

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in

Ingegneria meccanica (Magistrale)



Caratterizzazione fisica e meccanica di acciai da metallurgia delle polveri mediante ultrasuoni

Tesi di Laurea di: Matteo Goffredo Matr. 740461

Relatore: Prof.ssa Barbara Rivolta

Relatore aziendale: Dir. Giovanni Pozzi

Anno Accademico 2011- 2012

Sommario

1. Introduzione.....	3
1. Abstract	4
2. Presentazione dell' azienda Metalsinter s.r.l.....	5
3 Breve introduzione alla metallurgia delle polveri.....	6
3.1 Tipologie di polveri	8
3.2 Il warm compacting.....	9
4. Gli ultrasuoni	10
4.1 Generazione delle onde ultrasonore	14
4.2 L' Attenuazione delle onde ultrasonore nei materiali compositi.....	15
4.3 L' Assorbimento	16
4.4 Collegamento ultrasonoro sonda-provino	16
4.5 La scelta della frequenza ultrasonora d'analisi.....	17
5 Le misurazioni mediante ultrasuoni: provini e macchinario utilizzato.....	19
5.1 Il settaggio del macchinario di prova: lo Zerodur®	21
6 Presentazione delle prove sperimentali	23
6.1 Prove sperimentali "a verde"	25
6.1.1 Analisi dei provini con materiale 06.65.27, "Distaloy DH1 + 0,1% C"	25
6.1.2 Analisi dei provini con materiale 06.65.31, "Distaloy DH1 + 0,7% C"	28
6.1.3 Analisi dei provini con materiale 65.15.601, "Distaloy AB + 0,2% C"	33
6.1.4 Analisi dei provini con materiale 06.65.43, "Distaloy AB + 0,6% C"	38
6.1.5 Analisi dei provini con materiale 06.65.47, "Distaloy AE + 0,2% C"	42
6.2 Prove sperimentali sul sinterizzato.....	48
6.2.1 Analisi dei provini con materiale 06.65.27, "Distaloy DH1 + 0,1% C", sinterizzati....	49
6.2.2 Analisi dei provini con materiale 06.65.31, "Distaloy DH1 + 0,7% C", sinterizzati....	51
6.2.3 Analisi dei provini con materiale 65.15.601, "Distaloy AB + 0,2% C", sinterizzati.....	54
6.2.4 Analisi dei provini con materiale 06.65.43, "Distaloy AB + 0,6% C", sinterizzati.....	56
6.2.5 Analisi dei provini con materiale 06.65.47, "Distaloy AE + 0,2% C", sinterizzati.....	59
7. Confronto tra le diverse polveri: tendenza grafica dei risultati.....	61
8. Conclusioni.....	69
9. Sviluppi futuri.....	70
10. Bibliografia.....	71

1. Introduzione

Tra i metodi di analisi non distruttivi per l'analisi dei materiali ferrosi (e non), uno dei più usati, per via della versatilità e della velocità di rilevazione, è sicuramente quello mediante l'uso degli ultrasuoni.

Tale metodo si basa sull'emissione di ultrasuoni da parte di un gruppo generatore, propagati attraverso un trasduttore, che funzionando anche da recettore ricapta il segnale di risposta (echo) dal materiale.

Mediante confronto dell'impulso di mandata ed il suo echo è possibile ricavare la velocità di propagazione delle onde nel materiale d'analisi; avvalendosi delle leggi dell'acustica in letteratura è possibile risalire alle caratteristiche fisiche e meccaniche del materiale attraversato.

Il lavoro si è svolto su due fronti principali: la ricerca della densità a verde, sfruttando le leggi dell'acustica che legano la velocità di propagazione delle onde sonore in un materiale proprio alla sua densità, e la caratterizzazione dei parametri meccanici del sinterizzato "finito". Mediante confronto diretto dei dati ottenuti agli ultrasuoni con gli analoghi presenti in letteratura (ed ottenuti con metodi classici) è possibile, una volta appurata la bontà del metodo, procedere all'eventuale formulazione di coefficienti e curve di interpolazione tra le due linee di dati. La realtà che ha ospitato il campo di prove (e non solo), potrà quindi introdurre nelle fasi di controllo un immediato ed affidabile test ad ultrasuoni sui particolari di produzione. Un'esperienza epistolare durante lo svolgimento delle prove ha inoltre fornito lo spunto, per un'indagine futura, dell'uso di tale metodo per la monitorizzazione del grado di sinterizzazione dei particolari pressati

Parole chiave: metallurgia delle polveri, ultrasuoni, densità del pressato, acciaio sinterizzato, modulo di Young, modulo di taglio, modulo di comprimibilità, coefficiente di Poisson.

1. Abstract

Among the non-destructive analytical methods for the analysis of materials, one of the most widely used, because of the versatility and speed of detection, is surely the use of ultrasounds.

This method is based on the emission of ultrasounds by a generator group, propagated through a transducer, which, also acting as a receptor, receive the response signal (echo) from the material.

By comparison between the delivered pulse and its echo it's possible to calc the speed of propagation of the waves into the material of analysis; making use of acoustics laws in the literature is possible to trace the physical and mechanical characteristics of the material passed through.

The work was carried out on two main fronts: the research of the green density, using the laws of acoustics that link the speed of propagation of sound waves in a material to its own density, and the characterization of mechanical property of sintered. By direct comparison between ultrasounds data and those in the literature is possible to point out some coefficients and trace fitting curve between the two lines of data. The factory that has hosted the field tests (and more), can so introduce in the control phase an immediate and reliable ultrasonic testing on the details of production. For a future investigation, the use of this method for monitoring the sintering degree is proposed.

Keywords: powder steel, ultrasounds, density of green compact, sintered steel, Young modulus, shear modulus, comprimibility modulus, Poisson's ratio.

2. Presentazione dell' azienda Metalsinter s.r.l.

Lo studio delle proprietà dei materiali sinterizzati mediante la tecnica degli ultrasuoni è stato proposto e sviluppato all'interno dall'azienda Metalsinter s.r.l. .

L'azienda Metalsinter nasce a Muggiò (MB) nel 1969 per la produzione di filtri e boccole sinterizzate; dato il continuo incremento di mercato nel 1991 trasferisce la sede a Sovico (MI) in uno stabilimento con una superficie coperta di 3.300 mq impiegando 54 dipendenti.

Nell'anno 2005 proseguendo l'espansione commerciale viene nuovamente trasferita la sede in uno stabilimento ancora più ampio; si tratta di una nuova unità produttiva di 10.000 mq situata a Seregno (MB), ove vengono impiegati impianti di produzione di ultima generazione tecnologica di cui alcuni presentano caratteristiche uniche sul mercato.

Tra gli impianti presenti, una serie di presse da 3 a 250 tonn., forni di sinterizzazione a nastro continuo, forni per vaporizzazione, macchine ed attrezzature per lavorazioni secondarie, ed un completo reparto per il controllo qualità dotato di moderni strumenti di misura.

Il settore ricerca e sviluppo dispone di stazioni CAD per la progettazione e per la simulazione operativa degli stampi e delle attrezzature.

In collaborazione con i propri fornitori, tecnici e ricercatori Metalsinter sono costantemente attivi nella ricerca di nuovi materiali e di tecnologie innovative.

Metalsinter fornisce un'ampia gamma di settori industriali:

- Automotive
- Macchine agricole e movimento terra
- Macchine tessili
- Macchine ed utensili per il verde
- Elettrotensili
- Elettrodomestici
- Applicazioni meccaniche varie



Per quanto riguarda la qualità, Metalsinter è certificata ISO 9001/UNI EN ISO 9001 mentre per il rispetto dell'ambiente è certificata ISO 14001/UNI EN ISO 14001.

3 Breve introduzione alla metallurgia delle polveri

La metallurgia delle polveri è un metodo di produzione che si può definire alternativo nel suo settore di prodotti se confrontata con i classici metodi produttivi quali lo stampaggio o l'asportazione di truciolo.

Questa tecnologia consiste nel produrre pezzi finiti secondo il seguente processo:

- produzione delle polveri
- aggiunta di lubrificanti e/o additivi
- formatura e pressatura "a verde"
- sinterizzazione
- eventuali operazioni secondarie quali: calibratura, vaporizzazione, trattamento termico, burattatura, ...

Il vantaggio di tale metodo non consiste solo nella elevata velocità produttiva di grandi lotti ma anche di ottenere un prodotto finito senza ulteriori costose lavorazioni alle macchine utensili con una quasi totale assenza di sfridi.

La produzione delle polveri avviene presso ditte specializzate e il 90% delle polveri sono attualmente prodotte mediante due tecnologie principali: il processo ferro-spugna "Hoganas" e il processo mediante atomizzazione con acqua.

Una volta prodotte le polveri possono essere usate tal quali oppure miscelate tra loro a seconda della composizione chimica richiesta.

L'aggiunta dei lubrificanti è fondamentale per permettere l'estrazione del pezzo dallo stampo dopo la pressatura.

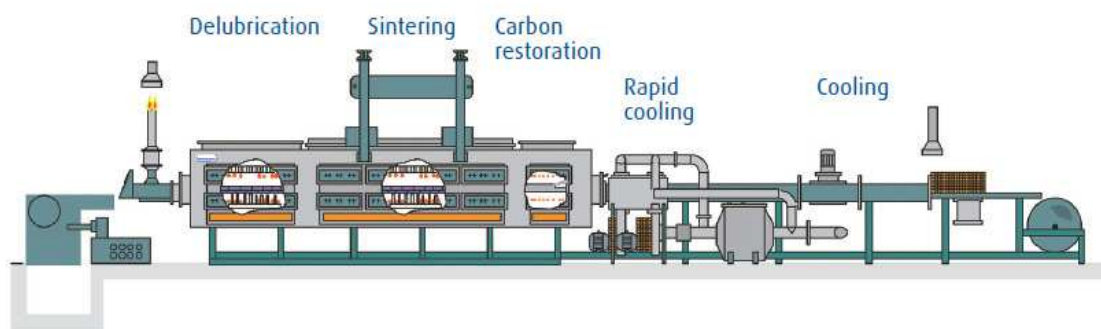
La formatura e pressatura al verde avvengono mediante presse di diverso tonnellaggio a seconda delle caratteristiche e delle dimensioni del pezzo da produrre. Al termine di questa procedura si ottiene un pezzo detto "a verde" la cui consistenza è tale da poter essere maneggiato, ma non sopporta alcun carico meccanico vero e proprio.

La pressatura può avvenire mediante presse multi-piastra, che hanno la possibilità di muoversi indipendentemente l'una dall'altra nella singola pressatura per meglio disporre le polveri all'interno dello stampo e quindi permettendo un più omogeneo compattamento, o viceversa concentrare più polvere in punti in cui è richiesta una maggiore densità.

La sinterizzazione, da cui prende il nome l'intero processo, è la fase in cui i pezzi al verde vengono fatti passare nei forni. Ad una temperatura di 1120°C/1150°C i granelli di polvere si legano gli uni agli altri mediante trasporti di massa, fenomeni diffusivi e sostituzioni interstiziali.

Per facilitare la sinterizzazione viene spesso aggiunto del rame, di solito "dannoso" negli acciai massivi, ma necessario nelle polveri in quantità prossime all'1%.

Di seguito lo schema di ciò che accade all'interno del forno di sinterizzazione, ricordando che in tutto il forno è presente un'atmosfera controllata a base CO (20%), N₂ (40%) ed H₂ (40%):



- 1- nella prima zona del forno, detta precamera, viene bruciato il lubrificante presente nelle polveri, precedentemente aggiunto per facilitare il perfetto riempimento dello stampo e l'estrazione del particolare dalla matrice.
- 2- nella seconda zona del forno avviene la sinterizzazione. In questo stadio la temperatura è di norma compresa tra i 1120°C ed i 1150°C, col limite superiore dettato dalla resistenza a tali temperature del nastro di trasporto a maglia metallica.

- 3- nella terza, ad una temperatura di circa 900°C, l'atmosfera portante viene arricchita di una percentuale di carbonio compresa tra lo 0,35% e lo 0,8% mediante l'aggiunta di combustibili di metano. Questa atmosfera controllata serve a mantenere od eventualmente arricchire la percentuale di carbonio nell'acciaio.
- 4- La quarta ed ultima zona è lo stadio di raffreddamento; in questa fase i pezzi vengono raffreddati mediante la circolazione più o meno forzata del gas tecnico all'interno del impianto; nel caso si voglia ottenere la sinterotempra del materiale la circolazione sarà forzata, in modo tale da asportare una maggior quantità di calore nel medesimo tempo..In caso contrario la circolazione sarà più blanda. Ovviamente per ottenere la sinterotempra il materiale deve avere composizione chimica idonea.

3.1 Tipologie di polveri

Le polveri si dividono innanzitutto a seconda del metodo produttivo della base (ferro) alla quale vengono miscelati/alligati elementi secondari: il processo più datato è quello da ferro spugna, ove ad una massa ferrosa viene miscelato del calcare e del carbone (elemento riducente) in opportuni rapporti, la spugna ferrosa ricavata viene frantumata, eventualmente ridotta e setacciata.

Il processo più recente prevede la produzione della polvere per atomizzazione: la massa di ferro in fusione viene spruzzata atomizzata investendola con getti in alta pressione di acqua o gas.. Seguono poi ulteriori fasi di affinazione di riduzione e setacciatura.

Indipendentemente dal metodo produttivo della polvere base, esistono diverse tecniche per ottenerne la formula finale:

1. Le polveri più semplici sono frutto della miscelazione di polveri di singoli materiali in diversa percentuale. Queste polveri, dette premix, sono relativamente semplici da ottenere e permettono di avere una discreta omogeneità del composto. La polvere a base ferro può essere prodotta sia per atomizzazione che da ferro spugna.
2. Le polveri prelegate sono invece delle polveri ottenute per atomizzazione partendo da una lega: la polvere risultante avrà una composizione chimica molto omogenea ma il costo della polvere è più alto delle premix: oltre al costo

degli elementi di lega, la produzione di questo tipo di polvere richiede infatti un'ulteriore fase di ricottura in quanto il materiale legato nella fase di atomizzazione è spesso soggetto a tempra. Le polveri prelegate, inoltre, per la loro caratteristica di essere più resistenti richiedono forze maggiori nella fase di pressatura.

3. Le polveri parzialmente prelegate sono infine polveri in cui ad una particella di ferro (prodotta ancora una volta da ferro spugna o per atomizzazione) vengono "attaccate" particelle di uno o più materiali diversi. Queste polveri sono spesso considerate le migliori per la produzione di particolari che richiedono alte caratteristiche meccaniche, in quanto la base ferro le rende "tenere" in pressatura, permettendo quindi il raggiungimento di densità molto elevate, mentre gli elementi di lega legati in superficie diffondendosi in forno ne innalzano le proprietà finali.

Nella fase di miscelazione è eventualmente possibile ottenere diverse varietà di polveri combinando le tre tipologie presentate.

Per il lavoro di ricerca che si andrà ad illustrare sono state scelte le polveri più performanti in uso oggi, ovvero le pre-legate e le "diffusion bonded", pressate con la tecnica del warm compacting, per ottenere densità più elevate.

Più avanti si illustreranno una ad una le polveri usate, con le relative schede d'analisi.

3.2 Il warm compacting

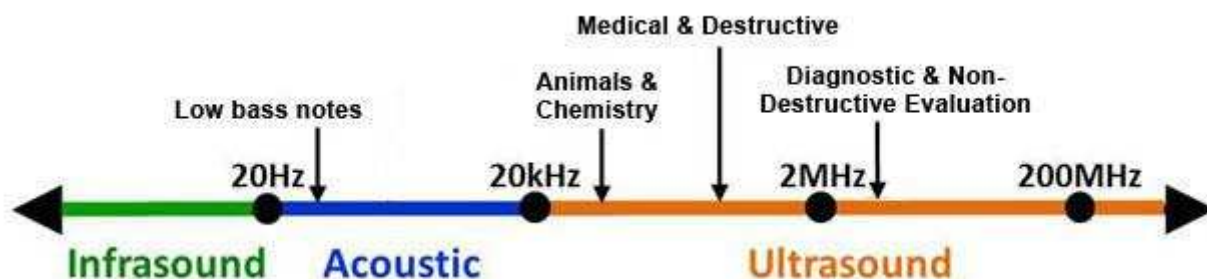
Il "warm compacting" è una tecnica di pressatura di sviluppo relativamente recente, che consiste nel pressare le polveri mediante stampi riscaldati.

Per una resa ottimale di tale tecnica è necessario riscaldare non solo le parti stampanti, ma anche la polvere in entrata.

L'innalzamento della temperatura favorisce la comprimibilità, a causa dell'abbassamento delle caratteristiche elastiche del materiale, ovvero a parità di carico applicato si riescono ad ottenere densità più elevate. Da studi ed esperimenti sul campo sono state create opportune classi di lubrificanti il cui rendimento è ottimale nell'intono dei 120 °C. Questa temperatura è stata fissata per la produzione di tutti i provini soggetti allo studio mediante ultrasuoni.

4. Gli ultrasuoni

Gli ultrasuoni sono vibrazioni di frequenza superiore al limite dell'udibile umano, ovvero 20KHz; la banda è piuttosto ampia ed è compresa tra i 20KHz e 200MHz.



L'uso delle onde ultrasonore a seconda del range di frequenze trova diverse applicazioni, dal campo medio al campo chimico, fino a quello meccanico; in particolare le frequenze comprese tra gli 0.5 MHz ed i 15 MHz sono utilizzate per i controlli non distruttivi sui materiali (NDE).

Le onde ultrasonore sono originate da moti oscillatori delle molecole del mezzo in cui si propagano, generando fronti d'onda di particelle in fase.

In particolare esistono principalmente due tipi di onde: quelle longitudinali che si propagano per compressione/espansione delle particelle del materiale:

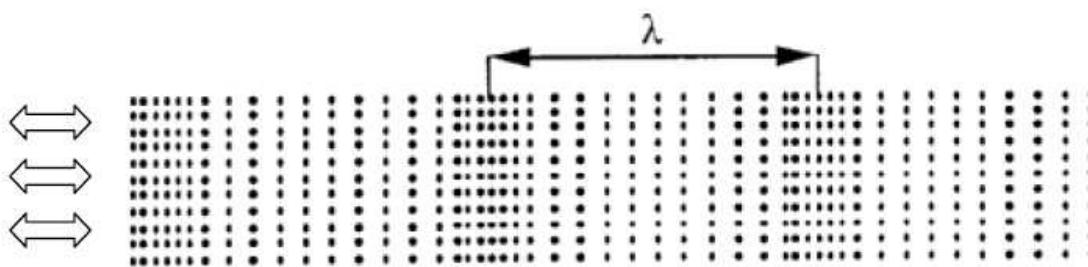


Fig. 3.1 – Compressione ed espansione delle particelle -

E quelle trasversali, che si propagano con oscillazioni delle particelle perpendicolari alla direzione di propagazione di tali onde, come illustrato di seguito:

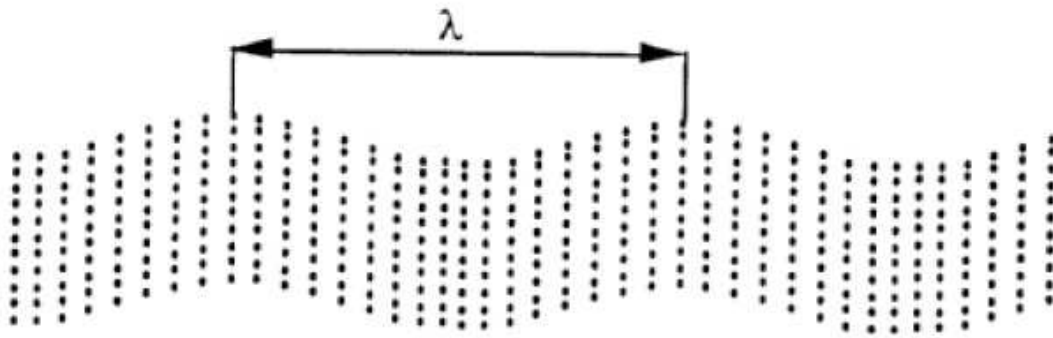


Fig. 3.3 – Spostamento delle particelle nella materia -

I parametri caratteristici delle onde ultrasonore sono:

- la frequenza $f = 1/T$ (T è il periodo dell'onda)
- la lunghezza d'onda $\lambda = V/f$
- la velocità di propagazione V
- l'impedenza acustica $Z = \rho V$
- l'intensità acustica $I = p^2 / 2Z$ [J/s/m²] (ove p è la pressione acustica [N/m²])

Tra questi parametri quello più importante per le analisi ad ultrasuoni in un materiale è sicuramente la velocità di propagazione delle onde nel materiale, che dipende fortemente dalle caratteristiche fisiche dello stesso; le onde siano esse longitudinali (VL) che trasversali (Vs), viaggiano con una velocità che semplicemente viene calcolata dallo strumento ad ultrasuoni come:

$$V = 2S / t$$

Ovvero lo strumento emette un'onda che viaggia nel materiale (percorso S), rimbalza sulla parete opposta, torna alla sonda (di nuovo percorso S) ove viene ricaptato dopo un tempo t dall'emissione; conoscendo quindi lo spessore S del particolare soggetto a misurazione, è presto calcolata la velocità di propagazione dell'onda ultrasonora nel materiale.

E' bene ricordare che ogni materiale (secondo la teoria dell'acustica) ha una propria e caratteristica velocità di propagazione delle onde sonore al suo interno, che dipendono dalle sue caratteristiche fisiche e meccaniche; in particolare ricordando che VL è la velocità di propagazione delle onde longitudinali nel materiale, e Vs la velocità di

propagazione delle onde trasversali esse sono legate alla densità ρ del materiale, al suo modulo di Young E , ed al coefficiente di Poisson ν secondo le seguenti formule:

$$V_L = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}} \quad [\text{m/s}]$$

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu)}} \quad [\text{m/s}]$$

Ove essendo V_L e V_S direttamente misurate dallo strumento ad ultrasuoni, si possono ricavare mediante formule inverse i parametri fisici del materiale analizzato, ovvero:

- il coefficiente di Poisson ν :

$$\nu = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{V_L}{V_S} \right)^2 - 1}{\left(\frac{V_L}{V_S} \right)^2 - 1}$$

O esplicitando secondo il rapporto V_L/V_S :

$$\frac{V_L}{V_S} = \sqrt{\frac{2(1 - \nu)}{1 - 2\nu}}$$

- il modulo di elasticità o (modulo di Young) E [N/m²]

$$E = \frac{3\rho V_S^2 (V_L^2 - \frac{4}{3} V_S^2)}{(V_L^2 - V_S^2)}$$

- il modulo di taglio G [N/m²]

$$G = \rho V_S^2$$

- il modulo di comprimibilità C.M. [N/m²]

$$C.M. = \rho V_L^2 \left(1 - \frac{4}{3} \frac{V_S^2}{V_L^2} \right)$$

Combinando queste formule se ne possono poi ricavare altre per calcolare ad esempio la densità ρ [Kg/m³] in funzione ad esempio di G e V_S :

$$\rho = \frac{G}{V_S^2}$$

In generale si può affermare che nelle misurazioni ad ultrasuoni in un materiale che non sia un liquido (nel quale le onde trasversali sono nulle perché non riescono a propagarsi), il parametro più rilevante che caratterizza nella sostanza il materiale è il rapporto V_L/V_S ; di seguito in tabella sono riportati i valori tipici per alcuni materiali metallici (pieni) delle velocità longitudinali e trasversali e del loro rapporto.

