

APPLICAZIONE DELLA VIBROMETRIA LASER AL CONTROLLO DI QUALITÀ SU FRUTTI

C. Santulli, G. Jeronimidis
Centre for Biomimetics, University of Reading¹, Regno Unito

SOMMARIO

La vibrometria Laser, basata sull'effetto Doppler, consente di rilevare spostamenti d'ordine inferiore al nanometro. Questo la rende un metodo non distruttivo versatile per un gran numero d'applicazioni su ogni tipo di materiale, in particolare per il controllo del danneggiamento e dell'effetto delle alterazioni strutturali.

La presente memoria tratta un'applicazione della vibrometria Laser come tecnica non distruttiva, esaminando alcuni casi di valutazione delle condizioni di danneggiamento o di controllo di qualità di diversi tipi di frutti (mele, avocado, mango).

I risultati ottenuti indicano che una variazione della frequenza di risonanza a parità di massa, un maggiore smorzamento od uno sfasamento della vibrazione possono essere associati con la presenza di danneggiamento nel frutto. Va osservato tuttavia che il rapporto tra l'ampiezza del segnale ed il rumore di fondo può dipendere dal metodo d'eccitazione delle vibrazioni prescelto, dalla rugosità superficiale del frutto e dalla sua geometria. Lo sviluppo di questo lavoro prevede la possibile implementazione della tecnica direttamente sulla catena di distribuzione.

INTRODUZIONE

Le applicazioni della vibrometria Laser più diffuse negli ultimi anni sono nel campo automobilistico (dinamica delle vibrazioni 3D, controllo dei rumori dei freni a disco) [1], aerospaziale (caratterizzazione delle difettosità su parti strutturali di aeromobili in materiale composito [2], analisi di micromotori per satelliti [3]) e della sensoristica avanzata (calibrazione di sensori piezoelettrici [4]). Nella ricerca sulle PnD, questa tecnica è stata utilizzata in un ambito molto più vasto, fino a comprendere studi sul restauro d'opere pittoriche, dove la vibrometria è stata in grado di individuare i distacchi del dipinto dal supporto [5], analogamente a quanto è stato possibile sui materiali compositi per il rilevamento delle delaminazioni [6].

L'aspetto più interessante della vibrometria Laser è l'alta risoluzione spaziale del metodo, che consente di misurare la risposta in vibrazione e quindi di valutare le proprietà meccaniche anche di materiali fortemente smorzati, come compositi strutturali e materiali naturali (per esempio legno, tessuti vegetali). Un approccio alla vibrometria come metodo di controllo non distruttivo richiede l'individuazione di un comportamento di vibrazione "tipico" della struttura considerata, e la valutazione dell'effetto di modifiche alla struttura sulla risposta vibrazionale.

Nel caso specifico del controllo di qualità sulla frutta, una ridotta fermezza e consistenza possono essere il risultato o della presenza di danneggiamento, sia visibile che invisibile, oppure di eccessiva maturazione del frutto.

¹ Whiteknights – Reading RG6 6AY (United Kingdom)

E-mail: c.santulli@rdg.ac.uk

Tel.: 0044-118-3788564 Fax: 0044-118-9313327

I metodi tradizionali per il controllo della fermezza richiedono un'ispezione visiva o manuale, oppure l'uso di tecniche distruttive, misurando la resistenza del frutto alla penetrazione da parte di un punzone.

Queste tecniche tuttavia, oltre che non garantire l'ispezione che di una ridotta percentuale dei frutti, si sono rivelate: più recentemente vengono applicati complessi metodi d'ispezione basati su un'analisi di molti parametri, per esempio l'indice di rifrazione, il colore e l'acidità, oltre che dati penetrometrici [7].

Nel caso particolare di frutti esotici con nocciolo (manghi, avocado), questo problema è ancora più sentito, perché il grado di maturazione può essere estremamente variabile in una stessa partita di frutti ed inoltre i frutti presentano un alto valore aggiunto sia in quanto tali sia per preparazioni alimentari.

