., Johnson P.D., Matti J.C., Zemmels I., *Methods of sample preparation and x-ray diffraction data analysis*, X-ray mineralogy laboratory, deep sea drilling project, University of California, Riverside. Init. Rep. DSDP, 28: 999-1007.

De Virgilio F., *Aspetto energetico ed indici di qualità delle rocce nella frantumazione*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Roma, Anno Accademico 1981 – 1982.

Forfori B., *Studio Geomorfologico, Geologico, Idrogeologico e Strutturale dell'area estrattiva Fossa dei Tomei sita della valle estrattiva di Arnetola – Comune di Vagli Sotto (LU)*, Febbraio 2005.

Gotti G., *Significatività del Rock Impact Hardness Number per la caratterizzazione meccanica delle arenarie*, Tesi di Laurea, Università degli studi di Bologna, Anno Accademico 2006-2007.

Martoro F., *Classifica tecnica di calcari e marmi in relazione al loro comportamento meccanico ad alta temperatura*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Bologna, Anno Accademico 2002 – 2003.

Norinelli A., *Elementi di geofisica applicata*, Patron Editore, 1996.

Norma europea UNI EN 1936, *Metodi di prova per pietre naturali, determinazione delle masse volumiche reale e apparente e della porosità totale e aperta*, Gennaio 2001.

Norma Italiana UNI 8520, *Aggregati per confezione di calcestruzzi. Campionamento*, Novembre 1984.

Paithankar A. G., Misra G. B., *A Critical Appraisal of the Protodyakonov Index*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences (1976), Abstract, n. 13, pp 249 – 251.

Rabbi E., *Rocce carbonatiche: semplici analisi chimiche ed equilibri della CO₂ in soluzione acquosa*, Cooperativa Libreria Universitaria, Bologna 1972.

Rabia H., Brook N., *The Effects of Apparatus Size and Surface Area of Charge on the Impact Strength of Rock*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences (1981). Abstract, n. 18, pp 211 – 219.

Raccomandazioni I.S.R.M., *Raccomandazioni per la determinazione della resistenza a compressione monoassiale e della deformabilità dei materiali rocciosi*, Rivista Italiana di Geotecnica 3/94, pag. 247-251.

Raccomandazioni I.S.R.M., *Raccomandazioni per la determinazione della velocità delle onde acustiche in provini di roccia*, Rivista Italiana di Geotecnica 3/95, pag. 231-236.

Rotonda T., *Influenza della microfessurazione termica sulla caratteristiche di deformabilità e resistenza delle rocce*, Tesi di Dottorato, Università di Roma La Sapienza, 1991.

Tagliavini E., *Significatività della caratterizzazione meccanica delle rocce con prove speditive*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Bologna, Anno Accademico 2004 – 2005.

Tourenq D., Fourmaintraux Denis A., *Propagation des ondes et discontinuités des roches*, Symposium of the International Society for Rock Mechanics, Nancy 1971.

Trevisan L., Giglia G., *Introduzione alla geologia*, Pacini Editore.

Woodside J.M., Kenter J.A.M., Köhnen A., *Acoustic properties from logs and discrete measurements (sites 966 and 967) on Eratosthenes seamount: controls and ground truth*, Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 160, 1998.

SITI INTERNET CONSULTATI:

Centro di Geotecnologie Università di Siena, www.marmiapuane.info, 1 Dicembre 2008.

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (I.S.P.R.A.), www.apat.gov.it/site/it-IT/Servizi_per_l'Ambiente/Carte_geologiche/, 9 Dicembre 2008.

ALLEGATI

Sono di seguito riportati tutti i valori ottenuti per ciascun provino mediante la prova R.I.H.N. a numero di colpi variabili e la prova R.I.H.N. a numero di colpi fissi.

A.1 Risultati R.I.H.N.

- BLOCCO A:

<i>Campione Ar1</i>	1 frammento	R.I.H.N.=44	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,10		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
10	65,02	2,08	3,10%
25	59,12	7,98	11,89%
40	51,00	16,10	23,99%
50	47,38	19,72	29,39%

<i>Campione Ar2</i>	1 frammento	R.I.H.N.=36	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,40		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
8	62,56	3,84	5,78%
16	59,16	7,24	10,90%
25	54,34	12,06	18,16%
40	48,26	18,14	27,32%
47	45,18	21,22	31,96%

<i>Campione Ar3</i>	1 frammento	R.I.H.N.=32	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,20		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
8	62,80	3,40	5,14%
16	57,96	8,24	12,45%
25	53,06	13,14	19,85%
35	48,04	18,16	27,43%
43	44,52	21,68	32,75%

<i>Campione Ar4</i>	1 frammento	R.I.H.N.=40	
<i>Peso iniziale (g)</i>	65,58		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
8	62,64	2,94	4,48%
16	59,16	6,42	9,79%
25	55,58	10,00	15,25%
35	50,80	14,78	22,54%
45	46,70	18,88	28,79%

<i>Campione Ar5</i>	1 frammento	R.I.H.N.=41	
<i>Peso iniziale (g)</i>	65,44		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
8	63,32	2,12	3,24%
16	60,54	4,90	7,49%
25	56,60	8,84	13,51%
35	51,76	13,68	20,90%
45	45,92	19,52	29,83%