MATERIALE	V_L [m/s]	V_t [m/s]	V_L/V_t
acciaio	5850	3200	1,83
alluminio	6250	3100	2,02
Ghisa	3500-5600	2200-3200	1,59-2,03

Nichel	5500	2990	1,84
ottone	4450	2120	2,10
Rame	4600	2200	2,09
Zinco	4170	2480	1,68

Per i materiali sinterizzati invece non esiste un vero e proprio database di valori tipici, in quanto il grado di porosità, il tipo e la forma dei grani di polvere, e la forma finale dei pori, hanno un'influenza notevole sulla propagazione degli ultrasuoni all'interno di tali materiali.

4.1 Generazione delle onde ultrasonore

Le sonde ultrasonore sono trasduttori in grado di trasformare segnali elettrici in oscillazioni meccaniche e viceversa.

La gran parte dei trasduttori in uso nelle indagini ad ultrasuoni sono di tipo piezoelettrico, cui di seguito viene data una breve spiegazione del loro funzionamento, mentre altri tipi di trasduttori che sfruttano il fenomeno della ferroelettricità e della fotoacustica trovano scarso impiego dati i notevoli vantaggi che presentano quelli piezoelettrici (ridotte dimensioni, praticità d'uso, stabilità nelle misurazioni,..)

PIEZOELETTICITA':

E' un fenomeno caratteristico di alcuni cristalli, detti cristalli piezoelettrici , che sottoposti a forze di trazione o compressione in un'opportuna direzione rispetto agli assi cristallografici, producono delle cariche sulle facce caricate; tale fenomeno è reversibile, ovvero applicando una modesta carica sulle due facce del cristallo esso subisce una contrazione o trazione, quindi una carica variabile nel tempo in misura periodica fa vibrare il cristallo, dando origine alle onde ultrasonore (settando opportunamente la frequenza di queste cariche). L'energia è trasferita dal cristallo al materiale da esaminare, e viceversa il segnale di echo torna al cristallo che vibrando si comporta da recettore ri-trasformando l'energia meccanica della vibrazione (compressione-trazione) in elettrica.

La frequenza d'oscillazione è una caratteristica propria di ciascun cristallo ma è possibile ottenere una variazione della frequenza agendo sullo spessore del cristallo.

Dal punto di vista delle frequenze di utilizzo, i cristalli piezoelettrici al quarzo sono usati per generare frequenze superiori ai 10 Mhz, mentre per frequenze inferiori si usano materiali piezoceramici, come il Titanato di Bario.

4.2 L' Attenuazione delle onde ultrasonore nei materiali compositi

Il fenomeno dell'attenuazione delle onde ultrasonore è legato all'eterogeneità dei materiali, e quindi di fondamentale considerazione ed analisi nello studio in atto; è legato quindi generalmente alla presenza di difetti e/o discontinuità del materiale attraversato dalle onde ultrasonore quali:

- **Vuoti e porosità diffuse**
- Microcricche
- Delaminazioni
- Inclusione di corpi estranei

Tali difetti danno origine ad una attenuazione del fascio ultrasonoro, la quale è sfruttata nei controlli non distruttivi proprio per rilevare la presenza di tali difetti

L'attenuazione del fascio ultrasonoro può essere ricondotta a due fenomeni principali:

- Assorbimento
- Diffusione

In generale l'assorbimento è dovuto allo smorzamento del movimento molecolare ed alla successiva trasformazione dello stesso in calore. La diffusione è invece legata alle caratteristiche fisiche del materiale, in particolare alla più o meno marcata eterogeneità, ed agisce disperdendo il fascio ultrasonoro in più direzioni generando quindi attenuazioni del fascio lungo l'asse di propagazione.

Quando un mezzo presenta eterogeneità di dimensioni confrontabili alla lunghezza d'onda del fascio ultrasonoro, l'energia delle onde di propagazione viene dispersa in tutte le direzioni, riducendosi sempre di più lungo il cammino, prima di essere captata dalla sonda ricevente.

Nel caso degli acciai sinterizzati la dispersione è molto limitata, in quanto mentre la lunghezza d'onda varia da circa 0,6mm a 0,85mm, le porosità sono di due ordini di grandezza inferiori (pochi micron).

Per misurare l'attenuazione si utilizza una scala in decibel (dB), definita dalla seguente relazione:

$$dB = 20 \cdot \log\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$$

in cui I_1 e I_2 rappresentano le intensità del segnale rispettivamente prima e dopo l'attenuazione.

4.3 L'Assorbimento

L'assorbimento è legato principalmente alle caratteristiche termoelastiche e di isteresi del mezzo in cui avviene la propagazione delle onde ultrasonore. La viscosità e la conducibilità termica possono produrre effetti negativi sulla trasmissione dell'energia, poiché legate al movimento delle particelle nel materiale.

Quando un'onda ultrasonora si propaga in un mezzo, le particelle tendono a scorrere relativamente tra loro per permettere il passaggio dell'onda, ma il movimento viene ostacolato dalla viscosità, che "trasforma" parte dell'energia associata alle particelle in calore.

4.4 Collegamento ultrasonoro sonda-provino

Poiché gli ultrasuoni vengono fortemente attenuati dall'aria, l'accoppiamento tra sonda e provino da testare è ottenuto mediante un opportuno fluido, principalmente costituito da una soluzione acquosa o più raramente oli minerali con viscosità variabile a seconda dell'impiego richiesto. In presenza invece di superfici irregolari viene usato del grasso. Per controlli ad elevate temperature (si possono fare rilevazioni fino a 400°C) si utilizzano invece particolari fluidi al silicone.

Se il mezzo d'accoppiamento mantiene spessori inferiori ad un ventesimo della lunghezza d'onda degli ultrasuoni non si ha l'influenza di nessuna perturbazione sulla propagazione. Quando invece lo spessore diventa confrontabile con la lunghezza d'onda, il mezzo di accoppiamento condiziona in modo significativo la trasmissione delle onde dal cristallo al pezzo. In particolare, nel fluido, si generano numerose riflessioni con conseguente diminuzione dell'energia trasmessa e aumento considerevole della zona morta.

Nella scelta del fluido di accoppiamento da utilizzare è fondamentale tenere in considerazione che esso non presenti affinità chimiche con il pezzo da testare e la sonda stessa. La ripetibilità nel tempo delle prove è garantita se viene utilizzato un fluido che mantenga in più possibile inalterate la propria impedenza acustica Z e il proprio coefficiente di assorbimento nel tempo in presenza di eventuali lievi variazioni termiche.

Occorre inoltre verificare la capacità del fluido di aderire alla superficie del provino; per valutare tale parametro è necessario che la tensione superficiale del fluido sia inferiore o al limite uguale a quella dei legami fluido/provino. Un'elevata adesione del liquido al provino ed alla sonda fa sì che durante la prova ad ultrasuoni si riduca la formazione di bolle d'aria, estremamente dannose per il buon esito della prova stessa.

4.5 La scelta della frequenza ultrasonora d'analisi

Ciascuna sonda ad ultrasuoni possiede una propria caratteristica frequenza di lavoro, più o meno idonea per ciascuna prova e/o tipologia di materiale sulla quale verrà applicata; si elencano brevemente le frequenze delle sonde principali in commercio, ma sono ovviamente presenti sonde opportunamente calibrate su frequenze intermedie per specifiche applicazioni richieste dall'operatore preposto.

- *Frequenza 10 MHz:*

Viene utilizzata per controlli su provini con spessori compresi tra 1.5 e 5 mm. Inoltre può essere sfruttata per una classificazione dei materiali in base al grado di assorbimento e di diffusione dell'energia ultrasonora. Possono essere rilevati difetti di piccola entità.

- *Frequenza 6 MHz:*

Viene usata nei controlli ad immersione e nei controlli a livello industriale, con esigenze di elevata precisione, per misure di spessore su materiali ad elevata trasparenza ultrasonora.

- *Frequenza 4 MHz:*

E' utilizzata nei normali controlli industriali di saldature, organi trafilati, forgiati e fucinati, con superfici di accoppiamento lisce. E' adatta per ricerca di piccole discontinuità.

- *Frequenza 2 MHz:*

L'utilizzo è identico a quello della sonda da 4 MHz. Cambia il tipo di superficie di accoppiamento, che in questo caso prevede una normale finitura.

- *Frequenza 1 MHz:*

Viene utilizzata per controlli su acciai austenitici, fusioni di grosso spessore, materie plastiche e ceramiche.

- *Frequenza 0.5 MHz:*

E' sfruttata per controlli su materiali refrattari, ghisa e fusioni in acciaio austenitico.

Per quanto riguarda la scelta delle sonde per indagini nei materiali compositi, essa è influenzata dai seguenti fattori:

- Attenuazione degli ultrasuoni da parte del composito in funzione della frequenza e dello spessore. L'attenuazione, come indicato nei paragrafi dedicati a questo fenomeno, aumenta al crescere della frequenza. Pertanto essendo i valori entro cui si opera per i controlli non distruttivi sono compresi tra 1 e 10 Mhz in prima battuta sarebbe meglio adottare sonde a bassa frequenza.
- Un secondo vincolo nella scelta della frequenza più idonea alle misurazioni è però rappresentato dalla dimensione massima del difetto riscontrabile; in linea teorica sono rilevabili i difetti aventi spessore $d > \lambda/4$ (λ = lunghezza d'onda), mentre nella pratica la risoluzione è $d > \lambda/2$ o addirittura $d > \lambda$, per cui con una frequenza bassa prima ritenuta migliore (a cui corrisponde una lunghezza d'onda elevata), risultano "visibili" solamente i difetti più grandi. Si effettua quindi una scelta di compromesso andando a scegliere una frequenza tanto bassa quanto basta per la rilevazioni di difetti la cui dimensione sia ritenuta critica per l'oggetto da esaminare.

Per fare un esempio, con una frequenza di 6 MHz si possono rilevare difetti con spessore maggiore di 125 μm (quelli di spessore minore non vengono totalmente rilevati). Il diametro del fascio ultrasonoro influenza invece la selettività (rilevazione in pianta), quindi un fascio ultrasonoro di ridotte dimensioni permette l'isolamento delle singole discontinuità, fornendo anche possibili informazioni sulla parziale sovrapposizione dei difetti, con migliore definizione dei margini.

Per le prove necessarie alla stesura del lavoro di Tesi è stata usata una sonda a 5 Mhz. La verifica necessaria per dare via allo studio sul sinterizzato è esaminare se la frequenza scelta dia origine a lunghezze d'onda di lunghezza paragonabile al diametro dei pori del sinterizzato.

Si effettua pertanto il seguente calcolo:

$$L = V / f = 4000 \text{ [m/s]} / 5 \text{ [MHz]} = 0,8 \text{ [mm]} = 800 \text{ [um]}$$

Ove:

L = lunghezza d'onda del fascio ultrasonoro

V = velocità di propagazione (4000 è un valore tipico di un acciaio sinterizzato)

f = frequenza d'onda ultrasonora

Come da teoria precedente la propagazione dell'onda avviene solo in presenza di difetti di dimensioni minori di $1/4$ della lunghezza d'onda di propagazione. Nel caso dei sinterizzati vi è un ostacolo sempre presente, ovvero la presenza dei pori; si verifica quindi che il diametro dei pori medio sia inferiore ad $1/4$ della lunghezza d'onda:

$$\frac{1}{4} 800[\mu\text{m}] = 200[\mu\text{m}] > 25-35 [\mu\text{m}]$$

La relazione è verificata, si può affermare quindi che i pori del sinterizzato non rappresentano un ostacolo alla propagazione degli ultrasuoni con la sonda scelta.

5 Le misurazioni mediante ultrasuoni: provini e macchinario utilizzato

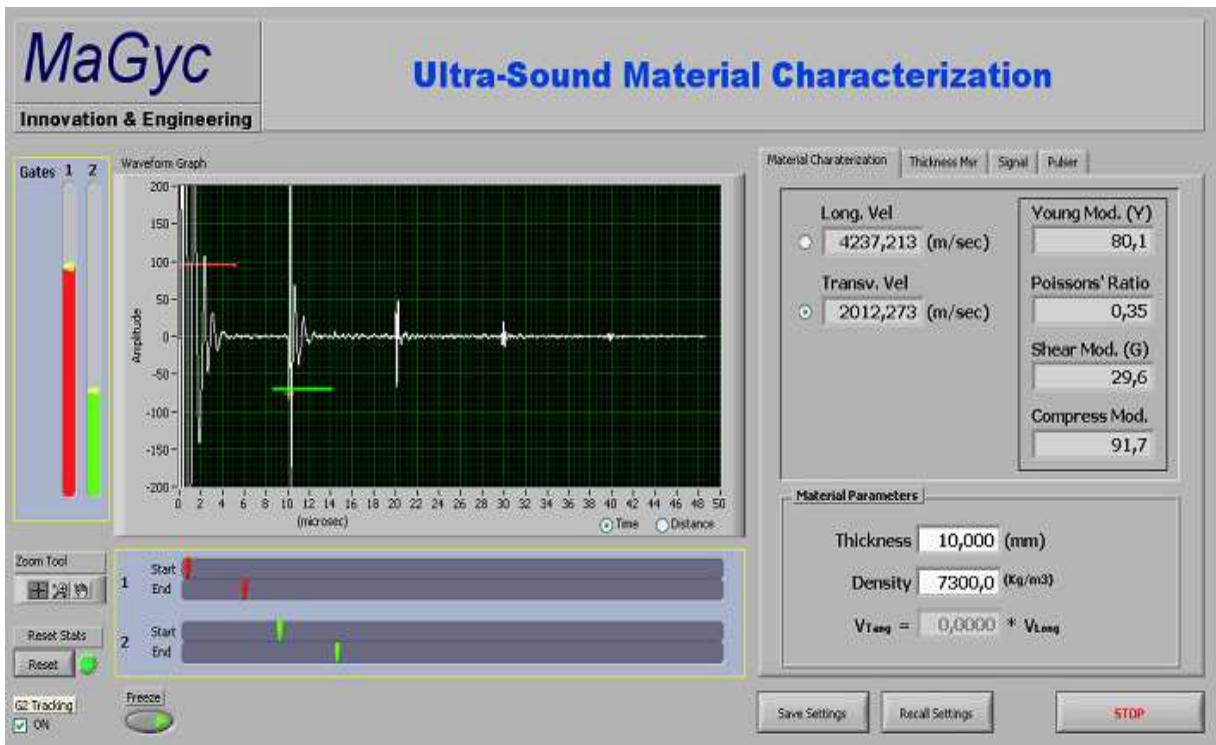
Nello studio in atto si è deciso di caratterizzare componenti ricavati tramite la metallurgia delle polveri mediante la tecnica degli ultrasuoni; tali componenti sono stati creati ad “hoc” per questo scopo, si tratta quindi di provini nello specifico di diametro 30mm ed altezza 10mm, di composizione chimica nota, e stampati mediante la tecnica “warm compacting” a 120°C circa utilizzando una pressa da 50 T.

Si è scelto tale stampo in quanto gli unici due parametri da rispettare nelle prove sono la discreta superficie di misurazione (la sonda in uso ha un diametro di 4mm, per cui si riesce a posizionare in modo ottimale sui 30mm di diametro del provino avendo quindi un certo margine dai bordi), ed un'altezza non troppo elevata, in quanto i pezzi a verde dissipano molta energia degli ultrasuoni, e dovendo l'onda ultrasonora attraversare tutto il pezzo fino alla faccia opposta e riattraversarlo di nuovo (echo), la perdita di energia in caso di grossi spessori sarebbe troppo elevata, col conseguente rischio di non riuscire a rilevare alcun segnale in ritorno.

Tramite la tecnica dello stampaggio a caldo, come descritto in precedenza, si riescono a raggiungere densità piuttosto elevate, impensabili da raggiungere con tecniche classiche; per i provini in oggetto si sono ottenute densità massime di 7.3 Kg/dm³ (per alcune polveri il tetto limite a cui si è “fermata” la pressa è stato di 7,25 Kg/dm³), e da lì si è scesi di 0,2 Kg/dm² per 2 step, costituendo quindi per ciascun tipo di polvere una serie di provini a 7,3 , 7,1 , e 6,9 Kg/dm³.

Il macchinario ad ultrasuoni utilizzato è prodotto dall'azienda “Magyc (Luino -VA-), dinamica realtà specializzata nella produzione di macchinari per controlli non distruttivi e relative consulenze/test conto terzi.

In dettaglio il macchinario usato ha codice prodotto USPS-100, con software dedicato dalla semplice ed intuitiva interfaccia grafica, come mostra l'immagine sottostante, in opera durante una delle numerose fasi di misura per la stesura del presente lavoro di Tesi.



Essendo la misura ad ultrasuoni una misura relativa tra il confronto del segnale di mandata ed il suo eco, questi vanno identificati nel grafico a schermo; la banda rossa viene quindi posizionata sul segnale di “zero macchina”, mentre la verde sul segnale di prima risposta (i successivi picchi rappresentano il segnale che rimbalza tra le due superfici superiore ed inferiore del provino che via via si attenua dato che nel percorso nel materiale questo disperde sempre più la sua energia).

Medesima misura può altresì essere effettuata posizionando i due cursori rosso e verde su due picchi successivi, effettuando la misura del segnale che “rimbalza” all’interno del materiale una seconda volta, epurando così la misura da eventuali disturbi del “segnale di macchina”.

Il software identifica quindi il valore preciso dei picchi, e da questi ricava la velocità propria di propagazione delle onde nel materiale (semplicemente come $V = 2 \times S / T$), sia per le onde longitudinali, che le onde trasversali; combinando questi due valori con altezza e densità del particolare (misurata preventivamente) mediante formule di letteratura elencate nei paragrafi precedenti, il software fornisce in tempo reale i valori cardine delle caratteristiche meccaniche del materiale analizzato.

5.1 Il settaggio del macchinario di prova: lo Zerodur®

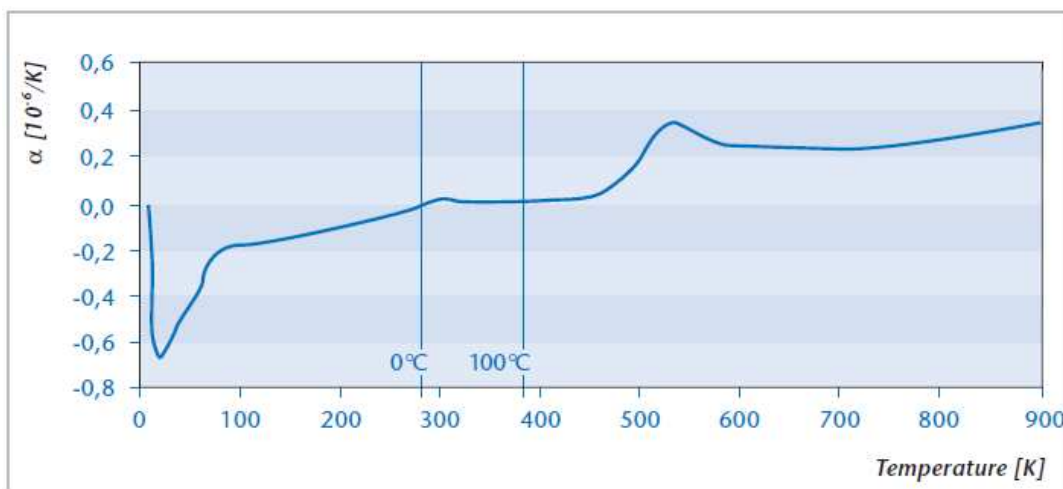
Si è parlato della generazione degli ultrasuoni, la loro ricezione e di formule che legano le caratteristiche fisiche e meccaniche di un materiale con le velocità di propagazione degli ultrasuoni all'interno di esso, ma come è possibile avere la certezza della bontà di tali misurazioni con un qualsiasi macchinario in uso? Ovvero, come si può provare se il macchinario di misura sia ben settato?

Una prima idea può essere quella di provare il macchinario su un componente a densità, modulo elastico e coefficiente di Poisson già conosciuti, e verificare che esso dia in risposta valori prossimi a quelli a libro, ma un'analisi più attenta porta a considerare altre variabili che potrebbero influenzare la misura, prima tra tutte la temperatura del materiale di prova.

La dilatazione termica infatti potrebbe influenzare la misura mediante ultrasuoni, in quanto varierebbe sia l'altezza del provino, con conseguente allungamento del percorso che le onde ultrasonore si troveranno a percorrere, che la densità del materiale, in quanto aumentando di volume per una dilatazione termica (ed ovviamente rimanendo costante il peso), la densità andrebbe a diminuire.

Ciò ha comportato l'attenzione di una pressoché costante temperatura nella sala di prove, e per controllare il perfetto settaggio del macchinario in uso, e quindi eliminare eventuali errori sistematici di misura dovuti ad un eventuale non ottimale settaggio di esso, si è ricorsi all'utilizzo dello Zerodur®.

Lo Zerodur® è infatti un materiale vetroceramico che ha la caratteristica principale di avere un coefficiente di dilatazione termica prossimo allo zero, è difatti di soli $0 \pm 0.10 \cdot 10^{-6}/K$.