Le difficoltà succitate consigliano l'applicazione di un metodo di controllo non distruttivo per monitorare le variazioni, piuttosto che misurare i valori assoluti delle frequenze di risonanza e dei rapporti di smorzamento. Infatti le variazioni forniscono un'indicazione della degradazione delle proprietà del frutto, dovuta ad eccessiva maturazione od a danneggiamento.

Negli ultimi anni, un gran numero di metodi non distruttivi per la valutazione della fermezza e consistenza nei frutti sono stati proposti: ultrasuoni [8], risonanza magnetica nucleare [9], spettroscopia Laser [10] e fotoluminescenza [11]. Recenti studi con uso del Laser vibrometro su frutta includono misurazioni della fermezza su alcune varietà di mele [12], kiwi [13] e diospiro [14].

Tuttavia, uno studio sulla misurazione della fermezza su differenti frutti, volto a stabilire i principi per una possibile implementazione industriale del metodo durante la movimentazione automatica della frutta, non è stato finora tentato. L'approccio preliminare suggerito comprende la misurazione in laboratorio della fermezza, per la raccolta di un'estesa base di dati con frutti di diverse varietà e condizioni, per chiarire qual è la possibile accuratezza di misure effettuate con l'impiego della tecnica vibrometrica.

PRINCIPI DELLA VIBROMETRIA LASER

La vibrometria Laser, basata sul principio dell'interferometria ottica, misura la componente della velocità di un punto illuminato da un raggio Laser lungo l'asse del raggio, attraverso la variazione di frequenza, dovuta all'effetto Doppler, che il raggio di misura subisce incidendo sulla superficie. La variazione di frequenza subita dalla vibrazione riflessa è pari a $2v/\lambda$, dove λ è la lunghezza dell'onda luminosa del Laser.

E' in grado di rilevare senza contatto vibrazioni fino circa a 30 MHz con risposta di fase quasi-lineare ed accuratezza spaziale nell'ordine del nanometro, dipendente dal diametro del raggio Laser.

La misura diretta dello spostamento è ugualmente possibile, grazie al conteggio delle frange interferometriche sul rilevatore con adatte tecniche d'interpolazione. La possibile demodulazione digitale della luce porta la risoluzione del vibrometro a livelli di circa $2 \cdot 10^{-12}$.

Oltre al vibrometro a punto singolo, per misurazioni *out-of-plane*, sono più recentemente disponibili vibrometri a scansione muniti di motore passo-passo.

ATTIVITÀ DI VIBROMETRIA LASER A READING

Le attività di vibrometria Laser a Reading hanno riguardato un notevole numero di progetti negli ultimi anni in diversi settori, in particolare su materiali fortemente

smorzati (compositi e materiali naturali) nel campo strutturale e biomedico.

Alcuni esempi di problemi studiati con l'impiego della vibrometria Laser includono i seguenti:

- Misurazione della variazione del fattore di smorzamento di diversi tipi di legno di pino per effetto della diversa orientazione delle fibre [15]
- Studio su proprietà vibrazionali di molle in composito per assali ferroviari (rilevazione dei modi naturali di risonanza per diverse configurazioni di progetto)
- Investigazione delle proprietà vibrazionali (modi naturali di risonanza) di diversi modelli di struttura architettonica (strutture di Kagome) per impieghi richiedenti buone prestazioni meccaniche ed acustiche (sala da concerti)
- Studio dell'orecchio medio, in collaborazione con St. Thomas Hospital– London (valutazione del posizionamento ottimale di protesi uditive [16] e monitoraggio del trauma causato sull'orecchio dal rumore del trapano chirurgico)

SPERIMENTAZIONE

La sperimentazione si propone di valutare la possibilità di utilizzare la vibrometria Laser per la misurazione della fermezza e consistenza dei frutti, attraverso la rilevazione delle variazioni delle frequenze ed ampiezze di risonanza e dello smorzamento. Tale valutazione è pensata per svolgersi in ambiente industriale, quindi con i frutti trasportati e supportati dal basso, senza nessuna forma di trattamento della superficie (Figura 1).