<i>Campione Ar6</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=33	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,22		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
8	62,58	3,64	5,50%
16	58,72	7,50	11,33%
25	52,76	13,46	20,33%
35	48,60	17,62	26,61%
43	45,70	20,52	30,99%

<i>Campione Ar7</i>	2 frammenti	R.I.H.N =42	
<i>Peso iniziale (g)</i>	65,14		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
8	63,78	1,36	2,09%
16	60,76	4,38	6,72%
25	56,30	8,84	13,57%
35	52,06	13,08	20,08%
45	47,44	17,70	27,17%
50	44,78	20,36	31,26%

<i>Campione Ar8</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=26	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,46		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
8	63,18	3,28	4,94%
16	56,48	9,98	15,02%
25	50,44	16,02	24,10%
30	47,18	19,28	29,01%

<i>Campione Ar9</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=27	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,94		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
8	61,96	4,98	7,44%
16	58,20	8,74	13,06%
25	52,06	14,88	22,23%
35	45,04	21,90	32,72%

<i>Campione Ar10</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=40	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,72		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
8	64,88	2,84	4,19%
16	61,38	6,34	9,36%
25	57,30	10,42	15,39%
35	53,18	14,54	21,47%
45	48,52	19,20	28,35%

- **BLOCCO B:**

<i>Campione Br1</i>	1 frammento	R.I.H.N.=22	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,98		
<i>Numero colpi</i>	<i>Peso Rifiuto (g)</i>	<i>Peso Passato (g)</i>	<i>% Passato</i>
3	65,80	1,18	1,76%
8	61,82	5,16	7,70%
15	56,22	10,76	16,06%
25	46,60	20,38	30,43%

<i>Campione Br2</i>	1 frammento	R.I.H.N.=20	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,50		
<i>Numero colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	63,66	2,84	4,27%
10	59,94	6,56	9,86%
20	49,98	16,52	24,84%
24	45,72	20,78	31,25%

<i>Campione Br3</i>	1 frammento	R.I.H.N.=16	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,00		
<i>Numero colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
8	59,78	6,22	9,42%
12	54,86	11,14	16,88%
16	49,02	16,98	25,73%
18	46,94	19,06	28,88%

<i>Campione Br4</i>	1 frammento	R.I.H.N.=17	
<i>Peso iniziale (g)</i>	65,88		
<i>Numero colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	62,86	3,02	4,58%
8	59,46	6,42	9,74%
12	54,12	11,76	17,85%
16	49,44	16,44	24,95%
20	45,60	20,28	30,78%

<i>Campione Br5</i>	1 frammento	R.I.H.N.=11	
<i>Peso iniziale (g)</i>	65,94		
<i>Numero colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	59,66	6,28	9,52%
7	55,56	10,38	15,74%
10	51,34	14,60	22,14%
13	45,08	20,86	31,63%

<i>Campione Br6</i>	1 frammenti	R.I.H.N.=17	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,20		
<i>Numero colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
3	65,12	2,08	3,10%
8	60,46	6,74	10,03%
12	56,48	10,72	15,95%
16	50,92	16,28	24,23%
18	48,54	18,66	27,77%
21	46,66	20,54	30,57%

<i>Campione Br7</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=18	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,18		
<i>Numero colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
3	65,26	1,92	2,86%
8	60,40	6,78	10,09%
12	56,20	10,98	16,34%
16	52,08	15,10	22,48%
20	47,82	19,36	28,82%

<i>Campione Br8</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=11	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,56		
<i>Numero colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	62,18	4,38	6,58%
8	55,20	11,36	17,07%
10	51,50	15,06	22,63%
11	49,76	16,80	25,24%
12	47,84	18,72	28,13%

<i>Campione Br9</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=16	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,98		
<i>Numero colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
3	64,80	2,18	3,25%
8	59,90	7,08	10,57%
12	56,30	10,68	15,95%
16	49,40	17,58	26,25%
18	47,36	19,62	29,29%

<i>Campione Br10</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=16	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,82		
<i>Numero colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
3	64,60	2,22	3,32%
8	56,96	9,86	14,76%
12	55,32	11,50	17,21%
16	50,60	16,22	24,27%
18	47,68	19,14	28,64%

- BLOCCO C:

<i>Campione Cr1</i>	1 frammenti	R.I.H.N.=12	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,98		
<i>Numero colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	63,62	3,36	5,02%
8	54,44	12,54	18,72%
12	49,70	17,28	25,80%
14	47,40	19,58	29,23%

<i>Campione Cr2</i>	1 frammento	R.I.H.N.=10	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,10		
<i>Numero colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	62,44	4,66	6,94%
8	54,66	12,44	18,54%
12	46,50	20,60	30,70%

<i>Campione Cr3</i>	1 frammento	R.I.H.N.=20	
<i>Peso iniziale (g)</i>	64,76		
<i>Numero colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
3	63,04	1,72	2,66%
6	61,96	2,80	4,32%
12	56,80	7,96	12,29%
18	49,70	15,06	23,26%
22	46,60	18,16	28,04%

<i>Campione Cr4</i>	1 frammento	R.I.H.N.=15	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,70		
<i>Numero colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	63,16	3,54	5,31%
8	59,54	7,16	10,73%
12	54,00	12,70	19,04%
16	48,14	18,56	27,83%
18	46,56	20,14	30,19%