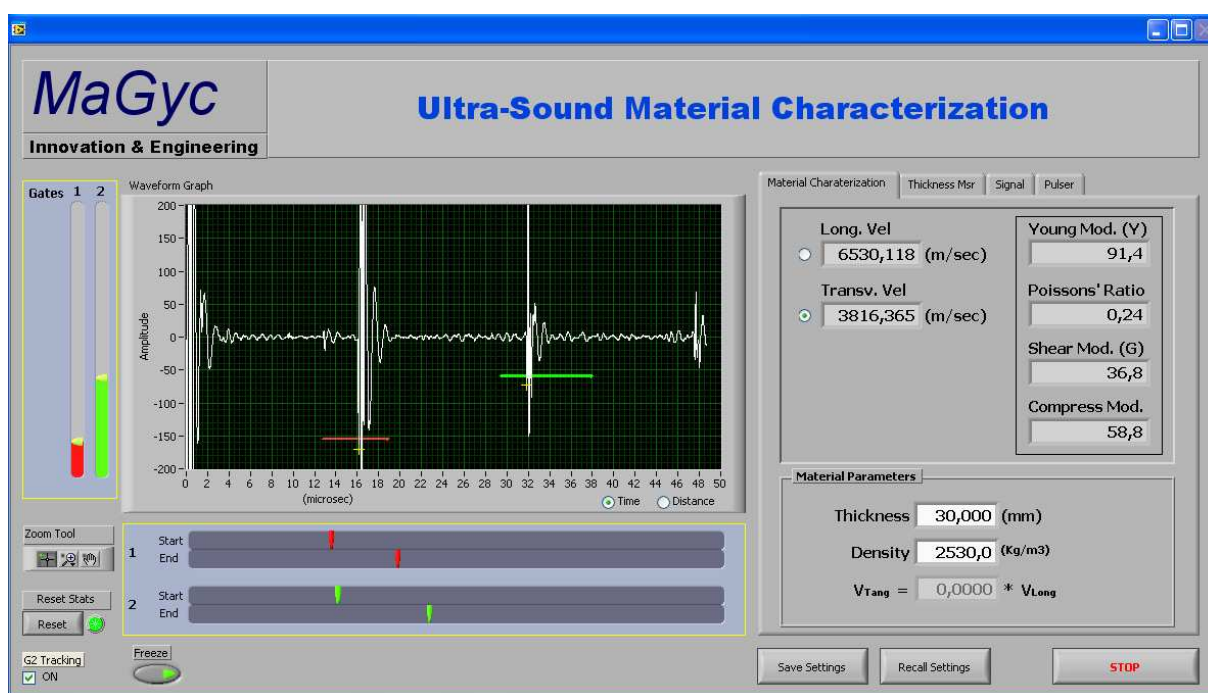


Lo Zerodur® mantiene quindi le sue dimensioni e la sua densità costanti al variare della temperatura, e rappresenta quindi un'affidabile prova della bontà di settaggio del macchinario in uso.

Di seguito si illustrano quindi le caratteristiche dichiarate dal produttore (Schott Lithotec):

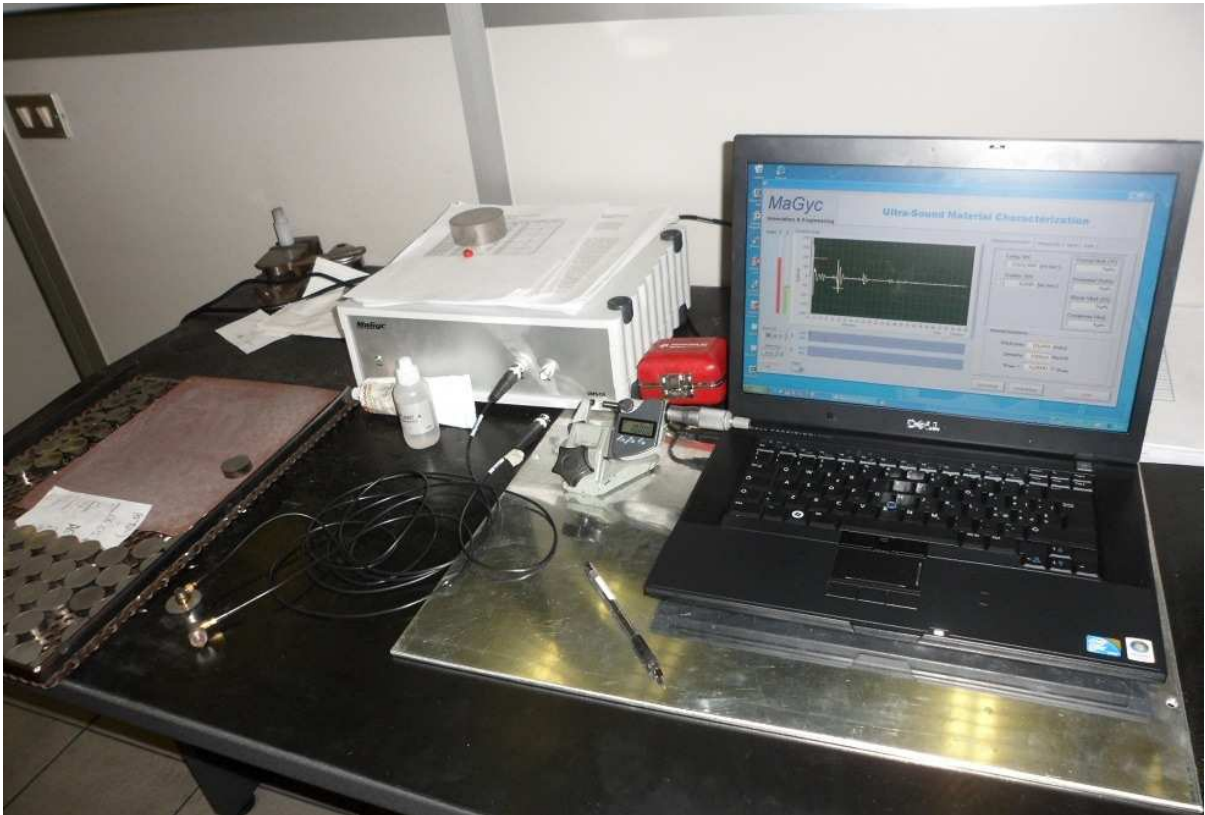
Criterion	
Young's modulus (at 20 °C, GPa) – mean value	90,3
Poisson's ratio μ	0,243
Knoop hardness HK 0,1/20 acc. to ISO 9385	620
Density ρ (g/cm ³)	2,53

E la “corrispondente” misura effettuata col macchinario MaGyc in uso:



Come si può notare i valori sono molto vicini per cui lo strumento di misura si può affermare sia ben tarato.

6 Presentazione delle prove sperimentali



Data la pressoché possibile infinita combinazione di polveri, densità di pressatura, e tecniche di pressatura, da cui ne derivano sostanziali differenze nel prodotto finale per quanto riguarda le caratteristiche fisiche e meccaniche (resistenza, composizione chimica, porosità,..) è praticamente impossibile ricavare formule matematiche universalmente valide per determinare le caratteristiche finali dei prodotti ottenuti mediante le diverse polveri e miscele. Esistono in compenso in letteratura dati piuttosto completi per ogni singola tipologia di polvere, sovente provenienti dai produttori stessi, che facilitano la scelta dei loro clienti nell'ordinare la polvere con le caratteristiche migliori per il particolare scopo produttivo. Queste misurazioni sono state fino ad ora eseguite mediante tecniche classiche; in questo lavoro di Tesi l'obiettivo è stato invece effettuare tali misurazioni mediante la tecnica degli ultrasuoni (più veloce ed economica), per redigere un database utile per il know-how dell'Azienda ospitante il campo di prove, con l'ovvio confronto di tali misurazioni coi relativi in letteratura ed ottenuti mediante metodi classici. Il confronto è fondamentale per verificare l'attendibilità dei dati riscontrati, in particolare si vuole verificare se, come e quanto la porosità del sinterizzato ostacoli o renda invece possibile le misurazioni mediante ultrasuoni su acciai da metallurgia delle polveri.

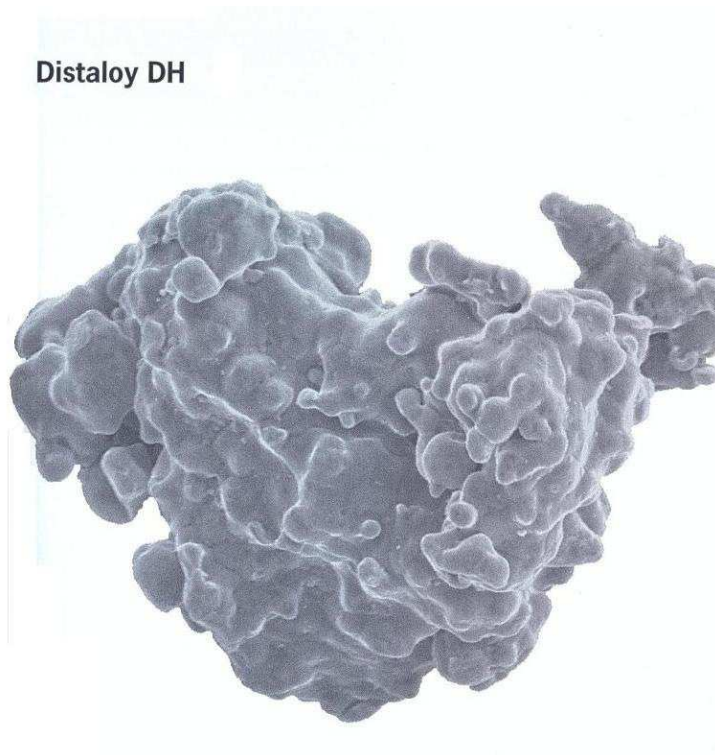
Il lavoro si è svolto su due fronti principali: la ricerca della densità a verde, sfruttando le leggi dell'acustica che legano la velocità di propagazione delle onde sonore in un materiale proprio alla sua densità, e la caratterizzazione dei parametri meccanici del sinterizzato "finito". La realtà che ha ospitato il campo di prove (e non solo), potrà quindi introdurre nelle fasi di controllo un immediato ed affidabile test ad ultrasuoni sui particolari di produzione.

Per densità più elevate (attorno ai 7,3 Kg/dm³) sono stati eseguiti inoltre dei test per verificare l'eventuale presenza di difetti causati da sovra-pressatura. Tali misurazioni sono state effettuate sia a verde che, una volta verificata la presenza di tali difetti, dopo sinterizzazione, per verificare l'entità del danno di tali difetti sul prodotto finale.

A corredo di tali prove sono state effettuate alcune prove metallografiche con l'obiettivo di indagare ulteriormente circa l'eventuale presenza residua di tali difetti dopo sinterizzazione.

6.1 Prove sperimentali “a verde”

6.1.1 Analisi dei provini con materiale 06.65.27, “Distaloy DH1 + 0,1% C”



Il primo materiale in esame, avente codice prodotto 06.65.27, è una polvere a base Distaloy DH1 con l’aggiunta di uno 0,1% di grafite (C) e uno 0,6% di lubrificante.

Si tratta quindi di una polvere ibrida: ad una base di lega ferro-molibdeno atomizzata (% Mo = 1,5) viene aggiunto per diffusione del rame in superficie.

Questa polvere si presta molto bene al processo di sinterotempra (regolando opportunamente il potenziale di carbonio dell’atmosfera controllata in forno ed il gradiente termico di raffreddamento post-sinterizzazione).

CERTIFICATO DI ANALISI

Lotto nr.	Data	Ordine nr.	Fattura nr.
770171	07-06-20	0734306	2716189
		070	

Tipo di polvere 06.65.27 Densmix 046022 Via Rivettimento 6431/2007	Quantità, Kg 500 Kgs	Cliente METALSINTER S.R.L. VIA MESSINA 9 I-20038 SEREGNO MI ITALIA
---	-------------------------	--

Production date: 07-06-11
 Quantity packed: 500 Kgs

Composition

Distaloy DH1	BAL †
Graphite UF4	0,10 †
DM120	0,60 †

CHEMICAL ANALYSIS	TEST RESULTS	SPECIFICATIONS		ISSUE: 01
		MIN	MAX	
Cu	2,03 †	1,80	2,20 †	
Mo	1,50 †	1,32	1,62 †	
C-Graphite	0,10 †	0,07	0,13 †	
Lubricant DM120	0,62 †	0,54	0,66 †	
Fe			BASE	

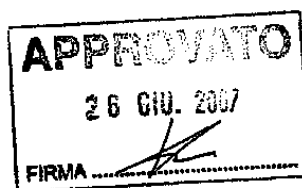
PHYSICAL PROPERTIES

AD (120 Degree C)	3,29 g/cm ³	
Flow H. (120 Degree C)	24 s/50 g	
GD 600 MPa (120 Degree C)	7,25 g/cm ³	
Calc.dens. at 0% porosity		7,56 g/cm ³

Approved by
 Per Ljunggren

QUALITY CONTROL MANAGER

Inspection certificate
 EN 10 204,3.1



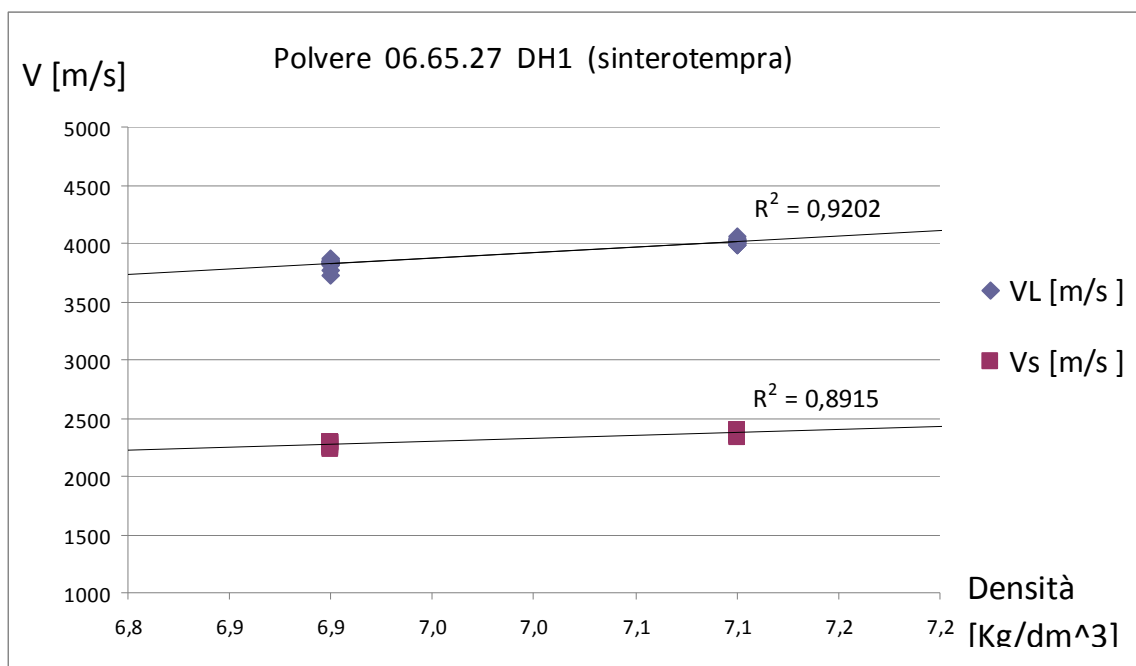
I risultati ottenuti mediante le rilevazioni ad ultrasuoni sui provini composti dalla polvere 06.65.27 DH1 sono riassunti nella seguente tabella:

N° pr.	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y [Gpa]	Pois.	G [Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,1	4042	2393	1,689	100,1	0,23	40,7	61,8
2	7,1	025	2340	1,720	96,8	0,24	38,9	63,2
3	7,1	3991	2397	1,665	99,4	0,22	40,8	58,7
4	7,1	4008	2351	1,705	97,1	0,24	39,2	61,7
5	7,1	4032	2396	1,683	100,0	0,23	40,8	61,1
6	7,1	4015	2373	1,692	98,5	0,23	40,0	61,1
7	7,1	4009	2372	1,690	98,4	0,23	40,0	60,8
8	7,1	3987	2371	1,682	97,9	0,23	39,9	59,7
9	7,1	4057	2388	1,699	100,0	0,23	40,5	62,9
10	7,1	4004	2373	1,687	98,3	0,23	40,0	60,5
11	7,1	4006	2355	1,701	97,3	0,24	39,4	61,5
12	7,1	4022	2376	1,693	98,7	0,23	40,1	61,4
13	7,1	3983	2368	1,682	97,7	0,23	39,8	59,6
14	7,1	4021	2391	1,682	99,6	0,23	40,6	60,7
15	7,1	3998	2387	1,675	99,0	0,22	40,5	59,6
	Media	4013	2375	1,690	98,6	0,23	40,1	61,0
	DevStd	21	17	0,013	1,1	0,01	0,6	1,2

N° pr.	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y [Gpa]	Pois.	G [Gpa]	C.M.[Gpa]
1	6,9	3859	2267	1,70	87,7	0,24	35,5	55,4
2	6,9	3846	2289	1,68	88,6	0,23	36,2	53,9
3	6,9	3841	2283	1,68	88,2	0,23	36,0	53,9
4	6,9	3841	2284	1,68	88,3	0,23	36,0	53,8
5	6,9	3812	2290	1,66	88,1	0,22	36,2	52,1
6	6,9	3834	2288	1,68	88,4	0,22	36,1	53,3
7	6,9	3821	2249	1,70	86,2	0,23	34,9	54,2
8	6,9	3822	2278	1,68	87,7	0,22	35,8	53,1
9	6,9	3864	2294	1,68	89,2	0,23	36,3	54,6
10	6,9	3820	2236	1,71	85,5	0,24	34,5	54,7
11	6,9	3832	2278	1,68	87,8	0,23	35,8	53,6
12	6,9	3768	2259	1,67	85,9	0,22	35,2	51,0
13	6,9	3730	2245	1,66	84,6	0,22	34,8	49,6
14	6,9	3845	2296	1,67	89,0	0,22	36,4	53,5
15	6,9	3804	2267	1,68	86,8	0,22	35,5	52,6
	MEDIA	3823	2274	1,681	87,5	0,23	35,7	53,3
	devstd	35	19	0,013	1,4	0,01	0,6	1,5

Le prove coi provini a densità 7.3 Kg/dm³ hanno avuto esito nullo, ovvero il segnale captato dal trasduttore è risultato quasi impercettibile, per cui la misura è risultata del tutto priva di senso e non addirittura impossibile da realizzare, dato che appunto è risultato impossibile andare ad individuare il picco di rilevazione.

Tale fenomeno può essere inizialmente spiegato a causa di micro-cricche e/o stratificazioni nel materiale che rappresentando una discontinuità nella propagazione degli ultrasuoni all'interno del materiale, ne attenuano parecchio la propagazione all'interno di esso.



6.1.2 Analisi dei provini con materiale 06.65.31, “Distaloy DH1 + 0,7% C”

Il secondo materiale in esame, avente codice prodotto 06.65.31, è sempre una polvere a base Distaloy DH1 (quindi di una polvere ibrida a base ferro-molibdeno atomizzata -% Mo = 1,5- alla quale viene aggiunto per diffusione del rame in superficie).

In questo caso la percentuale di grafite aggiunta è dello 0,7% (al posto di 0,1% in precedenza).

Questa polvere si presta ancor meglio della precedente al processo di sinterotempra (regolando opportunamente il potenziale di carbonio dell' atmosfera controllata in forno

ed il gradiente termico di raffreddamento post-sinterizzazione) fino a raggiungere una resistenza meccanica a trazione di 700 Mpa.

CERTIFICATO DI ANALISI

N. lotto 1353744 Data stampa 2011-12-02
 Num. ordine 0010103177 Consegna 1272256 Spedizione 3090838

Nome part
06.65.31 Densmix
 C. parte
 046565

Cliente
METALSINTER S.R.L.
VIA MESSINA 9
I-20038 SEREGNO MI
ITALIA

01057

METALSINTER S.R.L.