L'obiettivo sarebbe di raggiungere in prima istanza una discriminazione del tipo “go-no go”. Questo implica che la risposta del vibrometro deve essere abbastanza diversa tra frutti “accettabili” e “difettosi ” da poter separare gli uni dagli altri con una certa accuratezza ed in un tempo ridotto, per esempio scansionando ogni frutto solo in un ridotto numero di punti.

Due casi sono stati considerati:

- Discriminazione tra frutti con diversa fermezza (duro/morbido)
- Discriminazione tra frutti danneggiati e non

Per mettere in vibrazione i frutti, occorreva selezionare un metodo di eccitazione che non fosse solo ripetibile, ma consentisse di ottenere un sufficiente intervallo ed ampiezza di vibrazione, senza produrre alcun tipo di danneggiamento nei frutti. È stato usato un vibratore elettro-magnetico Ling Ltd. LDS V101 con membrana, la cui armatura aveva una frequenza di risonanza di 12000 Hz. Questo veniva eccitato con un segnale sinusoidale prodotto da un generatore di funzioni Farnell F0833 con un'ampiezza di 20 V da picco a picco.

Due vibrometri Laser, prodotti da Polytec, sono stati usati durante questo studio, entrambi con un fascio Laser del diametro di 100 μm :

- Vibrometro Laser puntuale CLV 1000
- Vibrometro Laser a scansione PSV-300

CASI STUDIATI E RISULTATI

La ricerca qui si concentra su quattro casi, due relativi ad una diversa fermezza dei frutti (casi n.1 e n.2) e due relativi al rilevamento del danneggiamento (casi n.3 e n.4).

Caso 1: Confronto tra mele di primo e di ultimo raccolto (mele Royal Gala)

E' un fatto normalmente riconosciuto che le mele colte prematuramente (pre-climateriche) hanno una migliore fermezza e consistenza rispetto a quelle lasciate maturare ulteriormente [17]. In questo caso, sono stati considerati dei casi estremi, confrontando lo smorzamento di mele colte durante la prima settimana e durante la terza, ed ultima, settimana del raccolto. Per minimizzare l'effetto della massa sulla vibrazione, sono stati testati frutti del peso di 102 (± 3) g. L'ampiezza del segnale ottenuto dalle mele raccolte tardivamente si è rivelata ben più smorzata che in quelle raccolte prematuramente, in tutto l'intervallo di frequenze considerato: la differenza minima rilevata è stata nell'ordine dei 3 dB, fornendo una sufficiente prova di discriminazione (Fig. 2).

Caso 2: Valutazione della fermezza (mango Rosa)

Da un gruppo di 20 frutti della stessa partita sono stati individuati dall'osservazione del colore e dall'ispezione manuale tre esemplari classificati di alta fermezza (hardest H), di scarsa fermezza (soft S) e di fermezza intermedia (medium M). A causa delle più grandi dimensioni dei manghi e delle variazioni di frequenza di risonanza da punto a punto del frutto, si è scelto di misurare la risposta alla vibrazione in un'unica frequenza, intorno a 550 Hz, in 100 punti sul frutto, disposti in una maglia quadrata di 10x10. L'ampiezza del segnale (velocità di vibrazione) è, come mostrato in Fig. 3, considerevolmente maggiore per il frutto di fermezza maggiore.

Caso 3: Rilevazione di danneggiamento visibile (mela Royal Gala)

Il frutto presentava un difetto superficiale (rottura della pelle), lungo circa 10 mm. Il monitoraggio della risposta in frequenza in 12 punti allineati lungo la regione danneggiata, una variazione di fase è stata osservata in corrispondenza dell'estensione del danneggiamento, come osservabile in Fig. 4. Questo indica che è possibile la caratterizzazione del danneggiamento attraverso una scansione di un numero limitato di punti sulla superficie del frutto.