<i>Campione Cr5</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=15	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,48		
<i>Numero colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	62,80	3,68	5,54%
8	57,28	9,20	13,84%
12	53,52	12,96	19,49%
16	48,06	18,42	27,71%
19	46,00	20,48	30,81%

<i>Campione Cr6</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=19	
<i>Peso iniziale (g)</i>	64,52		
<i>Numero colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	62,54	1,98	3,07%
8	58,06	6,46	10,01%
12	54,90	9,62	14,91%
16	49,46	15,06	23,34%
20	46,70	17,82	27,62%
23	44,60	19,92	30,87%

<i>Campione Cr7</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=15	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,98		
<i>Numero colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	63,88	3,10	4,63%
8	58,28	8,70	12,99%
12	53,86	13,12	19,59%
15	49,72	17,26	25,77%
18	46,58	20,40	30,46%

<i>Campione Cr8</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=12	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,72		
<i>Numero colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	63,60	3,12	4,68%
8	56,88	9,84	14,75%
12	49,28	17,44	26,14%
14	46,22	20,50	30,73%

<i>Campione Cr9</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=14	
<i>Peso iniziale (g)</i>	65,78		
<i>Numero colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	62,60	3,18	4,83%
8	56,68	9,10	13,83%
12	51,54	14,24	21,65%
16	46,08	19,70	29,95%

<i>Campione Cr10</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=10	
<i>Peso iniziale (g)</i>	65,58		
<i>Numero colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
3	61,02	4,56	6,95%
6	56,22	9,36	14,27%
9	51,78	13,80	21,04%
12	46,04	19,54	29,80%

- BLOCCO D:

<i>Campione Dr1</i>	1 frammento	R.I.H.N.=15	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,54		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
3	64,40	2,14	3,22%
6	61,16	5,38	8,09%
12	52,56	13,98	21,01%
15	49,20	17,34	26,06%
18	46,42	20,12	30,24%

<i>Campione Dr2</i>	1 frammento	R.I.H.N.=14	
<i>Peso iniziale (g)</i>	65,76		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	62,54	3,22	4,90%
8	57,88	7,88	11,98%
12	51,28	14,48	22,02%
14	48,48	17,28	26,28%
16	47,24	18,52	28,16%

<i>Campione Dr3</i>	1 frammento	R.I.H.N.=14	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,44		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	63,74	2,70	4,06%
8	57,96	8,48	12,76%
12	52,22	14,22	21,40%
14	49,10	17,34	26,10%
16	47,44	19,00	28,60%

<i>Campione Dr4</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=14	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,00		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	61,90	4,10	6,21%
8	57,30	8,70	13,18%
12	51,06	14,94	22,64%
15	48,26	17,74	26,88%
18	44,96	21,04	31,88%

<i>Campione Dr5</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=19	
<i>Peso iniziale (g)</i>	64,76		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	62,44	2,32	3,58%
8	59,74	5,02	7,75%
12	56,20	8,56	13,22%
20	47,40	17,36	26,81%
22	45,40	19,36	29,89%

<i>Campione Dr6</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=18	
<i>Peso iniziale (g)</i>	65,78		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	63,96	1,82	2,77%
8	60,80	4,98	7,57%
16	51,18	14,60	22,20%
18	49,26	16,52	25,11%
20	47,42	18,36	27,91%

<i>Campione Dr7</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=14	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,52		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	63,92	2,60	3,91%
8	57,64	8,88	13,35%
12	51,44	15,08	22,67%
16	47,68	18,84	28,32%

<i>Campione Dr8</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=13	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,12		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	61,58	4,54	6,87%
8	56,26	9,86	14,91%
12	50,14	15,98	24,17%
15	47,04	19,08	28,86%

<i>Campione Dr9</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=11	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,12		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	61,58	4,54	6,87%
8	56,26	9,86	14,91%
12	50,14	15,98	24,17%
15	47,04	19,08	28,86%

<i>Campione Dr10</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=17	
<i>Peso iniziale (g)</i>	65,60		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	62,44	3,16	4,82%
8	58,14	7,46	11,37%
12	54,08	11,52	17,56%
16	50,18	15,42	23,51%
20	47,10	18,50	28,20%

- BLOCCO E:

<i>Campione Er1</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=53	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,52		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	65,44	1,08	1,62%
15	63,48	3,04	4,57%
30	58,26	8,26	12,42%
50	50,74	15,78	23,72%
60	47,46	19,06	28,65%
68	45,04	21,48	32,29%

<i>Campione Er2</i>	1 frammento	R.I.H.N.=60	
<i>Peso iniziale (g)</i>	64,68		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
10	64,20	0,48	0,74%
30	58,68	6,00	9,28%
45	53,02	11,66	18,03%
60	47,84	16,84	26,04%
68	44,80	19,88	30,74%

<i>Campione Er3</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=53	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,44		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
10	63,70	2,74	4,12%
20	59,92	6,52	9,81%
30	56,18	10,26	15,44%
45	51,92	14,52	21,85%
55	49,24	17,20	25,89%
65	47,20	19,24	28,96%

<i>Campione Er4</i>	1 frammento	R.I.H.N.=36	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,22		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
10	63,34	2,88	4,35%
20	58,72	7,50	11,33%
30	51,36	14,86	22,44%
40	47,56	18,66	28,18%