Quantità		Vostro riferimento	Data produzione	Qtà prodotta
500	Kg	8089/2011	2011-11-28	507 Kg

Composition

Distaloy DH1	BAL	%
Graphite UF4	0.70	%
DM120	0.60	%

Result. test	Unità	Specificazione		ISSUE 1
		MIN	MAX	

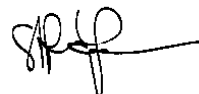
CHEMICAL PROPERTIES

Cu	1.92 %	1.80	2.20 %
Mo	1.45 %	1.32	1.62 %
C-Graphite	0.66 %	0.63	0.77 %
Lubricant	0.65 %	0.54	0.66 %
Fe is Base			

PHYSICAL PROPERTIES

AD (120 degree C)	3.53 g/cm3		
Flow Hall (120 Degree C)	22 sec/50g		
GD 600 MPa (120 degree C)	7.18 g/cm3		
Calc.dens at 0% porosity			7.45 g/cm3

Approvato da



Quality Control Manager

Inspection certificate
 EN 10 204, 3.1

I risultati ottenuti mediante le rilevazioni ad ultrasuoni sui provini composti dalla polvere 06.65.31 DH1 sono riassunti nella seguente tabella:

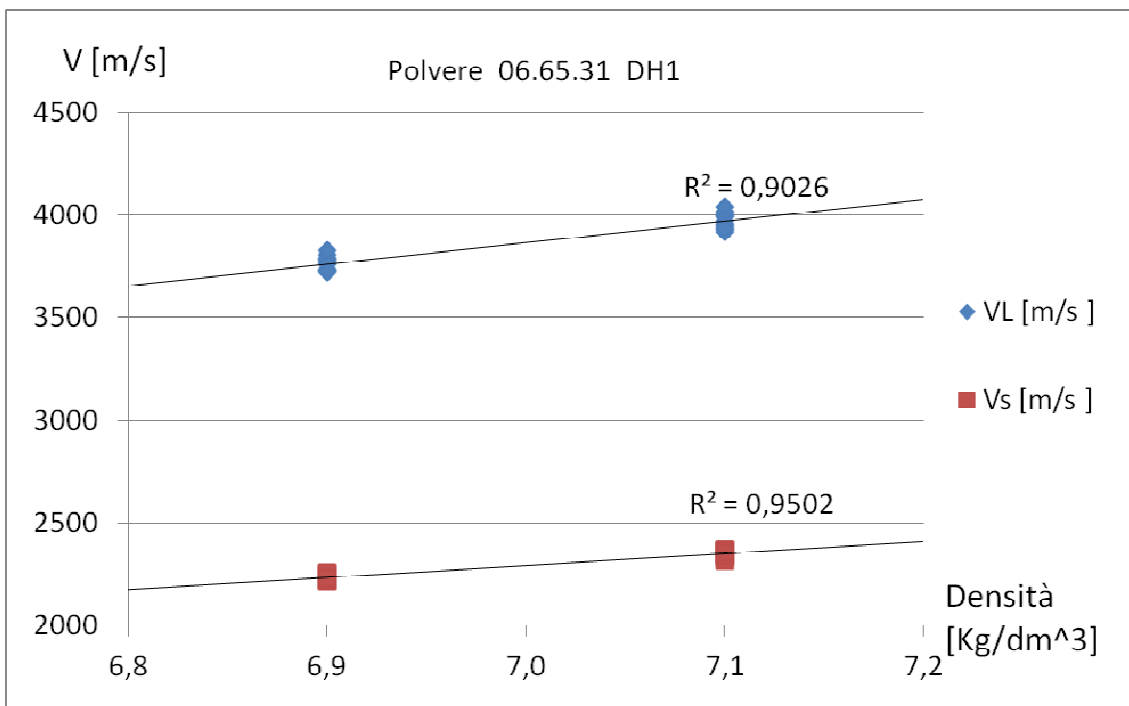
N° pr.	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y [Gpa]	Pois.	G [Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,1	4015	2358	1,70	97,5	0,24	39,5	61,3
2	7,1	3929	2342	1,68	95,6	0,23	39,0	57,2
3	7,1	3946	2370	1,66	97,1	0,22	39,9	56,8
4	7,1	3972	2356	1,69	95,9	0,23	39,0	59,6
5	7,1	3993	2367	1,69	97,7	0,23	39,8	59,7
6	7,1	3956	2331	1,70	94,9	0,24	38,5	59,1
7	7,1	3935	2349	1,68	95,1	0,22	39,2	56,1
8	7,1	3951	2345	1,68	95,9	0,23	39,0	58,8
9	7,1	3919	2319	1,69	94,0	0,23	38,2	58,2
10	7,1	3997	2368	1,69	97,9	0,23	39,8	60,3
11	7,1	4005	2349	1,70	97,0	0,24	39,2	61,6
12	7,1	3990	2370	1,68	97,9	0,23	39,9	59,9
13	7,1	4013	2355	1,70	97,4	0,24	39,4	61,8
14	7,1	3933	2340	1,68	95,3	0,23	38,9	58,0
15	7,1	4042	2356	1,72	97,9	0,24	39,4	63,5
	MEDIA	3973	2352	1,69	96,5	0,23	39,2	59,5
	Devstd	38	15	0,01	1,3	0,01	0,5	2,0

N° pr.	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y [Gpa]	Pois.	G [Gpa]	C.M.[Gpa]
1	6,9	3775	2251	1,68	85,6	0,22	35,0	51,8
2	6,9	3733	2215	1,69	83,0	0,23	33,8	51,1
3	6,9	3759	2235	1,68	84,5	0,23	34,5	51,6
4	6,9	3808	2255	1,69	86,3	0,23	35,1	53,2
5	6,9	3782	2223	1,70	84,2	0,24	34,1	53,2
6	6,9	3729	2226	1,68	83,6	0,22	34,2	53,2
7	6,9	3784	2228	1,70	83,5	0,23	34,2	53,1
8	6,9	3730	2222	1,68	83,5	0,22	34,1	50,6
9	6,9	3786	2233	1,70	84,9	0,23	34,4	53,0
10	6,9	3789	2245	1,69	85,6	0,23	34,8	52,8
11	6,9	3731	2224	1,68	83,6	0,22	34,1	50,6
12	6,9	3766	2234	1,69	84,6	0,23	34,4	51,9
13	6,9	3720	2224	1,67	83,4	0,22	34,1	50,0
14	6,9	3829	2259	1,69	86,8	0,23	35,2	54,2
15	6,9	3728	2235	1,67	84,1	0,22	34,5	49,9
	MEDIA	3763	2234	1,68	84,5	0,23	34,4	52,0
	Devstd	34	13	0,01	1,1	0,01	0,4	1,3

Le prove coi provini a densità 7.3 Kg/dm³ hanno avuto esito nullo, ovvero il segnale captato dal trasduttore è risultato quasi impercettibile, per cui la misura è risultata del tutto priva di senso se non addirittura impossibile da realizzare, dato che appunto è risultato impossibile andare ad individuare il picco di rilevazione.

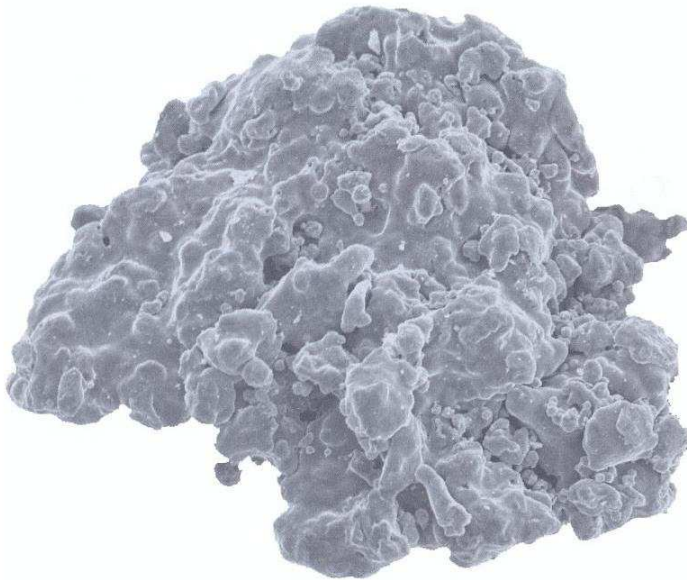
Tale fenomeno può essere inizialmente spiegato a causa di micro-cricche e/o stratificazioni nei provini, che rappresentando una discontinuità nella propagazione degli ultrasuoni all'interno del materiale, ne attenuano notevolmente la propagazione all'interno di esso.

Mettendo in un grafico le velocità longitudinali e trasversali ed interpolando linearmente i valori tra 6,9 e 7,1 Kg/dm³ si può tracciare una retta ove plausibilmente stazionano i valori di VL e Vs per le densità intermedie.



6.1.3 Analisi dei provini con materiale 65.15.601, “Distaloy AB + 0,2% C”

Distaloy AB



Il terzo materiale in esame, avente codice prodotto 65.15.601, è una polvere a base Distaloy AB con l'aggiunta di uno 0,2% di grafite (C) e uno 0,6% di lubrificante.

Si tratta quindi di una polvere di tipo “diffusion bonded” : come si può notare dal certificato d'analisi oltre alla canonica presenza del rame per facilitare il processo di sinterizzazione, è presente una discreta percentuale di nichel e molibdeno, che innalzano notevolmente le caratteristiche meccaniche di tale lega.

CERTIFICATO DI ANALISI

Nr.lotto 1307729 Data stampa 2011-09-16
 Num.ordine 0010088076 Consegna 1248316 Spedizione 3081734

Nome part
65.15.601 Densmix
 C. parte
 085479

Ciente
METALSINTER S.R.L.
VIA MESSINA 9
I-20038 SEREGNO MI
ITALIA

01057

METALSINTER

Quantità	Vostro riferimento	Data produzione	Qtà prodotta
5000 Kg	7984/2011	2011-09-07	5000 Kg

Comments

equal to 06.65.26 Densmix

Composition

Distaloy AB	BAL	%
Graphite UF4	0.20	%
DM120	0.60	%

	Risult. test	Unità	Specificazione		ISSUE 1
			MIN	MAX	
CHEMICAL PROPERTIES					
Ni	1.69	%	1.58	1.93	%
Cu	1.49	%	1.35	1.65	%
Mo	0.49	%	0.45	0.55	%
C-Graphite	0.19	%	0.16	0.24	%
Lubricant	0.60	%	0.54	0.66	%
Fe is Base					
PHYSICAL PROPERTIES					
AD (120 degree C)	3.25	g/cm3	3.20	3.40	g/cm3 Tentative
Flow Hall (120 Degree C)	26	sec/50g		30	sec/50g Tentative
GD 600 MPa (120 degree C)	7.26	g/cm3	7.10		Tentative
Calc.dens at 0% porosity		g/cm3		7.54	g/cm3

Approvato da



Quality Control Manager

Inspection certificate
 EN 10 204, 3.1

Indirizzo postale
 Höganäs Sweden AB
 S-283 83 HÖGANÄS
 Sweden
 Org. No. 556204-9691

Höganäs Sweden AB
 Registered office: Höganäs
 Reg. No 556204-9681

Telefono
 +46 42 338000
 Telefax
 +46 42 338100

VAT No
 SE556204989101

Banca
 Svenska Handelsbanken
 Höganäs/Sweden
 Telefax +46 42386449

Conto Nr.
 6790 76711048
 Bg 280-9746
 Dirección: SWIFT HANDSESS
 IBAN SE81 6000 0000 0000 7671 1048

Coordinate bancarie
 Svenska Handelsbanken
 Stockholm/Sweden
 Direzione: SWIFT HANDSESS
 IBAN SE81 6000 0000 0000 7671 1048

I risultati ottenuti mediante le rilevazioni ad ultrasuoni sui provini composti dalla polvere 65.06.601 AB+0,2C sono riassunti nella seguente tabella:

N° pr.	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y [Gpa]	Pois.	G [Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,30	3953	2309	1,71	96,6	0,24	38,9	62,2
2	7,30	3970	2331	1,70	98,1	0,24	39,7	62,2
3	7,30	3972	2309	1,72	96,9	0,24	38,9	63,3
4	7,30	4015	2332	1,72	98,9	0,25	39,7	64,8
5	7,30	3969	2320	1,71	97,5	0,24	39,3	62,6
6	7,30	3956	2307	1,71	96,5	0,24	38,8	62,5
7	7,30	4014	2319	1,73	98,1	0,25	39,3	65,3
8	7,30	3950	2311	1,71	96,7	0,24	39,0	61,9
9	7,30	4004	2307	1,74	97,2	0,25	38,8	65,3
10	7,30	3994	2321	1,72	97,9	0,24	39,3	64,0
11	7,30	3962	2309	1,72	96,8	0,24	38,9	62,7
12	7,30	4073	2351	1,73	100,9	0,25	40,3	67,3
13	7,30	4044	2350	1,72	100,4	0,25	40,3	65,6
14	7,30	3922	2305	1,70	95,9	0,24	38,8	60,6
15	7,30	3906	2281	1,71	94,3	0,24	38,0	60,7
	Media	3980	2317	1,72	97,5	0,24	39,2	63,4
	devstd	44	18	0,01	1,7	0,00	0,6	1,9

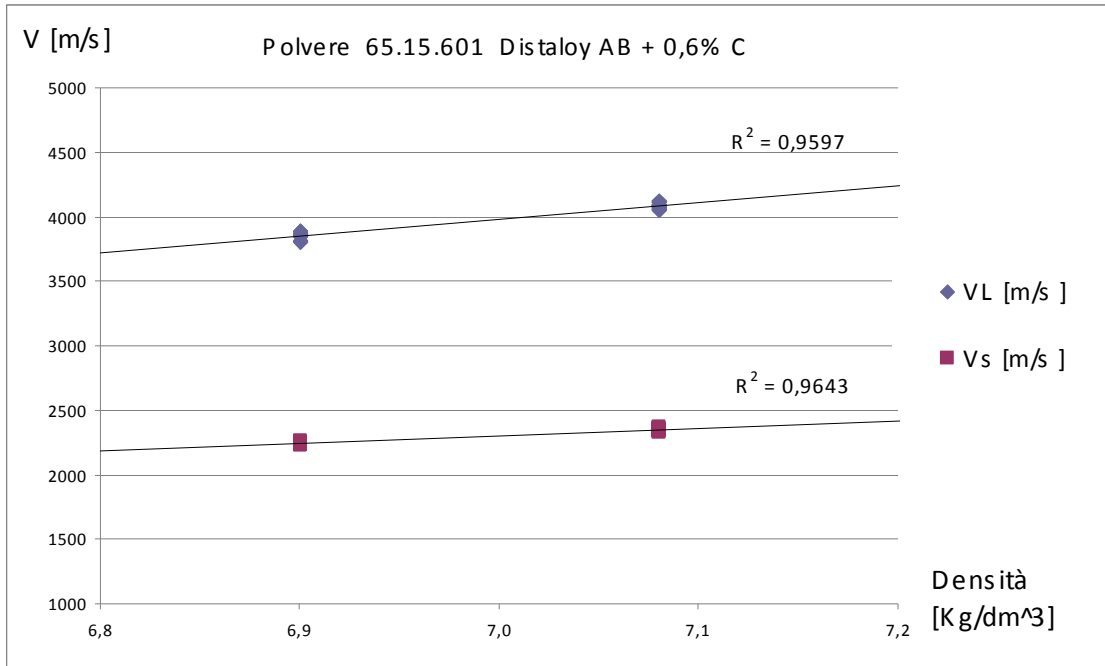
N° pr.	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y [Gpa]	Pois.	G [Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,08	4089	2336	1,75	97,0	0,26	38,5	66,8
2	7,08	4076	2346	1,74	97,4	0,25	38,9	65,8
3	7,08	4062	2334	1,74	96,7	0,25	38,6	65,4
4	7,08	4090	2341	1,75	97,5	0,26	38,8	66,7
5	7,08	4045	2339	1,73	96,7	0,25	38,7	64,2
6	7,08	4071	2329	1,75	96,5	0,26	38,4	66,1
7	7,08	4084	2344	1,74	97,6	0,25	38,9	66,2
8	7,08	4122	2349	1,75	98,4	0,26	39,1	68,2
9	7,08	4117	2360	1,74	99,0	0,26	39,4	67,4
10	7,08	4081	2350	1,74	97,9	0,25	39,1	65,8
11	7,08	4061	2364	1,72	98,4	0,24	39,6	64,0
12	7,08	4108	2360	1,74	98,9	0,25	39,4	66,9
13	7,08	4069	2350	1,73	97,7	0,25	39,1	65,1
14	7,08	4088	2351	1,74	98,1	0,25	39,1	66,2
15	7,08	4094	2356	1,74	98,5	0,25	39,3	66,3
	Media	4084	2347	1,74	97,8	0,25	39,0	66,1
	devstd	21	10	0,01	0,8	0,01	0,4	1,1

N° pr.	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y [Gpa]	Pois.	G [Gpa]	C.M.[Gpa]
1	6,9	3867	2246	1,72	89,0	0,25	35,7	58,2
2	6,9	3806	2229	1,71	87,2	0,24	35,2	55,7
3	6,9	3885	2244	1,73	89,1	0,25	35,7	59,3
4	6,9	3853	2248	1,71	88,9	0,24	35,8	57,4
5	6,9	3888	2256	1,72	89,8	0,25	36,0	59,0
6	6,9	3859	2257	1,71	89,4	0,24	36,1	57,4
7	6,9	3811	2226	1,71	87,1	0,24	35,1	56,0
8	6,9	3879	2248	1,73	89,2	0,25	35,8	58,8
9	6,9	3815	2231	1,71	87,4	0,24	35,2	56,1
10	6,9	3806	2238	1,70	87,6	0,24	35,5	55,3
11	6,9	3845	2246	1,71	88,6	0,24	35,7	57,0
12	6,9	3852	2244	1,72	88,7	0,24	35,7	57,5
13	6,9	3845	2242	1,71	88,4	0,24	35,6	57,2
14	6,9	3868	2234	1,73	88,3	0,25	35,3	58,8
15	6,9	3862	2262	1,71	89,8	0,24	36,2	57,3
	MEDIA	3849	2243	1,72	88,6	0,24	35,6	57,4
	devstd	28	10	0,01	0,9	0,00	0,3	1,3

In questo caso le prove coi provini a densità 7.3 Kg/dm³ hanno avuto esito positivo, almeno dal punto di vista della risposta agli ultrasuoni, ovvero il segnale captato dal trasduttore è risultato sufficientemente chiaro per essere captato, ma in prima battuta sorgono spontanee diverse perplessità sulla piena affidabilità di tali risultati, in quanto osservando i valori delle caratteristiche meccaniche si nota come siano troppo vicini, se non addirittura inferiori (vedi media modulo di Young tra 7,3 e 7,1 Kg/dm³) a quelli a densità minore, ovvero 7,1 Kg/dm³.

Tali risultati si pensa siano influenzati come nei casi precedenti dalla presenza di stratificazioni nel materiali a più alta densità, che rappresentando una discontinuità nella propagazione degli ultrasuoni all'interno del materiale, tramite ultrasuoni danno in risposta valori più simili a quelli corrispondenti a materiali meno densi.

Mettendo in un grafico le velocità longitudinali e trasversali ed interpolando linearmente i valori tra 6,9 e 7,1 Kg/dm³ si può tracciare una retta ove plausibilmente stazionano i valori di VL e Vs per le densità intermedie.



6.1.4 Analisi dei provini con materiale 06.65.43, “Distaloy AB + 0,6% C”

Il quarto materiale in esame, avente codice prodotto 06.65.43, è una polvere a base Distaloy AB con l'aggiunta di uno 0,6% di grafite (C) e uno 0,6% di lubrificante.

Si tratta quindi di una polvere di tipo “diffusion bonded” con base una polvere di ferro atomizzata (ASC100.29): come si può notare dal certificato d'analisi oltre alla canonica presenza del rame per facilitare il processo di sinterizzazione, è presente una discreta percentuale di nichel e molibdeno che innalzano notevolmente le caratteristiche meccaniche di tale lega.

CERTIFICATO DI ANALISI

Nr. lotto 1135628 Data stampa 2010-09-13
 Num. ordine 0010045707 Consegna 1118728 Spedizione 3033895

Nome part
06.65.43 Densmix

C parte
091322

METALSINTER S.R.L.

Cliente
 METALSINTER S.R.L.
 VIA MESSINA 9
 I-20038 SEREGNO MI
 ITALIA

C1057

Quantità 50 Kg Valore riferimento MAIL/FONT.DTD 26/8 Data produzione 2010-09-06 QM prodotta 57 Kg

Composition	Result. test	Unità	Specificazione	
Distaloy AB	BAL %			
Graphite UF4	0.60 %			
DM120	0.60 %			

ISSUE 1

MIN MAX

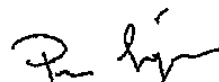
CHEMICAL PROPERTIES

Ni	1.71 %	1.58	1.93 %
Cu	1.52 %	1.35	1.65 %
Mo	0.50 %	0.45	0.55 %
C-Graphite	0.58 %	0.54	0.66 %
Lubricant	0.65 %	0.54	0.66 %
Fe is Base			

PHYSICAL PROPERTIES

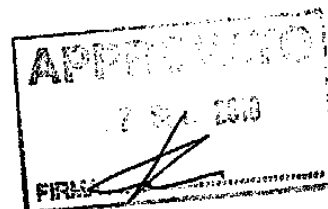
AD (120 degree C)	3.52 g/cm3
Flow Hall (120 Degree C)	27 sec/50g
GD 600 MPa (120 degree C)	7.24 g/cm3

Approvato da



Quality Control Manager

Inspection certificate
 EN 10 204, 3.1



Indirizzo postale
 Höganäs Sweden AB
 S-263 83 HÖGANÄS
 Sweden
 Org. No. 556204-6887

Höganäs Sweden AB
 Registered office: Höganäs
 Reg. No 556204-6887

Telefono
 +46 42 338000
 Telefax
 +46 42 338100

VAT No
 SE556204999 101

Banca
 Svenska Handelsbanken
 Höganäs Sweden
 Telefax +46 42385448

Conto R/c.
 679076711048
 Bg 466-9826
 Pg 5 25 76-6

Coordinate bancarie
 Svenska Handelsbanken
 Stockholm Sweden
 Direzione SWIFT HANDESBANK
 IBAN SE55 6000 0000 0000 7671 1048

I risultati ottenuti mediante le rilevazioni ad ultrasuoni sui provini composti dalla polvere 06.65.43, ovvero Distaloy AB + 0,6%C, sono riassunti nella seguente tabella:

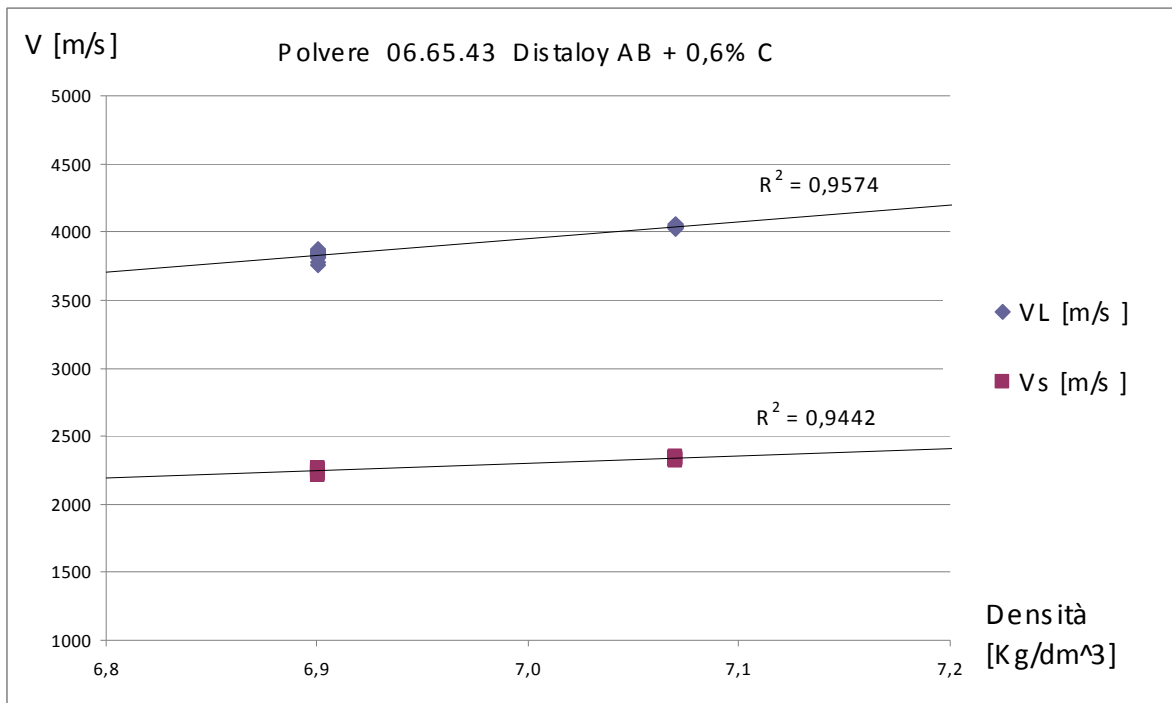
N° pr.	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y [Gpa]	Pois.	G [Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,07	4032	2329	1,73	95,9	0,25	38,4	63,8
2	7,07	4041	2330	1,73	96,0	0,25	38,4	64,3
3	7,07	4039	2329	1,73	95,9	0,25	38,4	64,2
4	7,07	4032	2326	1,73	95,7	0,25	38,2	64,0
5	7,07	4034	2338	1,73	96,4	0,25	38,6	63,5
6	7,07	4054	2338	1,73	96,7	0,25	38,7	64,7
7	7,07	4025	2331	1,73	95,9	0,25	38,4	63,3
8	7,07	4050	2342	1,73	96,9	0,25	38,8	64,2
9	7,07	4039	2344	1,72	96,8	0,25	38,8	63,5
10	7,07	4039	2337	1,73	96,4	0,25	38,6	63,8
11	7,07	4039	2326	1,74	95,8	0,25	38,3	64,3
12	7,07	4026	2325	1,73	95,5	0,25	38,2	63,6
13	7,07	4055	2347	1,73	97,2	0,25	38,9	64,4
14	7,07	4042	2343	1,73	96,8	0,25	38,8	63,8
15	7,07	4034	2324	1,74	95,6	0,25	38,2	64,1
	MEDIA	4039	2334	1,73	96,2	0,25	38,5	64,0
	devstd	9	8	0,00	0,5	0,00	0,2	0,4

N° pr.	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y [Gpa]	Pois.	G [Gpa]	C.M.[Gpa]
1	6,9	3865	2260	1,71	87,4	0,24	35,3	56,1
2	6,9	3847	2246	1,71	86,4	0,24	34,8	55,7
3	6,9	3871	2251	1,72	87,0	0,24	35,0	56,8
4	6,9	3855	2252	1,71	86,8	0,24	35,0	55,9
5	6,9	3842	2255	1,70	86,8	0,24	35,1	55,1
6	6,9	3841	2243	1,71	86,2	0,24	34,7	55,5
7	6,9	3828	2238	1,71	85,7	0,24	34,6	55,0
8	6,9	3779	2231	1,69	84,7	0,23	34,4	52,7
9	6,9	3850	2241	1,72	86,2	0,24	34,7	56,1
10	6,9	3755	2233	1,68	84,4	0,23	34,4	51,4
11	6,9	3815	2215	1,72	84,3	0,25	33,9	55,3
12	6,9	3818	2267	1,68	87,1	0,23	35,5	53,3
13	6,9	3812	2226	1,71	84,9	0,24	34,2	54,7
14	6,9	3835	2253	1,70	86,6	0,24	35,0	54,8
15	6,9	3833	2227	1,72	85,2	0,25	34,2	55,7
	MEDIA	3830	2243	1,71	86,0	0,24	34,7	54,9
	devstd	31	14	0,01	1,0	0,01	0,4	1,4

Questo materiale torna a presentare un comportamento simile ai primi due, ovvero le prove coi provini a densità 7.3 Kg/dm³ hanno avuto esito nullo; come già spiegato in precedenza il segnale captato dal trasduttore è risultato quasi impercettibile, per cui la misura è risultata del tutto priva di senso se non addirittura impossibile da realizzare, dato che appunto è risultato impossibile andare ad individuare il picco di rilevazione.