Caso 4: Rilevazione di danneggiamento interno (Avocado Hass)

Un'area del diametro di 8 mm (1.5% della superficie totale del frutto) è stata compressa fino ad uno spostamento totale di 0.2 mm, senza nessun danneggiamento apparente. Facendo vibrare il frutto in un intervallo di frequenza tra 0 e 1000 Hz, l'area danneggiata ha mostrato un segnale con minori picchi di risonanza, specialmente intorno ai 150 Hz e sopra i 500 Hz (Fig. 5). Questo appare comunque un risultato promettente, in quanto la superficie dell'avocado Hass, per la rugosità della sua pelle, non si è rivelata particolarmente adatta a riflettere la luce del Laser.

CONCLUSIONI

Questo studio si proponeva di valutare le possibilità della vibrometria Laser nella valutazione della qualità della frutta. I casi proposti rappresentano uno spettro di possibili situazioni (diversa maturazione, danneggiamento interno e visibile) in cui il vibrometro Laser risulta capace di produrre delle valutazioni qualitative in accordo con quanto un'ispezione visiva rivelerebbe. In particolare, sembrano promettenti per un controllo non distruttivo lo studio dello smorzamento e degli sfasamenti nel segnale rilevato dal vibrometro. Il passo successivo, una volta completata la raccolta di una sufficiente base di dati su diverse varietà di frutti in differenti condizioni di

maturazione e d'integrità, è quello di passare all'implementazione del sistema in ambiente industriale. Questo richiederà la soluzione di vari problemi, tra cui il modo d'eccitazione dei frutti, e l'accuratezza e la rapidità del sistema di monitoraggio in linea.

BIBLIOGRAFIA

1. Cunefare KA, Graf AJ, Experimental active control of automotive disc brake rotor squeal using dither, *Journal of Sound and Vibration* **250**, 2002, pp. 579-590.
2. Vanlanduit S, Guillaume P, Schoukens J, Parloo E, Linear and nonlinear damage detection using a scanning laser vibrometer, *Shock and Vibration* **9**, 2002, pp. 43-56.
3. Chu XC, Xing ZP, Gong W, Li LT, Gui ZL, Vibration analysis of stepping piezoelectric micro-motor using wiggle mode, *Materials Science And Engineering B-Solid State Materials for Advanced Technology* **99**, 2003, pp. 306-308.
4. Polcawich RG, Scanlon M, Pulskamp J, Clarkson J, Conrad J, Washington D, Piekarcz R, Trolrier-McKinstry S, Dubey M, Design and fabrication of a lead zirconate titanate (PZT) thin film acoustic sensor, *Integrated Ferroelectrics* **54**, 2003, pp. 595-606.
5. Castellini P, Esposito E, Paone N, Tomasini EP, Non-invasive measurements of damage of frescoes paintings and icon by laser scanning vibrometer: experimental results on artificial samples and real works of art, *Measurement* **28**, 2000, pp. 33-45.
6. Ghoshal A, Chattopadhyay A, Schulz MJ, Thornburgh R, Waldron K, Experimental investigation of damage detection in composite material structures using a laser vibrometer and piezoelectric actuators, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **14**, 2003, pp. 521-537.
7. Batu A, Determination of acceptable firmness and colour values of tomatoes, *Journal of Food Engineering* **61**, pp. 471-475.
8. Mizrach A, Determination of avocado and mango fruit properties by ultrasonic technique, *Ultrasonics* **38**, 2000, pp. 717-722.
9. Letal J, Jirak D, Suderlova L, Hajek M, MRI 'texture' analysis of MR images of apples during ripening and storage, *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie* **36**, 2003, pp. 719-727.
10. Valero C, Ruiz-Altisent M, Cubeddu R, Pifferi A, Taroni P, Torricelli A, Valentini G, Johnson D, Dover C, Selection models for the internal quality of fruit, based on time domain laser reflectance spectroscopy, *Biosystems Engineering* **88**, 2004, pp. 313-323.
11. Kharlamov AA, Burrows H, Visualization of fruit odor by photoluminescence, *Applied Biochemistry and Microbiology* **37**, 2001, 206-214.
12. Motomura Y, Nagao T, Sakurai N, Nondestructive and noncontact measurement of flesh firmness of 6 apple cultivars by Laser Doppler Vibrometer (LDV), *Journal of the Japanese Society of Food Science* **51**, 2004, pp. 483-490.
13. Terasaki S, Wada N, Sakurai N, Muramatsu N, Yamamoto R, Nevins DJ, Nondestructive measurement of kiwifruit ripeness using a laser Doppler vibrometer, *Transactions of the ASAE* **44**, 2001, pp. 81-87.
14. Sakurai N, Iwatani S, Terasaki S, Yamamoto R, Evaluation of 'Fuyu' persimmon texture by a new parameter, "Sharpness index", *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science* **74**, 2005, pp. 150-158.