<i>Campione Er5</i>	1 frammento	R.I.H.N.=28	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,82		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
10	62,48	4,34	6,50%
20	54,48	12,34	18,47%
25	51,00	15,82	23,68%
30	48,74	18,08	27,06%
35	46,08	20,74	31,04%

<i>Campione Er6</i>	1 frammento	R.I.H.N.=35	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,26		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
10	61,88	4,38	6,61%
20	57,26	9,00	13,58%
30	51,84	14,42	21,76%
40	47,10	19,16	28,92%

<i>Campione Er7</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=30	
<i>Peso iniziale (g)</i>	65,54		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
10	61,74	3,80	5,80%
20	55,46	10,08	15,38%
25	50,80	14,74	22,49%
30	48,62	16,92	25,82%
35	46,22	19,32	29,48%

<i>Campione Er8</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=29	
<i>Peso iniziale (g)</i>	65,54		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
10	60,96	4,58	6,99%
20	53,94	11,60	17,70%
25	51,06	14,48	22,09%
30	48,88	16,66	25,42%
35	46,32	19,22	29,33%

<i>Campione Er9</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=40	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,80		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
10	62,56	4,24	6,35%
20	58,52	8,28	12,40%
30	53,72	13,08	19,58%
40	50,00	16,80	25,15%
50	46,56	20,24	30,30%

<i>Campione Er10</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=42	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,62		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
10	63,38	3,24	4,86%
20	59,46	7,16	10,75%
30	55,08	11,54	17,32%
40	50,40	16,22	24,35%
50	47,02	19,60	29,42%

- BLOCCO F:

<i>Campione Fr1</i>	1 frammento	R.I.H.N.=2	
<i>Peso iniziale (g)</i>	65,00		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
2	41,52	23,48	36,12%

<i>Campione Fr2</i>	1 frammento	R.I.H.N.=22	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,14		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
1	65,26	0,88	1,33%
2	64,70	1,44	2,18%
4	63,54	2,60	3,93%
6	61,62	4,52	6,83%
8	59,74	6,40	9,68%
10	57,94	8,20	12,40%
13	55,40	10,74	16,24%
16	53,28	12,86	19,44%
20	50,54	15,60	23,59%
23	48,96	17,18	25,98%
26	47,68	18,46	27,91%

<i>Campione Fr3</i>	1 frammento	R.I.H.N.=24	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,36		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
2	66,62	0,74	1,10%
4	66,14	1,22	1,81%
7	64,40	2,96	4,39%
10	62,06	5,30	7,87%
15	58,70	8,66	12,86%
20	53,50	13,86	20,58%
25	48,34	19,02	28,24%
27	46,44	20,92	31,06%

<i>Campione Fr4</i>	1 frammento	R.I.H.N.=39	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,98		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
2	66,78	0,20	0,30%
5	65,54	1,44	2,15%
10	64,00	2,98	4,45%
20	58,88	8,10	12,09%
30	54,52	12,46	18,60%
40	49,60	17,38	25,95%
45	47,20	19,78	29,53%

<i>Campione Fr5</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=8	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,64		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
1	66,24	1,40	2,07%
2	64,32	3,32	4,91%
3	61,06	6,58	9,73%
5	55,84	11,80	17,45%
7	53,18	14,46	21,38%
9	46,32	21,32	31,52%

<i>Campione Fr6</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=11	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,20		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
3	65,86	1,34	1,99%
6	58,70	8,50	12,65%
9	53,66	13,54	20,15%
12	47,72	19,48	28,99%
15	44,80	22,40	33,33%

<i>Campione Fr7</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=13	
<i>Peso iniziale (g)</i>	65,66		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
2	63,26	2,40	3,66%
4	61,78	3,88	5,91%
8	57,42	8,24	12,55%
12	51,44	14,22	21,66%
15	44,68	20,98	31,95%

<i>Campione Fr8</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=11	
<i>Peso iniziale (g)</i>	64,36		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
3	61,26	3,10	4,82%
6	57,68	6,68	10,38%
10	49,70	14,66	22,78%
12	46,00	18,36	28,53%
14	43,68	20,68	32,13%

<i>Campione Fr9</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=30	
<i>Peso iniziale (g)</i>	64,76		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	62,16	2,60	4,01%
10	59,76	5,00	7,72%
25	50,98	13,78	21,28%
35	46,04	18,72	28,91%

<i>Campione Fr10</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=10	
<i>Peso iniziale (g)</i>	65,84		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
3	63,56	2,28	3,46%
6	58,62	7,22	10,97%
9	51,88	13,96	21,20%
12	43,94	21,90	33,26%

- BLOCCO G:

<i>Campione Gr1</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=44	
<i>Peso iniziale (g)</i>	65,24		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
1	65,00	0,24	0,37%
3	64,52	0,72	1,10%
6	63,60	1,64	2,51%
10	61,84	3,40	5,21%
15	60,12	5,12	7,85%
20	58,82	6,42	9,84%
30	54,76	10,48	16,06%
36	51,50	13,74	21,06%
41	49,86	15,38	23,57%
45	48,00	17,24	26,43%
49	46,82	18,42	28,23%