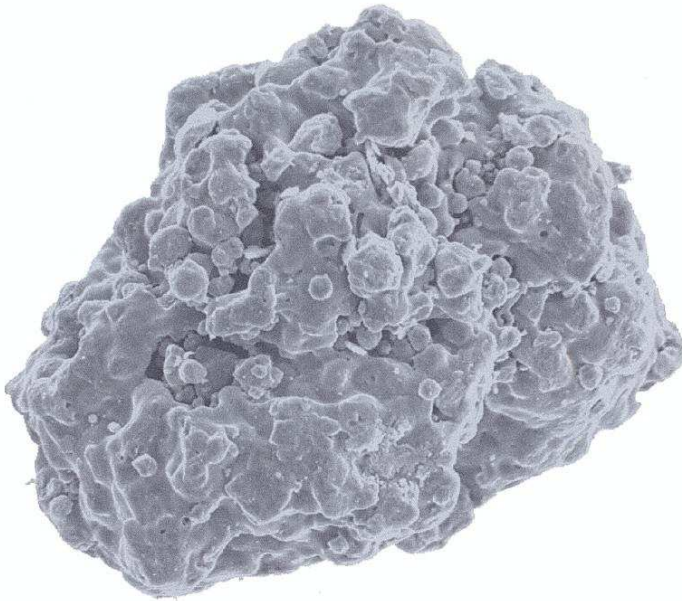
Tale fenomeno può essere ancora una volta spiegato a causa della presenza di stratificazioni e/o laminazioni nel materiale che rappresentando una discontinuità nella propagazione degli ultrasuoni all'interno del materiale, ne attenuano parecchio la propagazione all'interno di esso.

Mettendo in un grafico le velocità longitudinali e trasversali ed interpolando linearmente i valori tra 6,9 e 7,1 Kg/dm³ si può tracciare una retta ove plausibilmente stazionano i valori di VL e Vs per le densità intermedie.



6.1.5 Analisi dei provini con materiale 06.65.47, “Distaloy AE + 0,2% C”

Distaloy AE



Il quarto materiale in esame, avente codice prodotto 06.65.47, è una polvere a base Distaloy AE con l'aggiunta di uno 0,2% di grafite (C) e uno 0,6% di lubrificante.

Si tratta quindi di una polvere di tipo “diffusion bonded” : come si può notare dal certificato d'analisi la composizione chimica della polvere di base è del tutto analoga a quella del Distaloy AB con la “sola” variazione di un incremento della percentuale di Nichel che passa dal 1,75% al 3,9%. Questa polvere viene usata per la produzione di particolari che richiedono notevoli caratteristiche meccaniche: con opportuno trattamento termico (sinterotempra) tale materiale presenta una resistenza R di 750Mpa.

CERTIFICATO DI ANALISI

Nr. lotto 1301015 Data stampa 2011-08-19
 Num. ordine 0010088977 Consegna 1231392 Spedizione 3076282

Nome part 06.65.47 Densmix
 C. parte 093553

Cliente METALSINTER S.R.L.
 VIA MESSINA 9
 I-20038 SEREGNO MI
 ITALIA

01057

Metalsinter S.R.L.

Quantità 500 Kg Vostro riferimento 7974/BIS Data produzione 2011-08-10 Qtà prodotta 507 Kg

Composition

Distaloy AE BAL %
 Graphite UF4 0.20 %
 DM120 0.60 %

Risult. test Unità Specificazione MIN MAX ISSUE 1

CHEMICAL PROPERTIES

Risult. test	Unità	Specificazione MIN	Specificazione MAX	ISSUE 1
Ni	3.91 %	3.57	4.36 %	
Cu	1.48 %	1.34	1.64 %	
Mo	0.48 %	0.45	0.55 %	
C-Graphite	0.21 %	0.16	0.24 %	
Lubricant	0.62 %	0.54	0.66 %	
Fe is Base				

PHYSICAL PROPERTIES

AD (120 degree C)	3.33 g/cm3
Flow Hall (120 Degree C)	25 sec/50g
GD 600 MPa (120 degree C)	7.27 g/cm3

Approvato da



Quality Control Manager

Inspection certificate
 EN 10 204, 3.1

Indirizzo postale
 Höganäs Sweden AB
 S-263 83 HÖGANÄS
 Sweden
 Org. No. 558204-9891

Höganäs Sweden AB
 Registered office: Höganäs
 Reg. No 556204-9891

Telefono
 +46 42 338000
 Telefax
 +46 42 338100

VAT No
 SE556204989101

Banca
 Svenska Handelsbanken
 Höganäs/Sweden
 Telefax +46 42388449

Conto Nr.
 8790 78711048
 Bg 289-5748

Coordinate bancarie
 Svenska Handelsbanken
 Stockholm/Sweden
 Dirección-SWIFT HANDSESS
 IBAN SE81 8000 0000 0000 7871 1048

I risultati ottenuti mediante le rilevazioni ad ultrasuoni sui provini composti dalla polvere 06.65.47 sono riassunti nella seguente tabella:

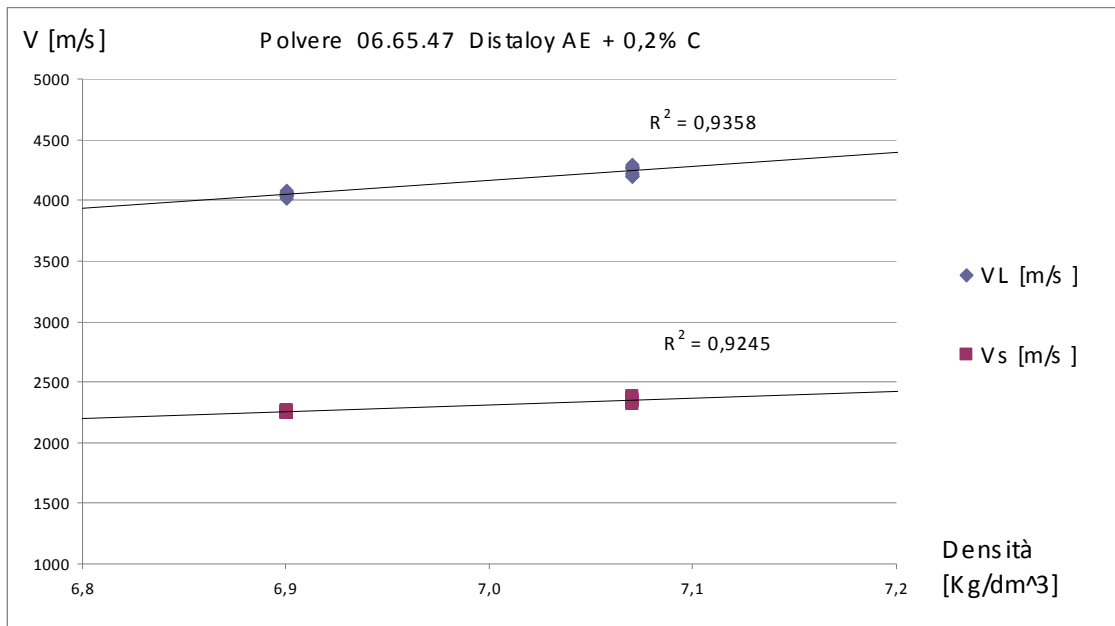
N° pr.	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y [Gpa]	Pois.	G [Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,30	4228	2257	1,87	96,7	0,30	37,2	80,9
2	7,30	4260	2278	1,87	98,5	0,30	37,9	81,9
3	7,30	4171	2293	1,82	98,5	0,28	38,4	75,8
4	7,30	4194	2252	1,86	96,1	0,30	37,0	79,0
5	7,30	4200	2291	1,83	98,7	0,29	38,3	77,7
6	7,30	4260	2283	1,87	98,8	0,30	38,1	81,8
7	7,30	4222	2257	1,87	96,7	0,30	37,2	80,5
8	7,30	4099	2335	1,76	100,3	0,26	39,8	69,6
9	7,30	4045	2325	1,74	98,9	0,25	39,4	66,8
10	7,30	4100	2356	1,74	101,6	0,25	40,5	68,7
11	7,30	4110	2356	1,74	101,7	0,26	40,5	69,3
12	7,30	4075	2357	1,73	101,3	0,25	40,5	67,2
13	7,30	4102	2348	1,75	101,2	0,26	40,3	69,2
14	7,30	4193	2351	1,78	102,6	0,27	40,4	74,5
15	7,30	4231	2256	1,88	96,7	0,30	37,2	81,1
	MEDIA	4166	2306	1,81	99,2	0,28	38,8	74,9
	devstd	71	42	0,06	2,1	0,02	1,4	5,9

N° pr.	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y [Gpa]	Pois.	G [Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,10	4192	2255	1,86	93,6	0,30	36,1	76,6
2	7,10	4195	2323	1,81	98,0	0,28	38,3	73,8
3	7,10	4192	2260	1,89	91,4	0,30	35,0	78,1
4	7,10	4210	2341	1,80	99,3	0,28	38,9	74,0
5	7,10	4258	2340	1,82	99,8	0,28	38,9	76,9
6	7,10	4216	2324	1,81	98,3	0,28	38,4	75,1
7	7,10	4222	2350	1,80	100,0	0,28	39,2	74,3
8	7,10	4282	2403	1,78	104,1	0,27	41,0	75,5
9	7,10	4288	2310	1,86	98,2	0,30	37,9	80,0
10	7,10	4271	2353	1,82	100,8	0,28	39,3	77,1
11	7,10	4267	2413	1,77	104,6	0,26	41,3	74,1
12	7,10	4263	2313	1,84	98,1	0,29	38,0	78,4
13	7,10	4231	2308	1,83	97,4	0,29	37,8	76,7
14	7,10	4267	2313	1,84	98,2	0,29	38,0	78,6
15	7,10	4265	2311	1,85	98,0	0,29	37,9	78,6
	MEDIA	4241	2325	1,82	98,7	0,28	38,4	76,5
	devstd	34	48	0,03	3,3	0,01	1,6	2,0

N° pr.	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y [Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	6,9	4048	2267	1,79	90,2	0,27	35,5	65,8
2	6,9	4066	2266	1,79	90,3	0,27	35,4	66,8
3	6,9	4018	2260	1,78	89,4	0,27	35,2	64,4
4	6,9	4030	2255	1,79	89,3	0,27	35,1	65,3
5	6,9	4037	2246	1,80	88,8	0,28	34,8	66,0
6	6,9	4055	2257	1,80	89,7	0,28	35,1	66,6
7	6,9	4034	2241	1,80	88,5	0,28	34,7	66,1
8	6,9	4062	2261	1,80	90,0	0,28	35,3	66,8
9	6,9	4039	2247	1,80	88,9	0,28	34,8	66,1
10	6,9	4040	2252	1,79	89,2	0,27	35,0	66,0
11	6,9	4077	2246	1,82	89,3	0,28	34,8	68,3
12	6,9	4056	2255	1,80	89,6	0,28	35,1	66,7
13	6,9	4042	2251	1,80	89,2	0,28	35,0	66,1
14	6,9	4037	2249	1,80	89,0	0,27	34,9	65,9
15	6,9	4040	2247	1,80	88,9	0,28	34,8	66,2
	MEDIA	4045	2253	1,80	89,3	0,28	35,0	66,2
	devstd	15	8	0,01	0,5	0,00	0,2	0,8

Questo materiale torna a presentare un comportamento difforme da quanto ci si aspetta per la polvere a maggiore densità, ovvero coi provini a densità 7.3 Kg/dm³. Si nota difatti immediatamente come la velocità di propagazione longitudinale (VL) sia addirittura inferiore a quella relativa ai provini a densità di 7,1 Kg/dm³. Come già spiegato in precedenza la misura è affetta da anomalie del materiale dovute probabilmente a difetti di sovra-pressatura.

Mettendo in un grafico le velocità longitudinali e trasversali ed interpolando linearmente i valori tra 6,9 e 7,1 Kg/dm³ si può tracciare una retta ove plausibilmente stazionano i valori di VL e Vs per le densità intermedie.



Un lettore accorto potrebbe ora chiedersi il perché fino ad ora si è descritto il comportamento di ogni singola polvere e non si è estrapolato un grafico o una legge matematica universalmente valida per qualsiasi polvere che legghi la velocità di propagazione delle onde alla densità. Si è provato ovviamente a cercare questo legame, ma il risultato, alla luce delle considerazioni che si andranno di seguito a fare, non ha avuto l'esito sperato. E' difatti intrinseco nella natura delle polveri che esse siano diverse l'una dalle altre, e se per quanto riguarda la composizione chimica (entro certi parametri) essa comporti variazioni trascurabili nelle rilevazioni ad ultrasuoni, nelle polveri ci sono altri parametri (natura della polvere, morfologia, tipologia di alligazione,...), che influenzano notevolmente (e queste rilevazioni ne sono un ulteriore prova) le caratteristiche fisiche e meccaniche dei particolari costituiti con esse.

In particolare considerazioni possono essere fatte secondo le seguenti variabili:

- Presenza del lubrificante miscelato alle polveri: la sua aggiunta in diverse quantità e tipologie influenza sicuramente la risposta ad ultrasuoni dei provini a verde (da alcuni documenti [6] viene riportata addirittura una variabilità da 1000 a 5000 m/s della velocità di propagazione delle onde ultrasonore al cambiare del lubrificante immesso), mentre dopo sinterizzazione non avrà alcuna influenza in quanto in forno sarà totalmente evaporato.
- Morfologia della polvere, e quindi dei pori che ne deriveranno, difatti come spiegato pagine addietro nei capitoli relativi agli ultrasuoni e come essi si propagano ed subiscono attenuazioni, si menzionava il fatto della porosità, che attenua la propagazione di tali onde non solo relativamente alla percentuale assoluta, ma anche al fattore di forma di essi, ovvero se sono tendenzialmente

sferici (ed in questo caso esiste una legge matematica che lega VL alla porosità), o presentano forma irregolare (ed in questo caso è alquanto improbabile l'individuazione di una legge/legame).

- Il tipo di alligazione, ovvero come gli elementi di lega vengono aggiunti alla polvere a base ferro. Nelle polveri difatti gli elementi di lega possono essere aggiunti mediante diverse tecniche, dall'aggiunta di essi nella massa di ferro liquido prima della formazione della polvere (polveri prelegate), alle più sofisticate tecniche di aggiunta di elementi direttamente sulle polveri (le cosiddette "diffusion bonded"), che andranno a diffondersi solo successivamente nella fase di sinterizzazione in forno. Da ciò è evidente come gli elementi di lega nelle "diffusion bonded" presenti in superficie in ogni singolo grano di polvere, influenzino la morfologia dei pori risultanti in un particolare pressato "a verde". In più il diverso tipo di alligazione influenza la comprimibilità della polvere, ovvero una polvere prelegata risulterà meno comprimibile, mentre una "diffusion bonded" sarà ben più comprimibile (in quanto il cuore della polvere sarà ben più malleabile). Ne risulterà ancora una volta un fattore di variazione della morfologia dei pori, ed in più un diverso coefficiente di adesione plastica tra i singoli grani di polvere, che insieme daranno quindi una diversa modalità di propagazione delle onde ultrasonore.
- La quantità degli elementi di lega, per le quali considerazioni vale quanto scritto sopra considerando in più il fattore che per una medesima tecnica di alligazione la diversa quantità degli elementi legati alla polvere base influenza ancora una volta la forma dei pori del pressato a verde.

Nonostante queste considerazioni che potrebbero scoraggiare l'uso degli ultrasuoni nella rilevazione delle densità a verde, col lavoro svolto ed i risultati riportati fino ad ora è possibile affermare che eseguendo prove ad ultrasuoni su particolari a verde, nei limiti di ciascuna polvere, essa sia ben affidabile e risponda ai diagrammi sopra riportati.

Tale "inconveniente" è presto soluto, in quanto in campo produttivo le misurazioni della densità di compattazione avvengono ovviamente su prodotti di cui è ben nota la polvere che si sta usando per produrli!

6.2 Prove sperimentali sul sinterizzato

E' noto come durante sinterizzazione le polveri si leghino l'una all'altra formando un particolare compatto dalle caratteristiche meccaniche ben superiori. Durante questa fase dal punto di vista delle variabili appena descritte che influenzano le rilevazioni mediante ultrasuoni si può affermare che il forno aiuta notevolmente ad eliminarle o ad assottigliare alcune differenze tra le diverse polveri, cosicché una volta sinterizzati i particolari composti da polveri affini presentino valori più vicini e paragonabili tra loro, dalla quale si possa ricavare (contrariamente a quanto visto per i componenti a verde) una legge più generale.

Nella prima fase di sinterizzazione come già accennato alla fine del capitolo precedente il lubrificante evapora, ecco quindi come tale variabile sia già esclusa.

Nella fase successiva non solo le polveri si legano le une alle altre, ma si assiste anche a fenomeni diffusivi nei quali gli elementi di lega in precedenza legati in superficie ai singoli grani di polvere (polveri "diffusion bonded") diffondono nella massa a base ferro. Durante tale fenomeno la forma dei pori diviene per questo motivo più regolare.

Durante permanenza in forno inoltre, man mano che avanza il processo di sinterizzazione, sotto la spinta di azioni idrostatiche (dovute ai grani di polvere che si legano gli uni agli altri) i pori tendono a diventare sempre più sferici.

Essendo tale fenomeno comune a tutti i tipi di polvere ci si può attendere che i particolari (in questo caso i provini precedentemente analizzati a verde) dopo sinterizzazione presentino caratteristiche più vicine nelle indagini ad ultrasuoni.

Si sottolinea il fatto che per calcolare la densità dei provini sinterizzati si è utilizzato il cosiddetto metodo della doppia pesata: mentre a verde i pori sono occlusi dal lubrificante ed è possibile quindi effettuare il calcolo della densità secondo semplice metodo archimedeo, tale prova col sinterizzato avrebbe esito falsato dall'acqua che penetrerebbe nei pori ora aperti.

Il metodo della doppia pesata prevede invece la pesa (in aria) del provino a secco, e la successiva pesa dopo impregnazione in olio, sia aria che in acqua (così che stavolta i pori pieni di olio non facciano assorbire l'acqua al provino).

Il calcolo della densità è presto fatto: $(\text{peso a secco in aria}) / (\text{peso con olio in aria} - \text{peso con olio in acqua}) = \text{densità}$.

6.2.1 Analisi dei provini con materiale 06.65.27, “Distaloy DH1 + 0,1% C”, sinterizzati

I risultati ottenuti mediante le rilevazioni ad ultrasuoni sui provini sinterizzati composti dalla polvere 06.65.27, a base Distaloy DH + 0,1%C, della quale si rimanda alla scheda d'analisi si rimanda al capitolo 5 sono riassunti nella seguente tabella, con la particolare nota relativa al fatto che dopo sinterizzazione la densità misurata (mediante il metodo ad impregnazione in olio della quale peraltro verranno dati anche i risultati ad ultrasuoni) è calata. In particolare i provini con densità a verde di 7,30 Kg/dm³ sono calati fino a 7,20 Kg/dm³, quelli a 7,1 Kg/dm³ fino a 7,02 Kg/dm³ e quelli originariamente a 6,9 Kg/dm³ fino a 6,83 Kg/dm³.