<i>Campione Gr2</i>	1 frammento	R.I.H.N.=61	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,78		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	67,52	0,26	0,38%
11	65,92	1,86	2,74%
15	65,20	2,58	3,81%
25	62,02	5,76	8,50%
35	59,10	8,68	12,81%
45	55,12	12,66	18,68%
55	52,24	15,54	22,93%
65	48,94	18,84	27,80%
70	47,60	20,18	29,77%

<i>Campione Gr3</i>	1 frammento	R.I.H.N.=78	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,74		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
8	65,74	1,00	1,50%
20	64,52	2,22	3,33%
35	61,02	5,72	8,57%
55	55,68	11,06	16,57%
70	51,36	15,38	23,04%
85	47,92	18,82	28,20%
98	45,00	21,74	32,57%

<i>Campione Gr4</i>	1 frammento	R.I.H.N.=76	
<i>Peso iniziale (g)</i>	65,00		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
10	63,70	1,30	2,00%
30	59,40	5,60	8,62%
50	54,00	11,00	16,92%
70	49,50	15,50	23,85%
85	46,44	18,56	28,55%

<i>Campione Gr5</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=63	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,32		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
15	63,02	3,30	4,98%
30	58,82	7,50	11,31%
45	54,62	11,70	17,64%
60	50,40	15,92	24,00%
75	46,34	19,98	30,13%

<i>Campione Gr6</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=68	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,88		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
15	64,28	2,60	3,89%
30	60,70	6,18	9,24%
50	54,26	12,62	18,87%
70	49,56	17,32	25,90%
80	46,76	20,12	30,08%

<i>Campione Gr7</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=71	
<i>Peso iniziale (g)</i>	65,42		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
15	63,44	1,98	3,03%
30	60,26	5,16	7,89%
45	56,44	8,98	13,73%
65	50,26	15,16	23,17%
80	47,22	18,20	27,82%
92	43,60	21,82	33,35%

<i>Campione Gr8</i>	1 frammento	R.I.H.N.=40	
<i>Peso iniziale (g)</i>	64,84		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
10	61,14	3,70	5,71%
20	57,44	7,40	11,41%
30	52,48	12,36	19,06%
35	50,42	14,42	22,24%
40	48,16	16,68	25,72%
45	46,56	18,28	28,19%

<i>Campione Gr9</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=52	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,08		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
10	64,16	2,92	4,35%
20	60,00	7,08	10,55%
30	57,12	9,96	14,85%
45	52,04	15,04	22,42%
60	48,14	18,94	28,23%

<i>Campione Gr10</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=56	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,40		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
10	64,60	1,80	2,71%
30	57,64	8,76	13,19%
45	52,76	13,64	20,54%
60	48,46	17,94	27,02%
70	45,06	21,34	32,14%

- **BLOCCO H:**

<i>Campione Hr1</i>	1 frammento	R.I.H.N.=12	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,62		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
2	66,00	1,62	2,40%
4	64,16	3,46	5,12%
6	61,20	6,42	9,49%
8	58,10	9,52	14,08%
10	53,78	13,84	20,47%
12	50,08	17,54	25,94%
14	46,44	21,18	31,32%

<i>Campione Hr2</i>	1 frammento	R.I.H.N.=17	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,04		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
2	65,80	0,24	0,36%
4	65,00	1,04	1,57%
6	63,38	2,66	4,03%
8	59,80	6,24	9,45%
10	57,02	9,02	13,66%
12	54,24	11,80	17,87%
14	52,08	13,96	21,14%
16	49,82	16,22	24,56%
18	47,28	18,76	28,41%
19	45,90	20,14	30,50%

<i>Campione Hr3</i>	1 frammento	R.I.H.N.=19	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,62		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
3	66,00	1,62	2,40%
6	64,56	3,06	4,53%
9	62,02	5,60	8,28%
12	60,64	6,98	10,32%
16	54,72	12,90	19,08%
19	50,02	17,60	26,03%
21	47,52	20,10	29,72%
23	45,74	21,88	32,36%

<i>Campione Hr4</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=19	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,66		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	65,80	1,86	2,75%
8	62,62	5,04	7,45%
12	59,02	8,64	12,77%
16	53,76	13,90	20,54%
19	49,62	18,04	26,66%
21	47,42	20,24	29,91%

<i>Campione Hr5</i>	1 frammento	R.I.H.N.=24	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,22		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	64,80	1,42	2,14%
10	62,52	3,70	5,59%
20	55,56	10,66	16,10%
30	42,00	24,22	36,58%

<i>Campione Hr6</i>	1 frammento	R.I.H.N.=28	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,42		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	63,98	2,44	3,67%
8	61,86	4,56	6,87%
18	57,94	8,48	12,77%
25	52,36	14,06	21,17%
30	48,74	17,68	26,62%
35	44,10	22,32	33,60%

<i>Campione Hr7</i>	1 frammento	R.I.H.N.=21	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,60		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	62,88	3,72	5,59%
15	55,40	11,20	16,82%
20	50,24	16,36	24,56%
25	46,34	20,26	30,42%

<i>Campione Hr8</i>	1 frammento	R.I.H.N.=19	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,22		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	64,20	3,02	4,49%
15	53,60	13,62	20,26%
18	50,84	16,38	24,37%
21	48,56	18,66	27,76%
24	46,66	20,56	30,59%

<i>Campione Hr9</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=22	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,06		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	63,80	2,26	3,42%
15	55,38	10,68	16,17%
20	51,56	14,50	21,95%
25	45,32	20,74	31,40%

<i>Campione Hr10</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=19	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,72		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	63,82	2,90	4,35%
15	53,22	13,50	20,23%
18	50,48	16,24	24,34%
21	47,46	19,26	28,87%

- BLOCCO L:

<i>Campione Lr1</i>	1 frammento	R.I.H.N.=21	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,66		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
2	65,76	1,90	2,81%
5	62,08	5,58	8,25%
8	60,04	7,62	11,26%
12	57,84	9,82	14,51%
16	54,52	13,14	19,42%
21	50,96	16,70	24,68%
24	49,26	18,40	27,19%

<i>Campione Lr2</i>	1 frammento	R.I.H.N.=89	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,52		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	66,98	0,54	0,80%
15	65,76	1,76	2,61%
30	63,40	4,12	6,10%
45	59,98	7,54	11,17%
60	56,76	10,76	15,94%
80	52,60	14,92	22,10%
100	48,16	19,36	28,67%
115	45,02	22,50	33,32%

<i>Campione Lr3</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=54	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,72		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	66,58	1,14	1,68%
10	65,36	2,36	3,48%
20	61,82	5,90	8,71%
30	58,32	9,40	13,88%
40	54,62	13,10	19,34%
55	50,88	16,84	24,87%
65	47,90	19,82	29,27%

<i>Campione Lr4</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=66	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,62		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
10	66,70	0,92	1,36%
20	65,08	2,54	3,76%
40	58,36	9,26	13,69%
55	53,90	13,72	20,29%
70	48,92	18,70	27,65%
85	44,70	22,92	33,90%

<i>Campione Lr5</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=45	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,92		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
10	63,92	3,00	4,48%
20	59,82	7,10	10,61%
30	55,58	11,34	16,95%
40	51,56	15,36	22,95%
50	47,90	19,02	28,42%

<i>Campione Lr6</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=25	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,00		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	63,40	3,60	5,37%
10	61,32	5,68	8,48%
25	50,24	16,76	25,01%
30	45,92	21,08	31,46%

<i>Campione Lr7</i>	1 frammento	R.I.H.N.=20	
<i>Peso iniziale (g)</i>	65,50		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	63,80	1,70	2,60%
15	55,00	10,50	16,03%
20	48,42	17,08	26,08%
24	45,64	19,86	30,32%

<i>Campione Lr8</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=28	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,72		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	64,26	2,46	3,69%
15	57,84	8,88	13,31%
20	54,68	12,04	18,05%
25	51,70	15,02	22,51%
30	48,90	17,82	26,71%
36	45,76	20,96	31,41%

<i>Campione Lr9</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=9	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,12		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	57,82	9,30	13,86%
8	52,50	14,62	21,78%
11	44,52	22,60	33,67%

<i>Campione Lr10</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=39	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,00		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	63,72	2,28	3,45%
15	60,06	5,94	9,00%
25	55,46	10,54	15,97%
35	51,06	14,94	22,64%
45	47,02	18,98	28,76%

- BLOCCO M:

<i>Campione Mr1</i>	1 frammento	R.I.H.N.=20	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,40		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
3	64,88	1,52	2,29%
8	61,54	4,86	7,32%
12	57,92	8,48	12,77%
16	52,82	13,58	20,45%
20	48,86	17,54	26,42%
24	45,66	20,74	31,23%

<i>Campione Mr2</i>	1 frammento	R.I.H.N.=23	
<i>Peso iniziale (g)</i>	65,00		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	63,50	1,50	2,31%
10	59,98	5,02	7,72%
15	55,06	9,94	15,29%
20	49,90	15,10	23,23%
25	46,70	18,30	28,15%

<i>Campione Mr3</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=16	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,50		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	63,68	2,82	4,24%
10	57,76	8,74	13,14%
15	51,10	15,40	23,16%
20	43,26	23,24	34,95%

<i>Campione Mr4</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=20	
<i>Peso iniziale (g)</i>	64,50		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	61,98	2,52	3,91%
8	59,60	4,90	7,60%
12	55,22	9,28	14,39%
16	52,00	12,50	19,38%
20	47,20	17,30	26,82%
24	44,42	20,08	31,13%

<i>Campione Mr5</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=20	
<i>Peso iniziale (g)</i>	64,98		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	61,66	3,32	5,11%
10	58,40	6,58	10,13%
15	52,98	12,00	18,47%
20	47,14	17,84	27,45%
25	44,14	20,84	32,07%

<i>Campione Mr6</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=30	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,20		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	65,90	1,30	1,93%
10	62,08	5,12	7,62%
15	59,44	7,76	11,55%
20	56,24	10,96	16,31%
30	49,40	17,80	26,49%
35	47,66	19,54	29,08%

<i>Campione Mr7</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=15	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,16		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	62,88	3,28	4,96%
10	56,32	9,84	14,87%
14	51,02	15,14	22,88%
18	45,56	20,60	31,14%

<i>Campione Mr8</i>	1 frammento	R.I.H.N.=14	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,24		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	61,36	5,88	8,74%
10	55,24	12,00	17,85%
13	51,38	15,86	23,59%
16	48,26	18,98	28,23%
18	46,44	20,80	30,93%