EX 7,30 ora 7,20 sinterizzato senza impregnazione in olio:

N° pr	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,20	5035	2857	1,76	148,4	0,26	58,8	104,2
2	7,20	5040	2851	1,77	148,0	0,26	58,5	104,9
3	7,20	5032	2850	1,77	147,8	0,26	58,5	104,3
4	7,20	5033	2850	1,77	147,8	0,26	58,5	104,4
5	7,20	5041	2852	1,77	148,1	0,26	58,6	104,9
6	7,20	5039	2856	1,76	148,4	0,26	58,7	104,5
	MEDIA	5037	2853	1,77	148,1	0,26	58,6	104,5
	dev st	4	3	0,00	0,3	0,00	0,1	0,3

EX 7,30 ora 7,20 sinterizzato ed impregnato in olio:

N° pr	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,20	5111	2865	1,78	150,2	0,27	59,1	109,3
2	7,20	5109	2864	1,78	150,1	0,27	59,1	109,2
3	7,20	5122	2860	1,79	150,0	0,27	58,9	110,4
4	7,20	5110	2859	1,79	149,7	0,27	58,9	109,5
5	7,20	5109	2865	1,78	150,2	0,27	59,1	109,1
6	7,20	5113	2861	1,79	149,9	0,27	58,9	109,6
	MEDIA	5112	2862	1,79	150,0	0,27	59,0	109,5
	Dev st	5	3	0,00	0,2	0,00	0,1	0,5

Si nota come in questo caso la VL sia ben maggiore nei provini impregnati in olio; ciò in parte è spiegabile con le considerazioni fatte per la precedente polvere, ovvero le porosità piene d'olio anziché aria fan sì che gli ultrasuoni si propaghino meglio e siano quindi più veloci, ma analizzando il fatto che la VL nei provini non impregnati sia ben inferiore alle due medie precedenti, pur avendo i provini una densità maggiore, lascia pensare che ci sia altro oltre alla normale porosità, che fa assorbire più olio durante impregnazione rispetto al caso precedente.

Per quanto riguarda la Vs (velocità tangenziale) essa risulta leggermente superiore, epurato il fatto di possibili difetti nelle misurazioni, il risultato si può affermare sia ancora una volta in linea con quanto atteso, in quanto le onde tangenziali non riescono a propagarsi nei mezzi liquidi (e aerei), per cui le cavità piene d'olio si comportano esattamente come quelle piene d'aria.

EX 7,10 ora 7,02 sinterizzato senza impregnazione in olio:

N° pr.	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,02	5013	2819	1,78	141,6	0,27	55,8	102,0
2	7,02	5016	2816	1,78	141,4	0,27	55,7	102,4
3	7,02	5019	2812	1,78	141,1	0,27	55,5	102,8
4	7,02	5013	2814	1,78	141,2	0,27	55,6	102,3
5	7,02	5012	2815	1,78	141,2	0,27	55,6	102,2
6	7,02	5014	2816	1,78	141,4	0,27	55,7	102,3
	MEDIA	5015	2815	1,78	141,3	0,27	55,6	102,3
	dev st	3	2	0,00	0,2	0,00	0,1	0,3

EX 7,10 ora 7,02 sinterizzato ed impregnato in olio:

N° pr.	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,02	5043	2808	1,80	141,2	0,28	55,4	104,7
2	7,02	5043	2807	1,80	141,1	0,28	55,3	104,8
3	7,02	5045	2809	1,80	141,3	0,28	55,4	104,8
4	7,02	5038	2805	1,80	140,9	0,28	55,2	104,5
5	7,02	5037	2804	1,80	140,8	0,28	55,2	104,5
6	7,02	5041	2804	1,80	140,9	0,28	55,2	104,8
	MEDIA	5041	2806	1,80	141,0	0,28	55,3	104,7
	dev st	3	2	0,00	0,2	0,00	0,1	0,1

EX 6,90 ora 6,83 senza impregnazione in olio:

N° pr.	den.	VL[m/s]	Vs[m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	6,83	4871	2737	1,78	129,9	0,27	51,2	93,8
2	6,83	4874	2739	1,78	130,1	0,27	51,2	93,9
3	6,83	4864	2736	1,78	129,7	0,27	51,1	93,4
4	6,83	4859	2735	1,78	129,6	0,27	51,1	93,1
5	6,83	4869	2739	1,78	130,0	0,27	51,2	93,6
6	6,83	4871	2739	1,78	130,0	0,27	51,2	93,7
	MEDIA	4868	2738	1,78	129,9	0,27	51,2	93,6

	dev std	6	2	0,00	0,2	0,00	0,1	0,3
--	----------------	----------	----------	-------------	------------	-------------	------------	------------

EX 6,90 ora 6,83 sinterizzato ed impregnato in olio:

N° pr.	den.	VL[m/s]	Vs[m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	6,83	4830	2692	1,79	126,2	0,27	49,5	93,3
2	6,83	4826	2694	1,79	126,3	0,27	49,6	93,0
3	6,83	4827	2693	1,79	126,2	0,27	49,5	93,1
4	6,83	4832	2695	1,79	126,4	0,27	49,6	93,3
5	6,83	4829	2691	1,79	126,1	0,27	49,5	93,3
6	6,83	4834	2697	1,79	126,6	0,27	49,7	93,4
	MEDIA	4830	2694	1,79	126,3	0,27	49,6	93,2
	dev st	3	2	0,00	0,2	0,00	0,1	0,2

Per i due step di densità inferiore l'anomalia della VL relativamente maggiore nei provini impregnati presentata nei provini a densità più elevata viene riscontrata in minor misura, paragonabile ai valori della polvere precedente; si può pensare di indagare metallograficamente tale difetto, nei successivi paragrafi verrà ripreso tale considerazione. Ancora una volta poi la Vs presenta il tipico comportamento praticamente costante sia con olio che senza olio.

Si nota ancora una volta che i valori misurati su provini sinterizzati sono ben più costanti (minore deviazione std nei dati) rispetto alle misurazioni effettuate sui medesimi provini in precedenza a verde.

6.2.2 Analisi dei provini con materiale 06.65.31 , “Distaloy DH1 + 0,7% C”, sinterizzati

I risultati ottenuti mediante le rilevazioni ad ultrasuoni sui provini sinterizzati composti dalla polvere 06.65.31, a base Distaloy DH + 0,7% C, della quale si rimanda alla scheda d'analisi si rimanda al capitolo 5 sono riassunti nella seguente tabella, con la particolare nota relativa al fatto che dopo sinterizzazione la densità misurata (mediante il metodo ad impregnazione in olio della quale peraltro verranno dati anche i risultati ad ultrasuoni) è calata. In particolare i provini con densità a verde di 7,25 Kg/dm³ sono calati fino a 7,13 Kg/dm³, quelli a 7,10 Kg/dm³ fino a 7,00 Kg/dm³ e quelli originariamente a 6,90 Kg/dm³ fino a 6,82 Kg/dm³.

EX 7,25 ora 7,13 sinterizzato senza impregnazione in olio:

N° pr	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,13	5082	2842	1,79	146,6	0,27	57,6	107,4
2	7,13	5086	2839	1,79	146,4	0,27	57,5	107,8

3	7,13	5089	2837	1,79	146,3	0,27	57,4	108,1
4	7,13	5088	2841	1,79	146,6	0,27	57,5	107,8
5	7,13	5091	2842	1,79	146,7	0,27	57,6	108,0
6	7,13	5089	2840	1,79	146,5	0,27	57,5	108,0
	MEDIA	5088	2840	1,79	146,5	0,27	57,5	107,9
	dev st	3	2	0,00	0,1	0,00	0,1	0,3

EX 7,25 ora 7,13 sinterizzato ed impregnato in olio:

N° pr	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,13	5093	2825	1,803	145,4	0,28	56,9	109,1
2	7,13	5094	2826	1,803	145,5	0,28	56,9	109,1
3	7,13	5095	2826	1,803	145,5	0,28	56,9	109,2
4	7,13	5091	2828	1,800	145,6	0,28	57,0	108,8
5	7,13	5093	2824	1,803	145,3	0,28	56,9	109,1
6	7,13	5093	2824	1,803	145,3	0,28	56,9	109,1
	MEDIA	5093	2826	1,80	145,5	0,28	56,9	109,1
	dev st	1	2	0,00	0,1	0,00	0,1	0,1

Si nota come la VL sia maggiore nei provini impregnati in olio; ciò corrisponde a quanto ci si potrebbe aspettare, ovvero le porosità piene d'olio anziché aria fanno sì che gli ultrasuoni si propaghino meglio e siano quindi più veloci.

Per quanto riguarda la Vs (velocità tangenziale) essa risulta leggermente inferiore, epurato il fatto di possibili difetti nelle misurazioni, il risultato si può affermare sia ancora una volta in linea con quanto atteso, in quanto le onde tangenziali non riescono a propagarsi nei mezzi liquidi (e aerei), per cui le cavità piene d'olio si comportano esattamente come quelle piene d'aria (è per questo che come accoppiante tra sonda e provino si utilizza una pasta specifica e non un liquido come nel caso delle sonde per le onde longitudinali).

EX 7,10 ora 7,00 sinterizzato senza impregnazione in olio:

N° pr	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,00	5008	2805	1,79	140,1	0,27	55,1	102,1
2	7,00	5006	2805	1,78	140,0	0,27	55,1	102,0
3	7,00	5003	2801	1,79	139,7	0,27	54,9	102,0
4	7,00	5004	2802	1,79	139,8	0,27	55,0	102,0
5	7,00	5009	2804	1,79	140,0	0,27	55,0	102,2
6	7,00	5002	2797	1,79	139,4	0,27	54,8	102,1
	MEDIA	5005	2802	1,79	139,8	0,27	55,0	102,1
	dev st	3	3	0,00	0,3	0,00	0,1	0,1

EX 7,10 ora 7,00 sinterizzato ed impregnato in olio:

N° pr	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,00	5034	2792	1,80	139,5	0,28	54,6	104,6
2	7,00	5032	2792	1,80	139,4	0,28	54,6	104,5
3	7,00	5026	2781	1,81	138,5	0,28	54,1	104,6
4	7,00	5023	2788	1,80	139,0	0,28	54,4	104,1
5	7,00	5037	2818	1,79	141,4	0,27	55,6	103,5
6	7,00	5021	2787	1,80	138,9	0,28	54,4	104,0
	MEDIA	5029	2793	1,80	139,5	0,28	54,6	104,2
	dev st	6	13	0,01	1,0	0,00	0,5	0,5

EX 6,90 ora 6,82 senza impregnazione in olio:

N° pr	den.	VL[m/s]	Vs[m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	6,82	4804	2690	1,79	125,5	0,27	49,4	91,6
2	6,82	4807	2693	1,78	125,8	0,27	49,5	91,6
3	6,82	4810	2694	1,79	125,9	0,27	49,5	91,8
4	6,82	4806	2694	1,78	125,8	0,27	49,5	91,5
5	6,82	4807	2696	1,78	126,0	0,27	49,6	91,5
6	6,82	4804	2698	1,78	126,1	0,27	49,6	91,2
	MEDIA	4806	2694	1,78	125,8	0,27	49,5	91,5
	dev st	2	3	0,00	0,2	0,00	0,1	0,2

EX 6,90 ora 6,82 sinterizzato ed impregnato in olio:

N° pr	den.	VL[m/s]	Vs[m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	6,82	4816	2681	1,80	125,0	0,28	49,0	92,8
2	6,82	4814	2680	1,80	125,0	0,28	49,0	92,7
3	6,82	4821	2684	1,80	125,3	0,28	49,1	93,0
4	6,82	4819	2679	1,80	124,9	0,28	48,9	93,1
5	6,82	4812	2678	1,80	124,8	0,28	48,9	92,7
6	6,82	4815	2681	1,80	125,0	0,28	49,0	92,8
	MEDIA	4816	2681	1,80	125,0	0,28	49,0	92,9
	dev st	3	2	0,00	0,2	0,00	0,1	0,2

Anche per i due step di densità inferiore valgono le considerazioni fatte dopo le prime due tabelle a densità più elevata; in più si nota che i valori misurati ora, su provini sinterizzati, sono ben più costanti (minore deviazione std nei dati) rispetto alle misurazioni effettuate sui medesimi provini in precedenza a verde.

6.2.3 Analisi dei provini con materiale 65.15.601, “Distaloy AB + 0,2% C”, sinterizzati

I risultati ottenuti mediante le rilevazioni ad ultrasuoni sui provini sinterizzati composti dalla polvere 65.15.601, a base Distaloy AB + 0,2% C, della quale si rimanda alla scheda d’analisi si rimanda al capitolo 5 sono riassunti nella seguente tabella, con la particolare nota relativa al fatto che dopo sinterizzazione la densità misurata (mediante il metodo ad impregnazione in olio della quale peraltro verranno dati anche i risultati ad ultrasuoni) è calata. In particolare i provini con densità a verde di 7,30 Kg/dm³ sono calati fino a 7,25 Kg/dm³, quelli a 7,1 Kg/dm³ fino a 7,03 Kg/dm³ e quelli originariamente a 6,9 Kg/dm³ fino a 6,84 Kg/dm³.

EX 7,30 ora 7,25 sinterizzato senza impregnazione in olio:

N° pr	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,25	5214	2919	1,79	157,1	0,27	61,8	114,7
2	7,25	5212	2913	1,79	156,6	0,27	61,5	114,9
3	7,25	5224	2910	1,80	156,6	0,28	61,4	116,0
4	7,25	5220	2914	1,79	156,8	0,27	61,6	115,5
5	7,25	5219	2919	1,79	157,2	0,27	61,8	115,1
6	7,25	5221	2918	1,79	157,2	0,27	61,7	115,3
	MEDIA	5218	2916	1,79	156,9	0,27	61,6	115,3
	dev st	5	4	0,00	0,3	0,00	0,2	0,4

EX 7,30 ora 7,25 sinterizzato ed impregnato in olio:

N° pr	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,25	5222	2896	1,80	155,4	0,28	60,8	116,6
2	7,25	5224	2897	1,80	155,5	0,28	60,8	116,7
3	7,25	5223	2898	1,80	155,6	0,28	60,9	116,6
4	7,25	5219	2892	1,80	155,0	0,28	60,6	116,6
5	7,25	5226	2898	1,80	155,6	0,28	60,9	116,8
6	7,25	5223	2894	1,80	155,3	0,28	60,7	116,8
	MEDIA	5223	2896	1,80	155,4	0,28	60,8	116,7
	dev st	2	2	0,00	0,2	0,00	0,1	0,1

La VL in questi provini è risultata piuttosto elevata, ciò è concorde col fatto che la densità raggiunta è più elevata che nei provini precedenti.

Per quanto riguarda la Vs (velocità tangenziale) essa risulta leggermente inferiore, epurato il fatto di possibili difetti nelle misurazioni, ancora una volta il risultato si può affermare sia in linea con quanto atteso, in quanto le onde tangenziali non riescono a propagarsi nei mezzi liquidi (e aerei), per cui le cavità piene d'olio si comportano esattamente come quelle piene d'aria.

EX 7,10 ora 7,03 sinterizzato senza impregnazione in olio:

N° pr	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,03	5006	2807	1,78	140,8	0,27	55,4	102,3
2	7,03	5003	2805	1,78	140,6	0,27	55,3	102,2
3	7,03	5008	2803	1,79	140,5	0,27	55,2	102,7
4	7,03	5004	2804	1,78	140,5	0,27	55,3	102,3
5	7,03	5003	2803	1,78	140,4	0,27	55,2	102,3
6	7,03	5006	2805	1,78	140,6	0,27	55,3	102,4
	MEDIA	5005	2805	1,78	140,6	0,27	55,3	102,4
	dev st	2	2	0,00	0,1	0,00	0,1	0,2

EX 7,10 ora 7,03 sinterizzato ed impregnato in olio:

N° pr	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M [Gpa]
1	7,03	5012	2792	1,80	139,7	0,28	54,8	103,5
2	7,03	5010	2790	1,80	139,6	0,28	54,7	103,5
3	7,03	5016	2792	1,80	139,8	0,28	54,8	103,8
4	7,03	5014	2795	1,79	140,0	0,27	54,9	103,5
5	7,03	5013	2793	1,79	139,8	0,27	54,8	103,5
6	7,03	5014	2796	1,79	140,1	0,27	55,0	103,5
	MEDIA	5013	2793	1,79	139,8	0,27	54,8	103,6
	dev st	2	2	0,00	0,2	0,00	0,1	0,1

EX 6,90 ora 6,84 senza impregnazione in olio:

N° pr	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	6,84	4852	2732	1,78	129,5	0,27	51,1	93,0
2	6,84	4844	2724	1,78	128,8	0,27	50,8	92,8
3	6,84	4853	2731	1,78	129,4	0,27	51,0	93,1
4	6,84	4846	2726	1,78	129,0	0,27	50,8	92,9
5	6,84	4849	2729	1,78	129,2	0,27	50,9	92,9

6	6,84	4852	2730	1,78	129,3	0,27	51,0	93,1
	MEDIA	4849	2729	1,78	129,2	0,27	50,9	92,9
	dev st	4	3	0,00	0,3	0,00	0,1	0,1

EX 6,90 ora 6,84 sinterizzato ed impregnato in olio:

N° pr	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	6,84	4870	2720	1,79	128,9	0,27	50,6	94,8
2	6,84	4872	2720	1,79	128,9	0,27	50,6	94,9
3	6,84	4863	2716	1,79	128,5	0,27	50,5	94,5
4	6,84	4868	2719	1,79	128,8	0,27	50,6	94,7
5	6,84	4871	2721	1,79	129,0	0,27	50,6	94,8
6	6,84	4865	2718	1,79	128,7	0,27	50,5	94,5
	MEDIA	4868	2719	1,79	128,8	0,27	50,6	94,7
	dev st	4	2	0,00	0,2	0,00	0,1	0,2

Con questa polvere non vi sono alcune anomalie, e si nota ancora che i valori misurati su provini sinterizzati sono ben più costanti (minore deviazione std nei dati) rispetto alle misurazioni effettuate sui medesimi provini in precedenza a verde.

6.2.4 Analisi dei provini con materiale 06.65.43, “Distaloy AB + 0,6% C”, sinterizzati

I risultati ottenuti mediante le rilevazioni ad ultrasuoni sui provini sinterizzati composti dalla polvere 06.65.43, a base Distaloy AB +0,6% C, della quale si rimanda alla scheda d’analisi si rimanda al capitolo 5, sono riassunti nella seguente tabella, con la particolare nota relativa al fatto che dopo sinterizzazione la densità misurata (mediante il metodo ad impregnazione in olio della quale peraltro verranno dati anche i risultati ad ultrasuoni) è calata. In particolare i provini con densità a verde di 7,30 Kg/dm³ sono calati fino a 7,22 Kg/dm³, quelli a 7,1 Kg/dm³ fino a 7,01 Kg/dm³ e quelli originariamente a 6,9 Kg/dm³ fino a 6,81 Kg/dm³.

EX 7,30 ora 7,22 sinterizzato senza impregnazione in olio:

N° pr	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,22	5089	2855	1,78	149,5	0,27	58,9	108,5
2	7,22	5101	2854	1,79	149,6	0,27	58,8	109,5
3	7,22	5104	2851	1,79	149,4	0,27	58,7	109,8
4	7,22	5103	2855	1,79	149,7	0,27	58,9	109,5
5	7,22	5094	2853	1,79	149,4	0,27	58,8	109,0

6	7,22	5090	2854	1,78	149,5	0,27	58,8	108,6
	MEDIA	5097	2854	1,79	149,5	0,27	58,8	109,2
	dev st	7	2	0,00	0,1	0,00	0,1	0,5

EX 7,30 ora 7,22 sinterizzato ed impregnato in olio:

N° pr	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,22	5112	2849	1,79	149,4	0,27	58,6	110,5
2	7,22	5107	2847	1,79	149,2	0,27	58,5	110,3
3	7,22	5099	2841	1,79	148,6	0,27	58,3	110,0
4	7,22	5122	2852	1,80	149,8	0,28	58,7	111,1
5	7,22	5112	2848	1,79	149,3	0,27	58,6	110,6
6	7,22	5109	2847	1,79	149,2	0,27	58,5	110,4
	MEDIA	5110	2847	1,79	149,2	0,27	58,5	110,5
	dev st	8	4	0,00	0,4	0,00	0,1	0,4

EX 7,10 ora 7,01 sinterizzato senza impregnazione in olio:

N° pr.	den.	VL[m/s]	Vs[m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,01	5011	2804	1,79	140,2	0,27	55,1	102,5
2	7,01	4996	2800	1,78	139,7	0,27	55,0	101,7
3	7,01	5012	2805	1,79	140,3	0,27	55,2	102,6
4	7,01	5003	2801	1,79	139,9	0,27	55,0	102,1
5	7,01	4992	2800	1,78	139,6	0,27	55,0	101,4
6	7,01	5009	2804	1,79	140,2	0,27	55,1	102,4
	MEDIA	5004	2802	1,79	140,0	0,27	55,1	102,1
	dev st	8	2	0,00	0,3	0,00	0,1	0,5

EX 7,10 ora 7,01 sinterizzato ed impregnato in olio:

N° pr.	den.	VL[m/s]	Vs[m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,01	5008	2796	1,79	139,6	0,27	54,8	102,7
2	7,01	5007	2794	1,79	139,4	0,27	54,7	102,8
3	7,01	5009	2805	1,79	140,3	0,27	55,2	102,3
4	7,01	5011	2804	1,79	140,2	0,27	55,1	102,5
5	7,01	5007	2801	1,79	139,9	0,27	55,0	102,4
6	7,01	5014	2807	1,79	140,5	0,27	55,2	102,6
	MEDIA	5009	2801	1,79	140,0	0,27	55,0	102,6

	dev st	3	5	0,00	0,4	0,00	0,2	0,2
--	---------------	----------	----------	-------------	------------	-------------	------------	------------

EX 6,90 ora 6,81 senza impregnazione in olio:

N° pr	den.	VL[m/s]	Vs[m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	6,81	4846	2716	1,78	127,7	0,27	50,2	92,9
2	6,81	4847	2717	1,78	127,8	0,27	50,3	93,0
3	6,81	4854	2720	1,78	128,1	0,27	50,4	93,3
4	6,81	4849	2716	1,79	127,7	0,27	50,2	93,1
5	6,81	4855	2723	1,78	128,3	0,27	50,5	93,2
6	6,81	4847	2718	1,78	127,9	0,27	50,3	92,9
	MEDIA	4850	2718	1,78	127,9	0,27	50,3	93,1
	dev st	4	3	0,00	0,2	0,00	0,1	0,2

EX 6,90 ora 6,81 sinterizzato ed impregnato in olio:

N° pr.	den.	VL[m/s]	Vs[m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	6,81	4869	2712	1,80	127,7	0,28	50,1	94,7
2	6,81	4868	2710	1,80	127,6	0,28	50,0	94,7
3	6,81	4874	2715	1,80	128,0	0,28	50,2	94,8
4	6,81	4873	2718	1,79	128,2	0,27	50,3	94,6
5	6,81	4869	2714	1,79	127,9	0,27	50,2	94,6
6	6,81	4867	2721	1,79	128,3	0,27	50,4	94,1
	MEDIA	4870	2715	1,79	128,0	0,27	50,2	94,6
	dev st	3	4	0,00	0,3	0,00	0,1	0,3

Con questa polvere non vi sono alcune anomalie, si nota ancora come i valori misurati sui provini sinterizzati sono ben più costanti (minore deviazione std nei dati) rispetto alle misurazioni effettuate sui medesimi provini in precedenza a verde.