<i>Campione Mr9</i>	1 frammento	R.I.H.N.=15	
<i>Peso iniziale (g)</i>	65,24		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	61,18	4,06	6,22%
10	54,52	10,72	16,43%
13	51,00	14,24	21,83%
16	47,40	17,84	27,35%
18	45,24	20,00	30,66%

<i>Campione Mr10</i>	1 frammento	R.I.H.N.=14	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,44		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	65,66	1,78	2,64%
10	58,72	8,72	12,93%
15	48,14	19,30	28,62%
18	43,58	23,86	35,38%

- BLOCCO N:

<i>Campione Nr1</i>	1 frammento	R.I.H.N.=26	
<i>Peso iniziale (g)</i>	64,74		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	63,90	0,84	1,30%
10	59,16	5,58	8,62%
15	56,30	8,44	13,04%
20	51,92	12,82	19,80%
25	48,16	16,58	25,61%
30	45,60	19,14	29,56%

<i>Campione Nr2</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=21	
<i>Peso iniziale (g)</i>	65,66		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	63,74	1,92	2,92%
10	59,06	6,60	10,05%
15	54,98	10,68	16,27%
20	49,78	15,88	24,19%
26	43,98	21,68	33,02%

<i>Campione Nr3</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=15	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,88		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	63,06	3,82	5,71%
10	56,50	10,38	15,52%
15	49,40	17,48	26,14%
19	44,36	22,52	33,67%

<i>Campione Nr4</i>	2 frammenti	R.I.H.N.=28	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,26		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	64,88	1,38	2,08%
10	61,52	4,74	7,15%
15	58,42	7,84	11,83%
25	50,68	15,58	23,51%
30	47,58	18,68	28,19%

<i>Campione Nr5</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=7	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,34		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
3	59,94	7,40	10,99%
5	53,54	13,80	20,49%
7	51,12	16,22	24,09%
9	45,92	21,42	31,81%

<i>Campione Nr6</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=19	
<i>Peso iniziale (g)</i>	64,00		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
4	60,60	3,40	5,31%
8	57,38	6,62	10,34%
14	53,22	10,78	16,84%
20	47,20	16,80	26,25%
24	43,64	20,36	31,81%

<i>Campione Nr7</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=13	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,74		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	61,10	5,64	8,45%
10	56,60	10,14	15,19%
14	47,56	19,18	28,74%
15	45,94	20,80	31,17%

<i>Campione Nr8</i>	1 frammenti	R.I.H.N.=18	
<i>Peso iniziale (g)</i>	66,84		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	65,90	0,94	1,41%
10	63,92	2,92	4,37%
20	46,28	20,56	30,76%
21	44,46	22,38	33,48%

<i>Campione Nr9</i>	1 frammento	R.I.H.N.=21	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,28		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
5	65,40	1,88	2,79%
10	61,58	5,70	8,47%
15	55,52	11,76	17,48%
20	50,42	16,86	25,06%
24	47,00	20,28	30,14%

<i>Campione Nr10</i>	3 frammenti	R.I.H.N.=8	
<i>Peso iniziale (g)</i>	67,00		
<i>Numero di colpi</i>	<i>Peso rifiuto (g)</i>	<i>Peso passato (g)</i>	<i>% passato</i>
3	62,10	4,90	7,31%
6	55,86	11,14	16,63%
9	48,16	18,84	28,12%
10	44,74	22,26	33,22%

A.2 Risultati R.I.H.N. a numero di colpi fisso

- BLOCCO B:

Campione Br11		15 colpi		
Peso iniziale (g)	67,72			
Dimensione setacci (mm)	rifiuto (g)	passato (g)	trattenuto cumulativo (%)	passato cumulativo (%)
16000	0	67,72	0,00%	100,00%
8000	7,66	60,06	11,31%	88,69%
4000	24,32	35,74	47,22%	52,78%
2000	9,36	26,38	61,05%	38,95%
1000	4,63	21,75	67,88%	32,12%
500	2,19	19,56	71,12%	28,88%
250	1,08	18,48	72,71%	27,29%
125	1,56	16,92	75,01%	24,99%
63	8,76	8,16	87,95%	12,05%
< 63	8,16		100,00%	0,00%

Campione Br12		15 colpi		
Peso iniziale (g)	67,46			
Dimensione setacci (mm)	rifiuto (g)	passato (g)	trattenuto cumulativo (%)	passato cumulativo (%)
16000	0	67,46	0,00%	100,00%
8000	4,58	62,88	6,79%	93,21%
4000	22,32	40,56	39,88%	60,12%
2000	10,88	29,68	56,00%	44,00%
1000	5,64	24,04	64,36%	35,64%
500	2,5	21,54	68,07%	31,93%
250	1,2	20,34	69,85%	30,15%
125	1,94	18,4	72,72%	27,28%
63	10,1	8,3	87,70%	12,30%
< 63	8,3		100,00%	0,00%

- BLOCCO F:

Campione Fr11		15 colpi		
Peso iniziale (g)	65,48			
Dimensione setacci (mm)	rifiuto (g)	passato (g)	trattenuto cumulativo (%)	passato cumulativo (%)
16000	0	65,48	0,00%	100,00%
8000	0	65,48	0,00%	100,00%
4000	12,46	53,02	19,03%	80,97%
2000	6,42	59,06	28,83%	71,17%
1000	4,18	61,3	35,22%	64,78%
500	2	63,48	38,27%	61,73%
250	1,58	63,9	40,68%	59,32%
125	4,76	60,72	47,95%	52,05%
63	23,64	41,84	84,06%	15,94%
< 63	10,44		100,00%	0,00%