6.2.5 Analisi dei provini con materiale 06.65.47, “Distaloy AE + 0,2% C” , sinterizzati

I risultati ottenuti mediante le rilevazioni ad ultrasuoni sui provini sinterizzati composti dalla polvere 06.65.47, a base Distaloy AE + 0,2% C, della quale si rimanda alla scheda d'analisi si rimanda al capitolo 5, sono riassunti nella seguente tabella, con la particolare nota relativa al fatto che dopo sinterizzazione la densità misurata (mediante il metodo ad impregnazione in olio della quale peraltro verranno dati anche i risultati ad ultrasuoni) è calata. In particolare i provini con densità a verde di 7,30 Kg/dm³ sono calati fino a 7,25 Kg/dm³, quelli a 7,1 Kg/dm³ fino a 7,03 Kg/dm³ e quelli originariamente a 6,9 Kg/dm³ fino a 6,84 Kg/dm³.

EX 7,30 ora 7,24 sinterizzato senza impregnazione in olio:

N° pr	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,24	5208	2898	1,80	155,1	0,28	60,8	115,3
2	7,24	5204	2893	1,80	154,7	0,28	60,6	115,3
3	7,24	5212	2909	1,79	156,1	0,27	61,3	115,0
4	7,24	5204	2891	1,80	154,5	0,28	60,5	115,4
5	7,24	5209	2894	1,80	154,8	0,28	60,6	115,6
6	7,24	5211	2896	1,80	155,0	0,28	60,7	115,6
	MEDIA	5208	2897	1,80	155,0	0,28	60,8	115,4
	dev st	3	6	0,00	0,6	0,00	0,3	0,2

EX 7,30 ora 7,24 sinterizzato ed impregnato in olio:

N° pr	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,24	5218	2897	1,80	155,2	0,28	60,8	116,1
2	7,24	5224	2895	1,80	155,1	0,28	60,7	116,7
3	7,24	5219	2992	1,74	162,7	0,26	64,8	110,8
4	7,24	5214	2897	1,80	155,2	0,28	60,8	115,8
5	7,24	5219	2898	1,80	155,3	0,28	60,8	116,1
6	7,24	5223	2901	1,80	155,6	0,28	60,9	116,3
	MEDIA	5220	2913	1,79	156,5	0,27	61,5	115,3
	dev st	4	39	0,02	3,0	0,01	1,6	2,2

EX 7,10 ora 7,03 sinterizzato senza impregnazione in olio:

N° pr	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,03	5012	2799	1,79	140,3	0,27	55,1	103,2
2	7,03	5006	2795	1,79	139,9	0,27	54,9	102,9
3	7,03	5010	2798	1,79	140,2	0,27	55,0	103,1

4	7,03	5003	2794	1,79	139,8	0,27	54,9	102,8
5	7,03	5016	2802	1,79	140,5	0,27	55,2	103,3
6	7,03	5009	2797	1,79	140,1	0,27	55,0	103,1
	MEDIA	5009	2798	1,79	140,1	0,27	55,0	103,1
	dev st	5	3	0,00	0,3	0,00	0,1	0,2

EX 7,10 ora 7,03 sinterizzato ed impregnato in olio:

N° pr.	den.	VL[m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y[Gpa]	Pois.	G[Gpa]	C.M.[Gpa]
1	7,03	5025	2802	1,79	140,7	0,27	55,2	103,9
2	7,03	5023	2798	1,80	140,3	0,28	55,0	104,0
3	7,03	5019	2793	1,80	139,9	0,28	54,8	104,0
4	7,03	5016	2793	1,80	139,9	0,28	54,8	103,8
5	7,03	5021	2798	1,79	140,3	0,27	55,0	103,8
6	7,03	5022	2799	1,79	140,4	0,27	55,1	103,9
	MEDIA	5021	2797	1,80	140,3	0,27	55,0	103,9
	dev st	3	4	0,00	0,3	0,00	0,1	0,1

EX 6,90 ora 6,84 senza impregnazione in olio:

N° pr.	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y [Gpa]	Pois.	G [Gpa]	C.M.[Gpa]
1	6,84	4866	2730	1,78	129,5	0,27	51,0	94,0
2	6,84	4875	2734	1,78	129,9	0,27	51,1	94,4
3	6,84	4871	2732	1,78	129,7	0,27	51,1	94,2
4	6,84	4869	2731	1,78	129,6	0,27	51,0	94,1
5	6,84	4878	2734	1,78	130,0	0,27	51,1	94,6
6	6,84	4863	2728	1,78	129,3	0,27	50,9	93,9
	MEDIA	4870	2732	1,78	129,7	0,27	51,0	94,2
	dev st	6	2	0,00	0,2	0,00	0,1	0,3

EX 6,90 ora 6,84 sinterizzato ed impregnato in olio:

N° pr.	den.	VL [m/s]	Vs [m/s]	VL/Vs	Y [Gpa]	Pois.	G [Gpa]	C.M.[Gpa]
1	6,84	4879	2732	1,79	129,8	0,27	51,1	94,8
2	6,84	4883	2735	1,79	130,1	0,27	51,2	94,9
3	6,84	4882	2736	1,78	130,2	0,27	51,2	94,8
4	6,84	4885	2734	1,79	130,1	0,27	51,1	95,1
5	6,84	4881	2730	1,79	129,7	0,27	51,0	95,0
6	6,84	4878	2729	1,79	129,6	0,27	50,9	94,8

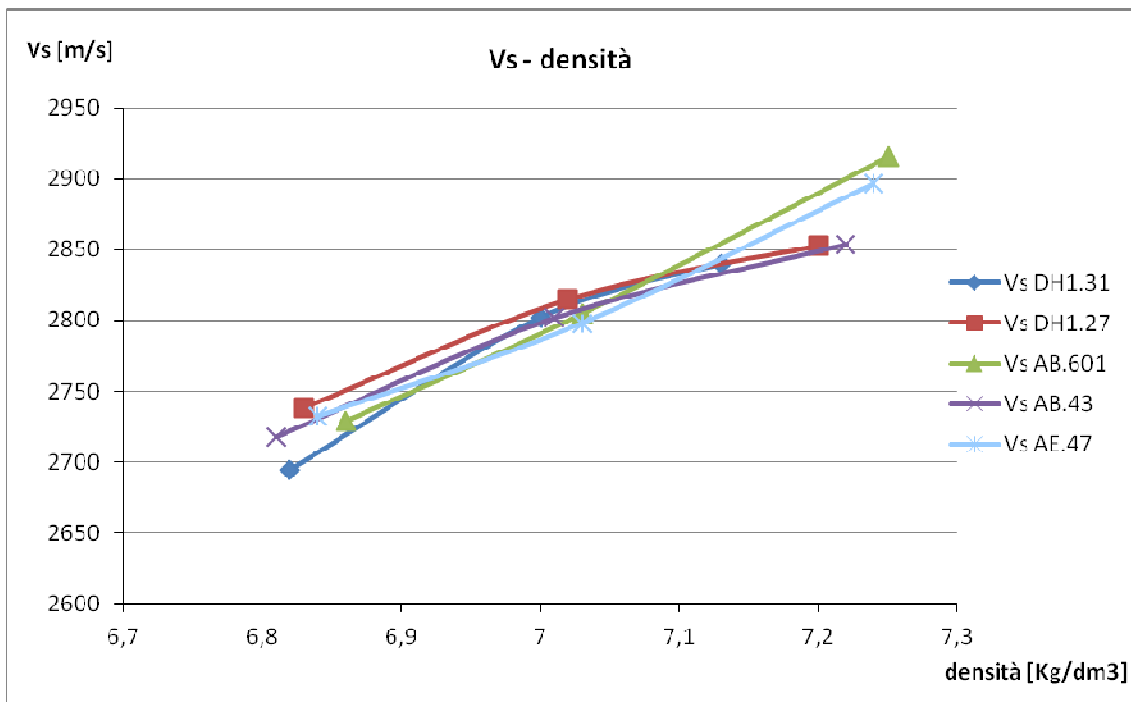
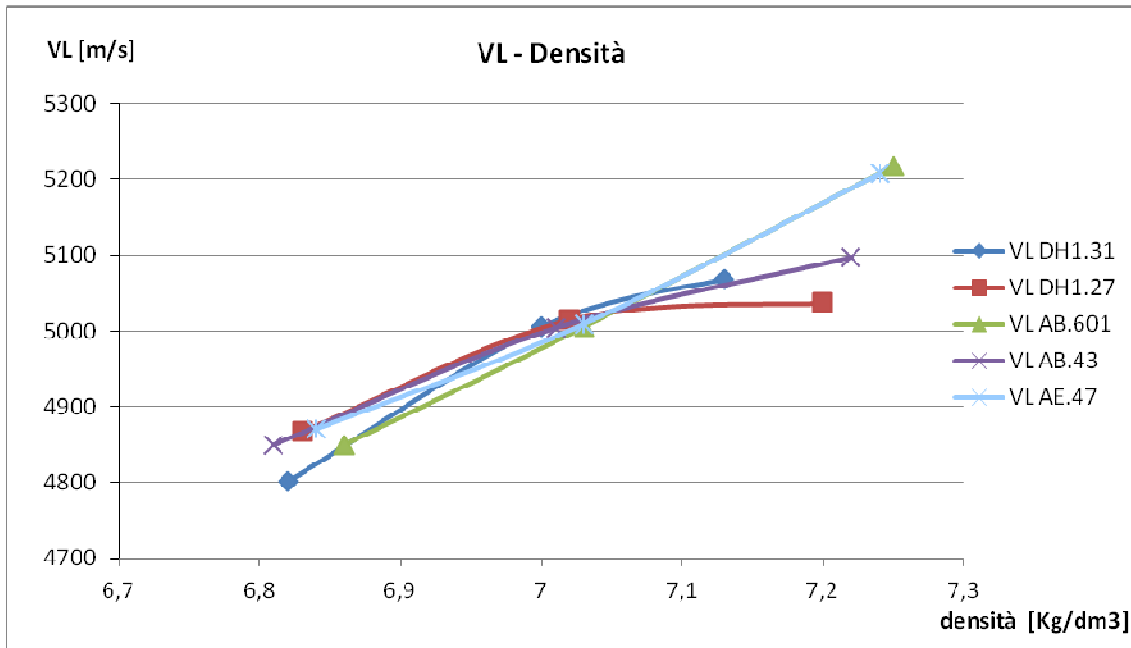
	MEDIA	4881	2733	1,79	129,9	0,27	51,1	94,9
	dev st	3	3	0,00	0,2	0,00	0,1	0,1

I valori rilevati sono ricalcano quelli della polvere 06.65.601, ovvero nella polvere a più alta densità le onde ultrasonore si propagano con velocità più elevata rispetto alle altre 3 polveri analizzate fino ad ora. Ciò è pienamente in linea con quanto ci si potrebbe attendere per i seguenti motivi: nelle prove a verde il comportamento ha visto una propagazione molto buona delle onde ultrasonore anche a densità 7,3K_m/dm³, quindi una compattazione avvenuta in maniera ottimale con pochissime discontinuità (che in altre polveri hanno attenuato gli ultrasuoni..), quindi da sinterizzato il comportamento è risultato “figlio” di tale buona compattazione. A sua volta la buona compattazione è spiegabile andando ad analizzare la composizione chimica della polvere base “Distaloy AE” da cui è composto: tale polvere è analoga alla Distaloy AB per metodo produttivo e composizione chimica di base, con l’importante differenza di avere il 4% di Nichel anziché l’ 1,75%. Il Nichel in una lega da metallurgia delle polveri ne innalza notevolmente la comprimibilità, ed una volta sinterizzato eleva la tenacità del materiale.

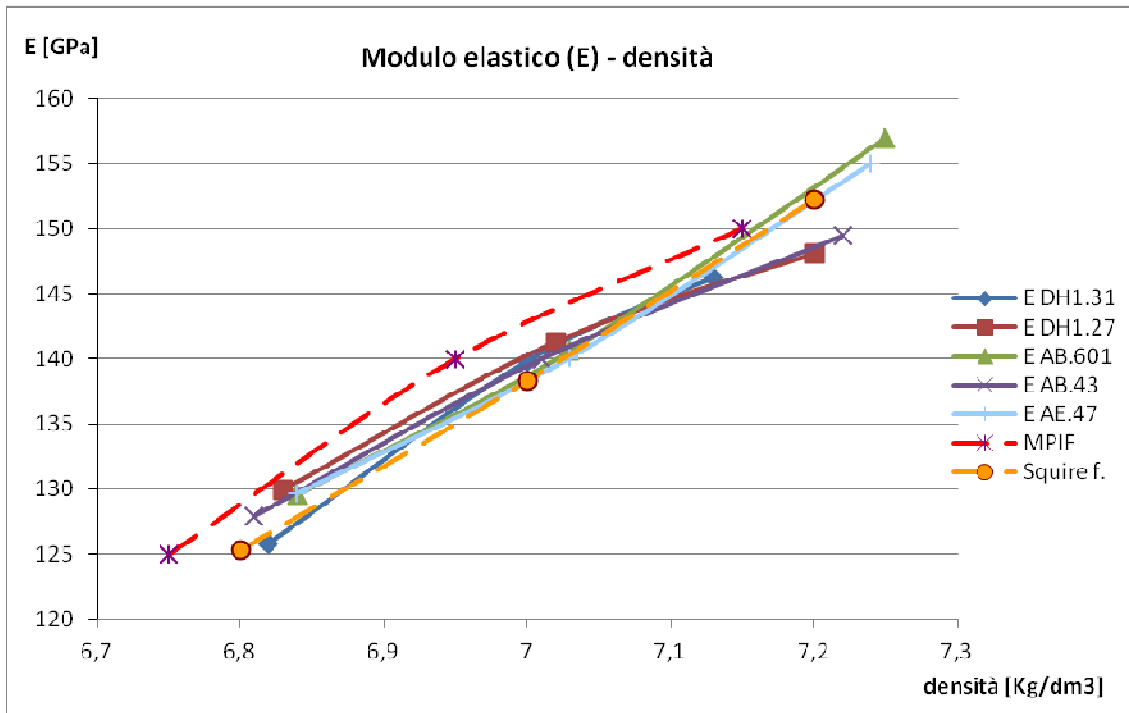
Tale lega è senz’altro la più adatta per spingersi a densità molto elevate qualora vi fossero particolari esigenze produttive relative ad oggetti le cui performances debbano avvicinarsi al prodotto “pieno”.

7. Confronto tra le diverse polveri: tendenza grafica dei risultati

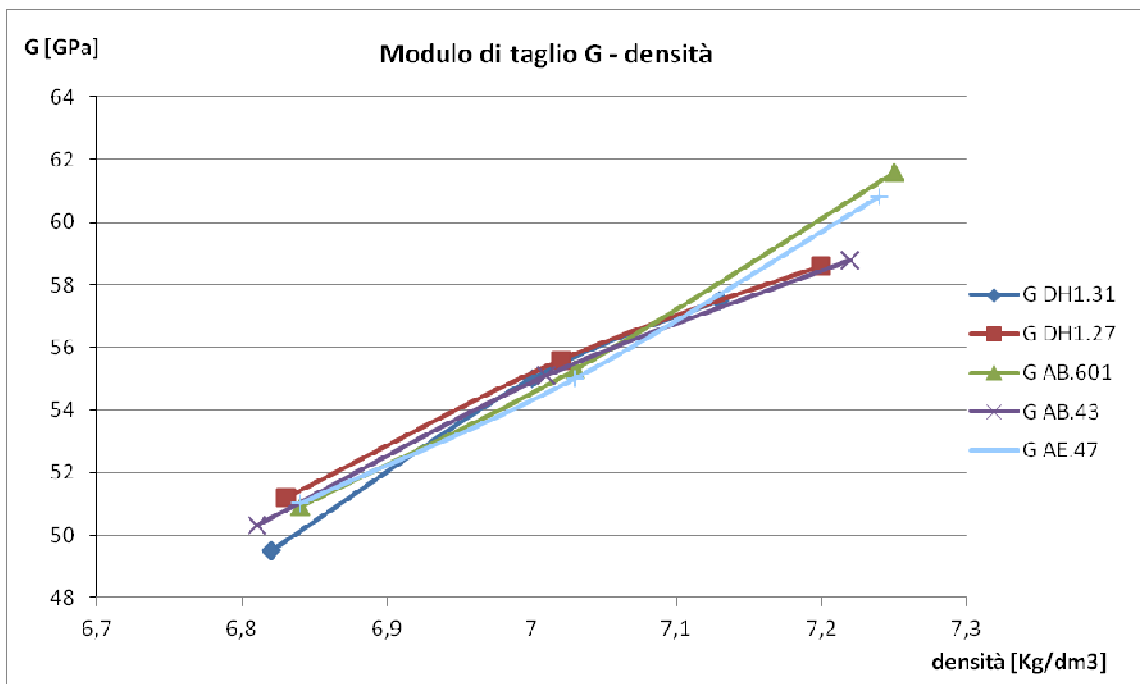
Viene posta ora l’attenzione sul confronto diretto tra i vari materiali sinterizzati: come affermato nel paragrafo precedente, le polveri analizzate dopo sinterizzazione assumono un comportamento relativamente più omogeneo, cosicché è possibile ora, a differenza dei provini a verde, tentare di trarre una tendenza alla totalità dei dati raccolti. Di seguito i grafici delle velocità di propagazione delle onde ultrasonore (sia VL che Vs) all’interno dei materiali analizzati.

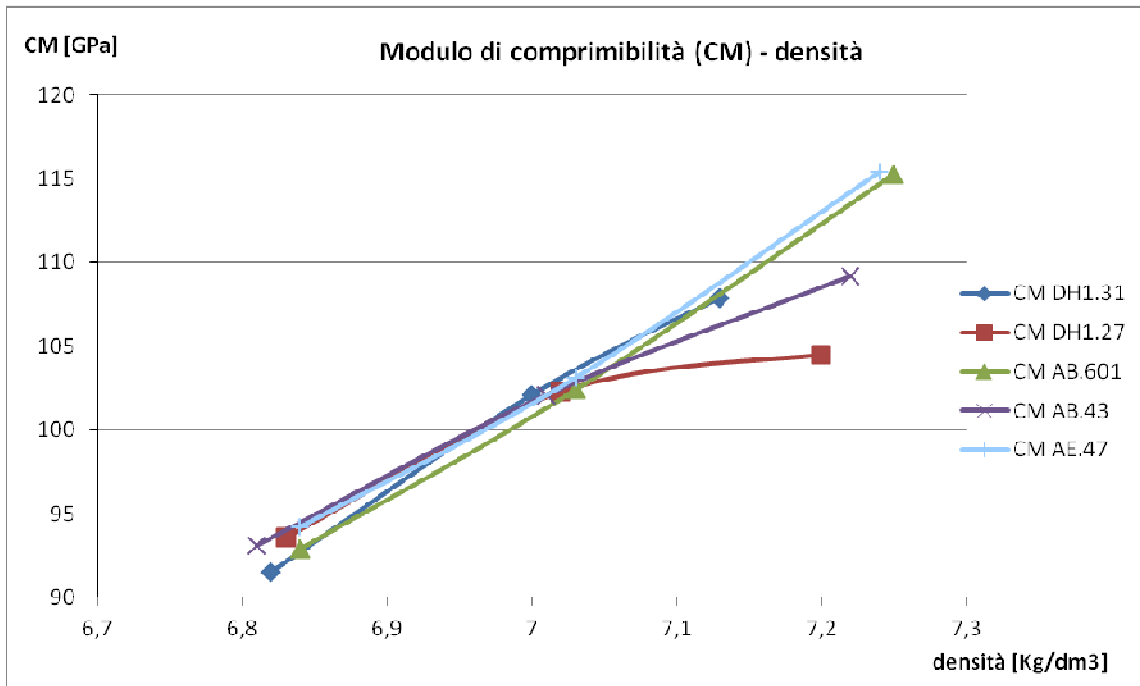


Nel seguente grafico invece il valore del modulo di Young ottenuto mediante l'uso della tecnica ad ultrasuoni viene confrontato coi valori tabulati secondo la normativa MPIF e secondo la "Suire's formula", ovvero una formula empirica basata sui risultati di Squire, che mette in relazione il modulo di Young alla densità di un sinterizzato come di seguito: $E = E_0 * \rho^{(3,4)}$ (ove E_0 è il modulo di Young del pieno e ρ è la densità relativa).



Di seguiti i grafici analoghi per i valori del modulo di taglio (G) ed il modulo di comprimibilità (CM):



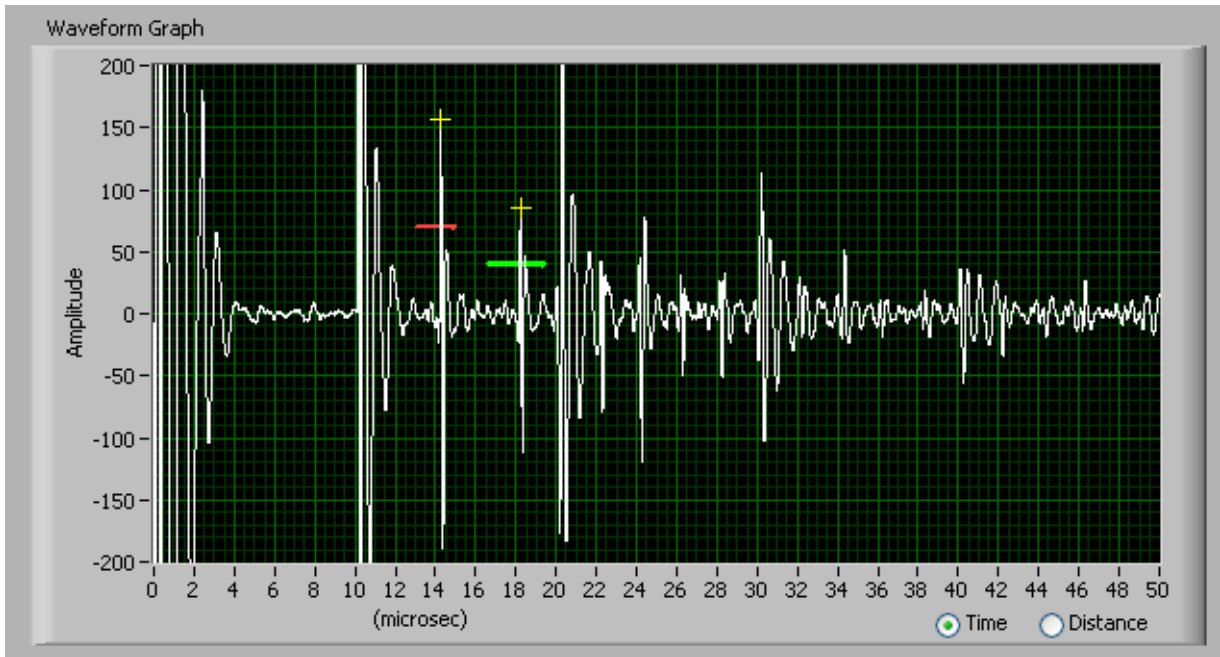


Come si può notare vi è una tendenza comune a tutti grafici, con un comportamento sostanzialmente uniforme per tutte le polveri fino alla densità di 7 Kg/dm³, oltre emerge una divergenza della polvere AB.601 e della polvere AE.47: il comportamento è dovuto alla maggiore comprimibilità di queste polveri, come si è potuto peraltro già constatare nelle prove a verde (queste due polveri difatti sono state le uniche che presentavano delle rilevazioni “visibili” con la densità maggiore).