Campione Fr12		15 colpi		
Peso iniziale (g)	62,5			
Dimensione setacci (mm)	rifiuto (g)	passato (g)	trattenuto cumulativo (%)	passato cumulativo (%)
16000	0	62,5	0,00%	100,00%
8000	0,68	61,82	1,09%	98,91%
4000	8,74	53,76	15,07%	84,93%
2000	6,58	55,92	25,60%	74,40%
1000	3,92	58,58	31,87%	68,13%
500	2,24	60,26	35,46%	64,54%
250	1,96	60,54	38,59%	61,41%
125	7,1	55,4	49,95%	50,05%
63	24,02	38,48	88,38%	11,62%
< 63	7,26		100,00%	0,00%

- BLOCCO G:

Campione Gr11		15 colpi		
Peso iniziale (g)	68,02			
Dimensione setacci (mm)	rifiuto (g)	passato (g)	trattenuto cumulativo (%)	passato cumulativo (%)
16000	47,66	20,36	70,07%	29,93%
8000	14,4	53,62	91,24%	8,76%
4000	1,86	66,16	93,97%	6,03%
2000	1,12	66,9	95,62%	4,38%
1000	0,76	67,26	96,74%	3,26%
500	0,48	67,54	97,44%	2,56%
250	0,28	67,74	97,85%	2,15%
125	0,22	67,8	98,18%	1,82%
63	0,36	67,66	98,71%	1,29%
< 63	0,88		100,00%	0,00%

Campione Gr12		15 colpi		
Peso iniziale (g)	68,88			
Dimensione setacci (mm)	rifiuto (g)	passato (g)	trattenuto cumulativo (%)	passato cumulativo (%)
16000	0	68,88	0,00%	100,00%
8000	52,38	16,5	76,05%	23,95%
4000	7,96	60,92	87,60%	12,40%
2000	2,86	66,02	91,75%	8,25%
1000	1,66	67,22	94,16%	5,84%
500	0,9	67,98	95,47%	4,53%
250	0,44	68,44	96,11%	3,89%
125	0,36	68,52	96,63%	3,37%
63	0,74	68,14	97,71%	2,29%
< 63	1,58		100,00%	0,00%

- BLOCCO M:

Campione Mr11		15 colpi		
Peso iniziale (g)	67,9			
Dimensione setacci (mm)	rifiuto (g)	passato (g)	trattenuto cumulativo (%)	passato cumulativo (%)
16000	15,26	52,64	22,47%	77,53%
8000	34,82	33,08	73,76%	26,24%
4000	6,8	61,1	83,77%	16,23%
2000	2,34	65,56	87,22%	12,78%
1000	1,52	66,38	89,46%	10,54%
500	0,78	67,12	90,60%	9,40%
250	0,4	67,5	91,19%	8,81%
125	0,52	67,38	91,96%	8,04%
63	2,72	65,18	95,96%	4,04%
< 63	2,74		100,00%	0,00%

Campione Mr12		15 colpi		
Peso iniziale (g)	67,37			
Dimensione setacci (mm)	rifiuto (g)	passato (g)	trattenuto cumulativo (%)	passato cumulativo (%)
16000	17,04	50,33	25,29%	74,71%
8000	28,24	39,13	67,21%	32,79%
4000	9,18	58,19	80,84%	19,16%
2000	3,29	64,08	85,72%	14,28%
1000	2	65,37	88,69%	11,31%
500	0,99	66,38	90,16%	9,84%
250	0,45	66,92	90,83%	9,17%
125	0,52	66,85	91,60%	8,40%
63	2,68	64,69	95,58%	4,42%
< 63	2,98		100,00%	0,00%

Campione Mr13		15 colpi		
Peso iniziale (g)	68,04			
Dimensione setacci (mm)	rifiuto (g)	passato (g)	trattenuto cumulativo (%)	passato cumulativo (%)
16000	0	68,04	0,00%	100,00%
8000	27,14	40,9	39,89%	60,11%
4000	19,22	48,82	68,14%	31,86%
2000	4,8	63,24	75,19%	24,81%
1000	3,12	64,92	79,78%	20,22%
500	1,4	66,64	81,83%	18,17%
250	0,74	67,3	82,92%	17,08%
125	1,22	66,82	84,71%	15,29%
63	5,9	62,14	93,39%	6,61%
< 63	4,5		100,00%	0,00%

Campione Mr14		15 colpi		
Peso iniziale (g)	68,06			
Dimensione setacci (mm)	rifiuto (g)	passato (g)	trattenuto cumulativo (%)	passato cumulativo (%)
16000	7,6	60,46	11,17%	88,83%
8000	19,6	48,46	39,96%	60,04%
4000	18,16	49,9	66,65%	33,35%
2000	6,14	61,92	75,67%	24,33%
1000	3,02	65,04	80,11%	19,89%
500	1,62	66,44	82,49%	17,51%
250	0,78	67,28	83,63%	16,37%
125	1	67,06	85,10%	14,90%
63	5,34	62,72	92,95%	7,05%
< 63	4,8		100,00%	0,00%