Tale comportamento è imputabile a due fattori principali: la bassa percentuale di grafite nella lega (0,2%), ed il fatto che entrambe siano polveri costituite da una base relativamente tenera (ASC100.29 –ferro atomizzato-) con gli elementi di lega diffusi sulla superficie di ogni grano. Al contrario, le due polveri a base Distaloy DH (DH.27 e DH.31) presentano una struttura più dura, sono difatti prodotte con diffusione di rame su una lega ferro-molibdeno (molibdeno all’ 1,5%). Tale polvere presenta per questo motivo una comprimibilità minore.

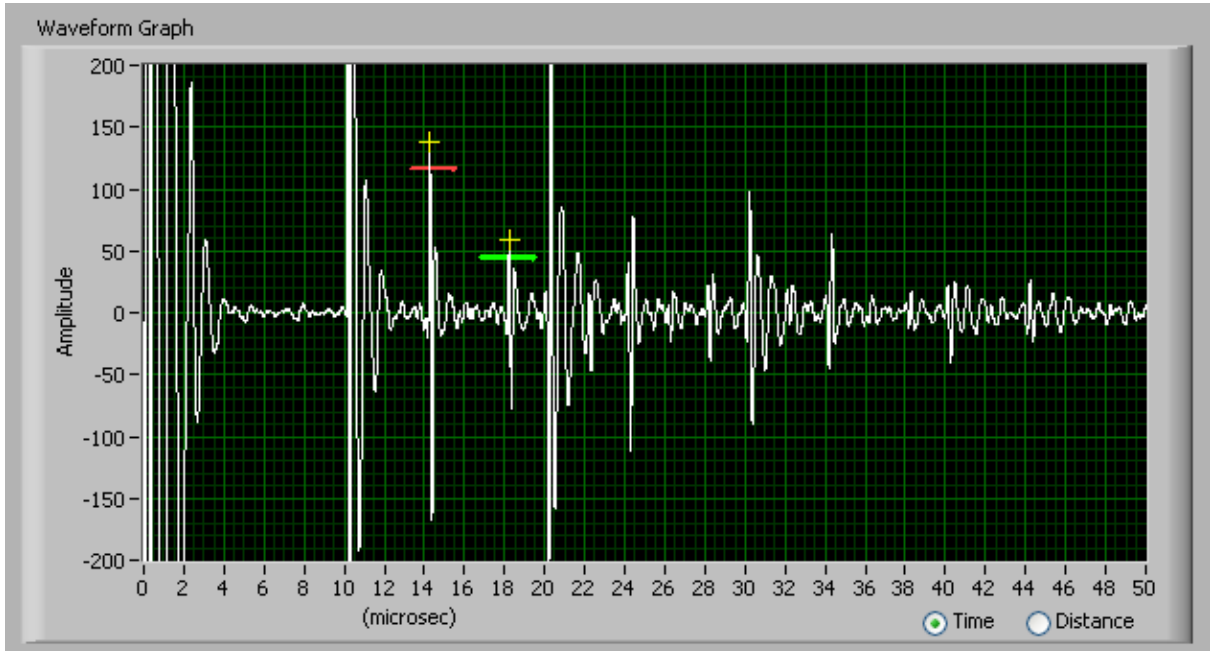
Si nota inoltre nel primo grafico (VL-densità), che per la polvere DH1.27 al terzo step di densità non emergono sostanziali differenze per quanto riguarda la VL rispetto alla densità intermedia di analisi; viene ripreso quindi il fattore di corretta compattazione ed assenza di discontinuità: andando ad indagare al di là del valore velocistico, è interessante notare anche il grado d’attenuazione del segnale di eco. Qui sotto viene confrontata la rilevazione ad ultrasuoni (con sonda VL), prima sottoponendo ad esame il provino “DH1.27” a 7,2Kg/dm³ e successivamente l’analogo ma composto da polvere DH1.31, (la più vicina come composizione chimica): la maggiore attenuazione del segnale di eco (secondo picco, individuato dal cursore in verde) da parte della DH1.27 è ben visibile, e di grande effetto se si considera anche il fatto che la DH1.27 ha raggiunto una densità superiore, e quindi ci si aspettava in teoria un’attenuazione minore!

Rilevazione mediante sonda ad onde longitudinali su provini DH1 06.65.31, densità 7,13 Kg/dm³, sinterizzati:



Rilevazione ad ultrasuoni su provino sinterizzato, polvere 65.15.31, DH1 + 0,7%C a 7,13Kg/dm³

Rilevazione mediante sonda ad onde longitudinali su provini DH1 06.65.27, densità 7,2 Kg/dm³, sinterizzati:



Rilevazione ad ultrasuoni su provino sinterizzato, polvere 65.15.27, DH1 + 0,1%C a 7,2Kg/dm³

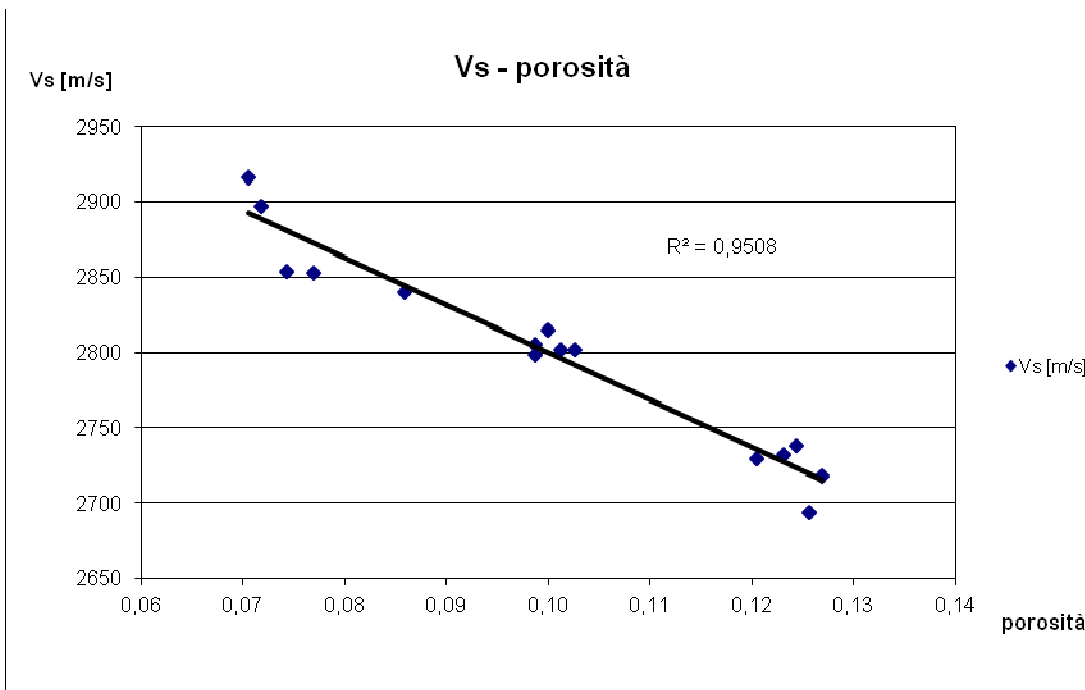
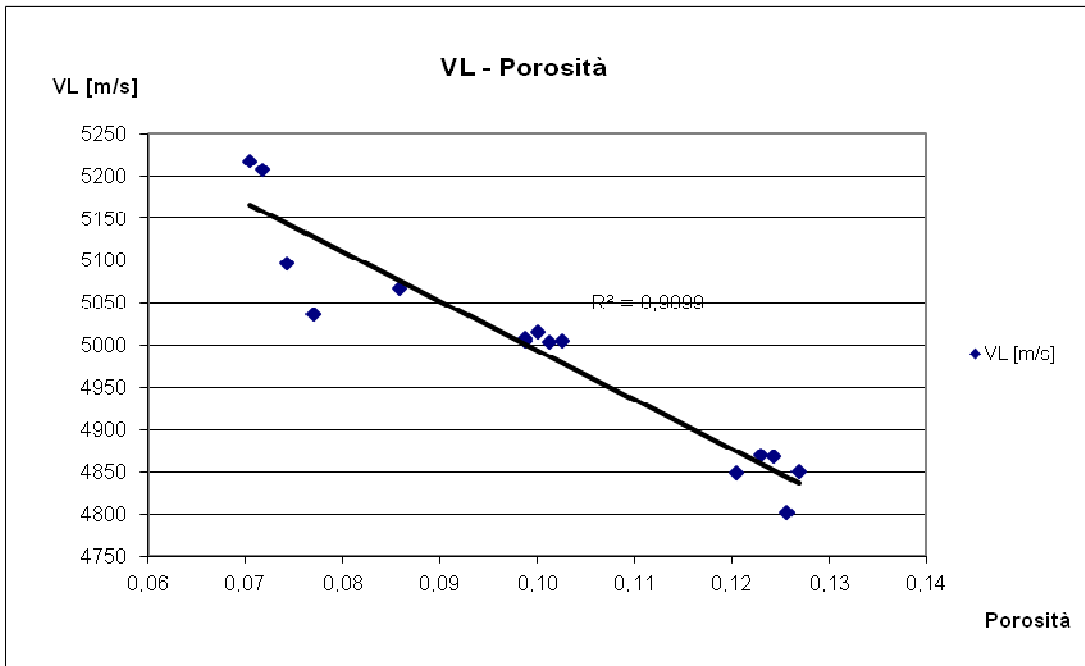
E' stata eseguita una metallografia della polvere DH1.27, per cercare di individuare eventuali discontinuità interne a spiegazione di una (come visto nei risultati e nei diagrammi) maggiore attenuazione degli ultrasuoni di tali provini. Come si può notare

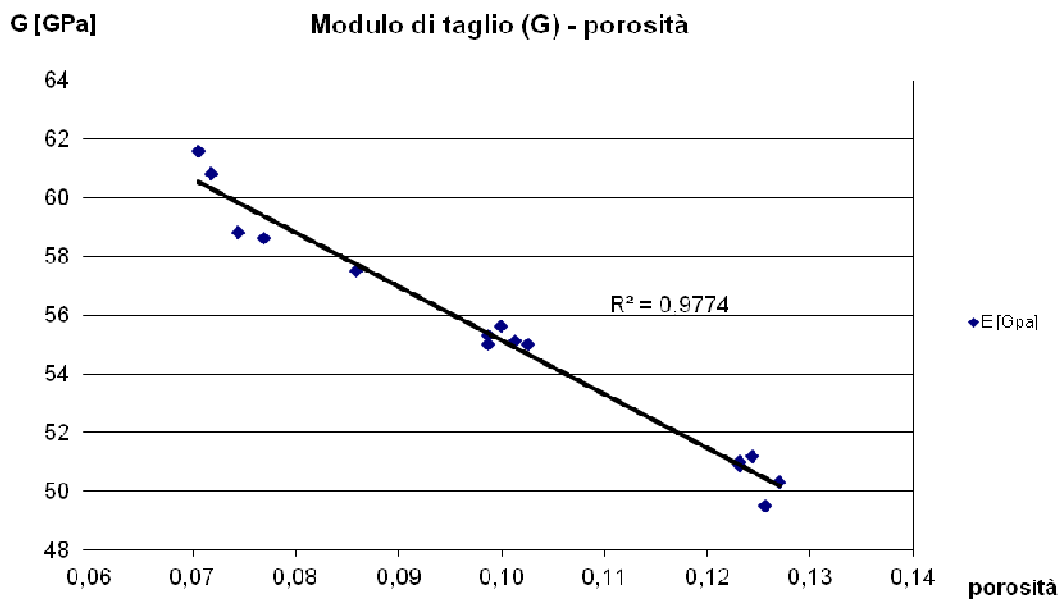
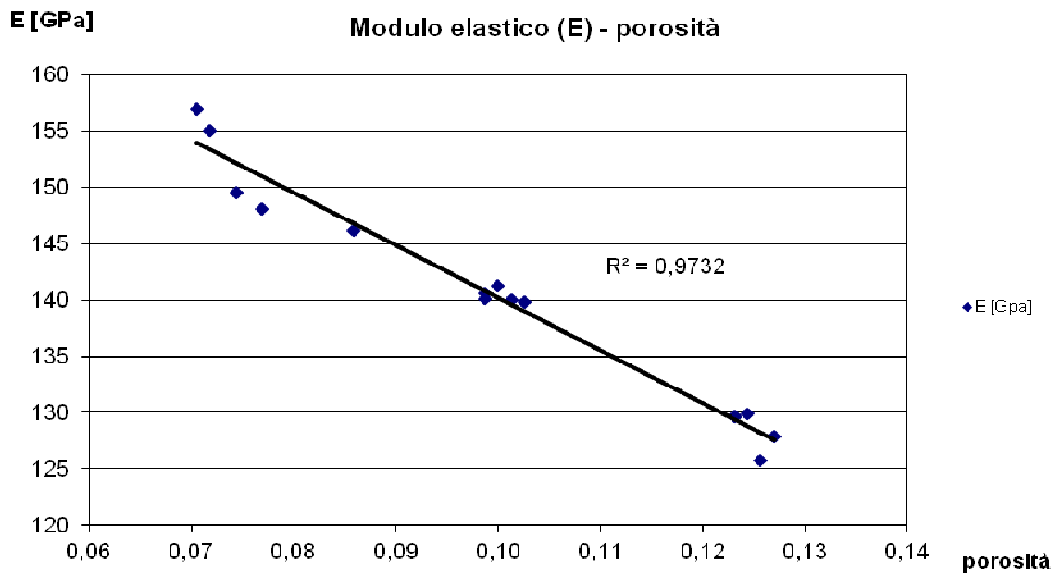
di seguito la struttura del materiale è molto buona ed omogenea, senza visibili difetti o irregolarità. I difetti a verde sono stati quindi “corretti” in forno secondo la precedente considerazione: a verde avevano una dimensione simile allo spazio interstiziale tra i grani di polvere.

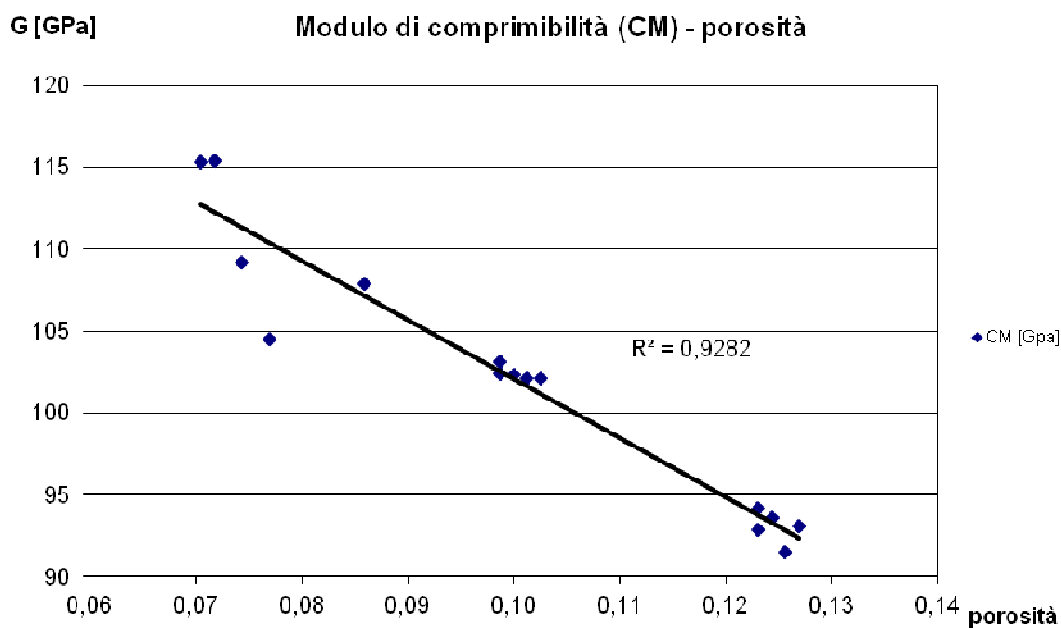


Metallografia 50 X polvere 65.15.27, DHI + 0,1%C

Si prova ora a porre i parametri fisici individuati mediante ultrasuoni in relazione alla porosità, cercando una tendenza comune.







Si nota che tra le varie polveri i dati sono molto vicini per le due densità minori (porosità più elevate in questi grafici), mentre i valori divergono per il gruppo di valori a densità più elevata. Per la spiegazione si rimanda agli analoghi tre grafici (pag. 59-60) ove sono stati presentati i dati mantenendo distinti i valori per ciascuna polvere.

8. Conclusioni

L'uso della tecnica ad ultrasuoni per indagare le proprietà meccaniche dei sinterizzati ha avuto esito positivo: sui prodotti finiti i picchi della risposta ultrasonora sono ben distinguibili, la propagazione delle onde si è dimostrata molto buona. Ciò ha consentito di valutare con ripetibilità alcune caratteristiche meccaniche quali il modulo di Young, il modulo di comprimibilità, di taglio ed il coefficiente di poisson grazie alle leggi dell'acustica che legano questi parametri alle velocità di propagazione delle onde ultrasonore nei materiali. Il confronto con i dati di letteratura è risultato molto buono.

A verde invece la propagazione degli ultrasuoni è risultata alquanto più difficoltosa; ciò può essere imputabile alla presenza del lubrificante ed alla naturale discontinuità dei grani non ancora sinterizzati. La differente natura delle polveri analizzate ha inoltre cospicui effetti sui valori rilevati, inficiando quindi la possibilità di ricavare una legge "universale" del calcolo della densità a partire dai parametri legati alla propagazione delle onde ultrasonore.

Per ciascuna polvere è possibile però ricavare con immediatezza la densità a verde da una semplice misurazione ad ultrasuoni (sia essa VL che Vs); Tale risultato trova un importante sbocco applicativo nella realtà produttiva.

9. Sviluppi futuri

Lo sviluppo futuro primario è sicuramente quello di allargare il campo delle misurazioni/test su altri materiali: come ben noto le tipologie di polvere oggi in uso nelle aziende di sinterizzazione sono innumerevoli, se si considera anche il fatto che a volte vengono create miscele ad hoc per particolari produzioni.

Una corrispondenza epistolare durante il periodo di test e stesura del presente elaborato ha dato modo di sviluppare nuove idee sulla possibilità di altri studi del sinterizzato mediante indagine ultrasonora.

Trattasi di un contatto con il prof. “Christopher Shilling” , della “Saginaw Valley State University” , Michigan, che si è visto impegnato in prove ad ultrasuoni su acciai sinterizzati proprio in contemporanea con i tempi dell’autore del presente elaborato.

La sua idea è stata quella di misurare mediante ultrasuoni il grado di sinterizzazione di diverse leghe ferro-rame (le più comuni ed economiche leghe per sinterizzazione).

Se (come peraltro visto nei risultati di questo lavoro) la velocità di propagazione varia fortemente dal verde al sinterizzato (per i diversi motivi sopra descritti..) effettuando misurazioni intermedie, ovvero a diversi intervalli di tempo di permanenza in forno del pressato, è possibile monitorare l’evoluzione della sinterizzazione secondo diversi parametri, primo tra tutti la temperatura del forno.

Tale studio ha permesso ancora una volta di affiancare al metodo classico un’ indagine alternativa ed innovativa sfruttando di nuovo test ad ultrasuoni.

Il suggerimento e proposito futuro è quindi di procedere ad un’ analisi analoga sui materiali analizzati in questo scritto ed eventualmente estenderlo ad altri.

10. Bibliografia

- [1] Hoganas – IRON AND STEEL POWDERS FOR SINTERED COMPONENTS, Hoganas AB, 2002.

- [2] Panametrics-NDT – CONTROLLO NON DISTRUTTIVO AD ULTRASUONI, TEORA ED APPARECCHIATURE [pdf].

- [3] J.P. Panakkal, H. Willems, W. Arnold – NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF ELASTIC PARAMETERS OF SINTERED IRON POWDER COMPACTS. Journal of materials science 25, 1990, pp 1397-1402.

- [4] Dino N. Boccaccini, Aldo R. Boccaccini, – DEPENDENCE OF ULTRASONIC VELOCITY ON POROSITY AND PORE SHAPE IN SINTERED MATERIALS. Journal of nondestructive evaluation, Vol. 16, n° 4, 1997 Plenum publishing corporation. pp. 187-192.

- [5] K.K. Phani, Dipayan Sanyal – PREDICTION OF ELASTIC BEHAVIOR OF SINTERED METAL POWDER FROM THE ULTRASONIC VELOCITIES OF GREEN COMPACTS. The minerals, metals & materials society, volume 39A, aprile 2008, pp. 790-798.

- [6] Andrew Lerossignol Dawson, Jean Francois Bussière – ULTRASONIC CHARACTERIZATION OF IRON POWDER METALLURGY COMACTS DURING AND AFTER COMPACTATION. Advanced performance materials 5, Kluwer academic publishers. 1998, pp 97-115.

- [7] A. Squire – OFFICE OF TECHNICAL SERV. US. Dep Com, Washington,1944; Rep. PB 4073, pp 4417, s.Powder Metallurgy, Brooklin, 1947

- [8] W. D. Jones: “FUNDAMENTAL PRINCIPLES OF POWDER METALLURGY Edward Arnolds (Publishers), Ltd. London, 1960

- [9] ASM, POWDER METALLURGY, METALS HANDBOOK NINTH EDITION, Vol.7, 1984;

[10] MPIF, STANDARD 35, MATERIALS STANDARD FOR P/M STRUCTURAL PARTS, 2000 Edition