15. Coutand C, Jeronimidis G, Chanson B, Loup C, Comparison of mechanical properties of tension and opposite wood in Populus, Wood Science and Technology **38**, 2004, pp. 11-24.
16. Needham AJ, Jiang D, Bibas A, Jeronimidis G, O'Connor, AF, The Effects of Mass Loading the Ossicles with a Floating Mass Transducer on Middle Ear Transfer Function, Otology & Neurotology **26**, 2005, pp. 218-224.
17. Johnston JW, Hewett EW, Hertog MLATM, Postharvest softening of apple (*Malus domestica*) fruit: a review, New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science **30**, 2002, pp. 145-160.

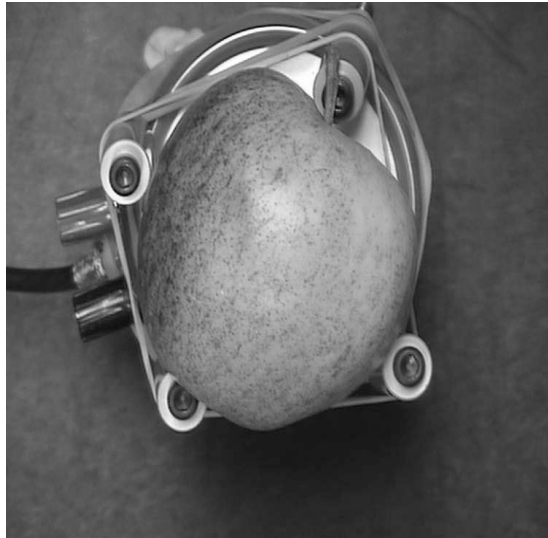


Figura 1 Posizionamento del frutto (mela Gala Royal) sul vibratore

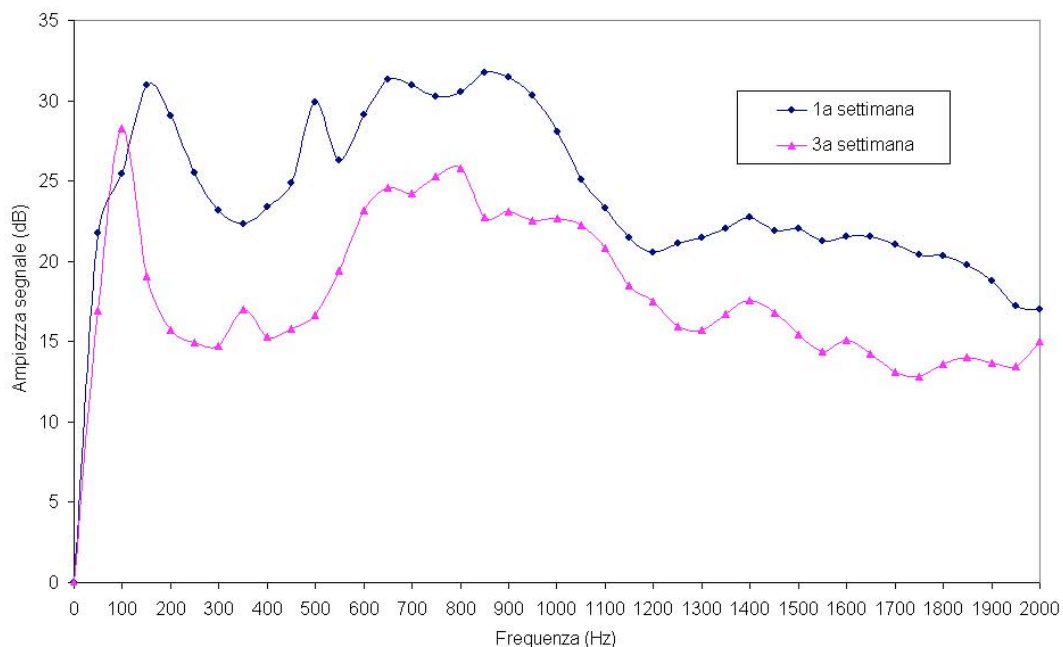


Figure 2 Curve di risonanza sonora di mele Royal Gala (caso n.1)
(media di due punti per tre frutti colti nella 1a settimana e tre colti nella 3a settimana)

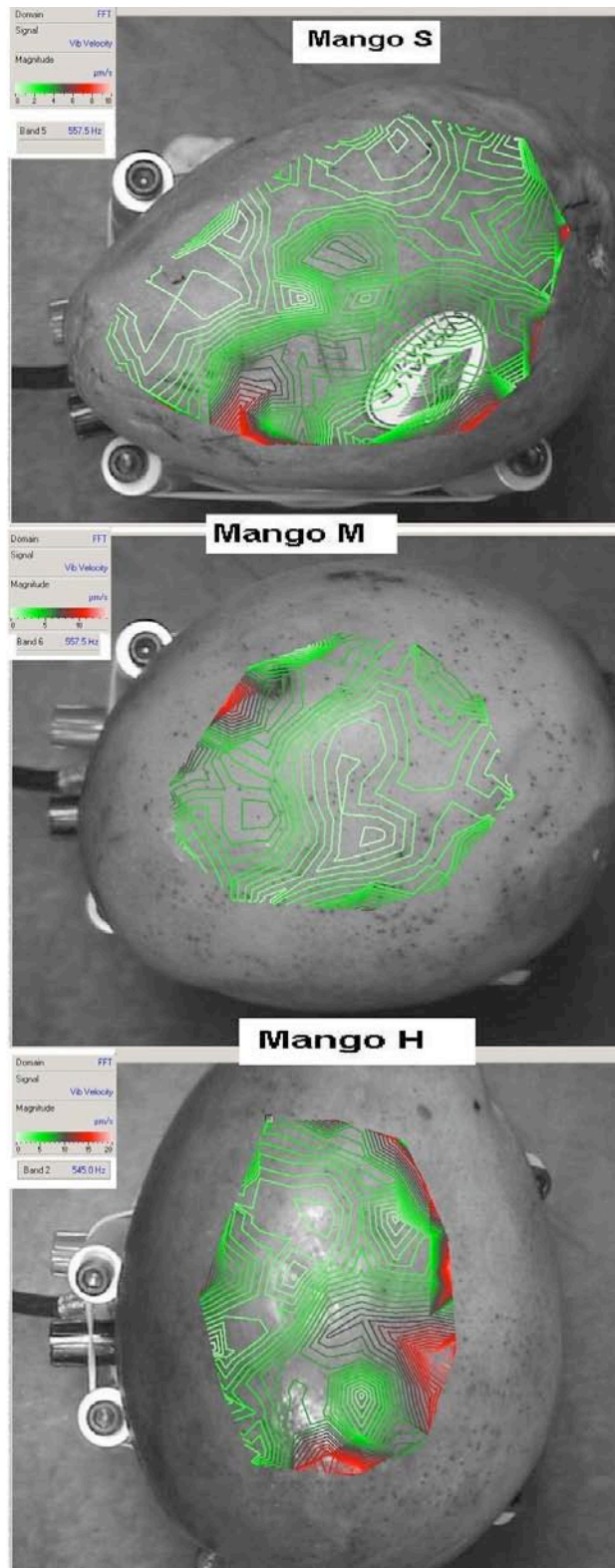


Figure 3 Ampiezza del segnale sulla superficie di manghi Rosa di diversa fermezza (caso n.2)

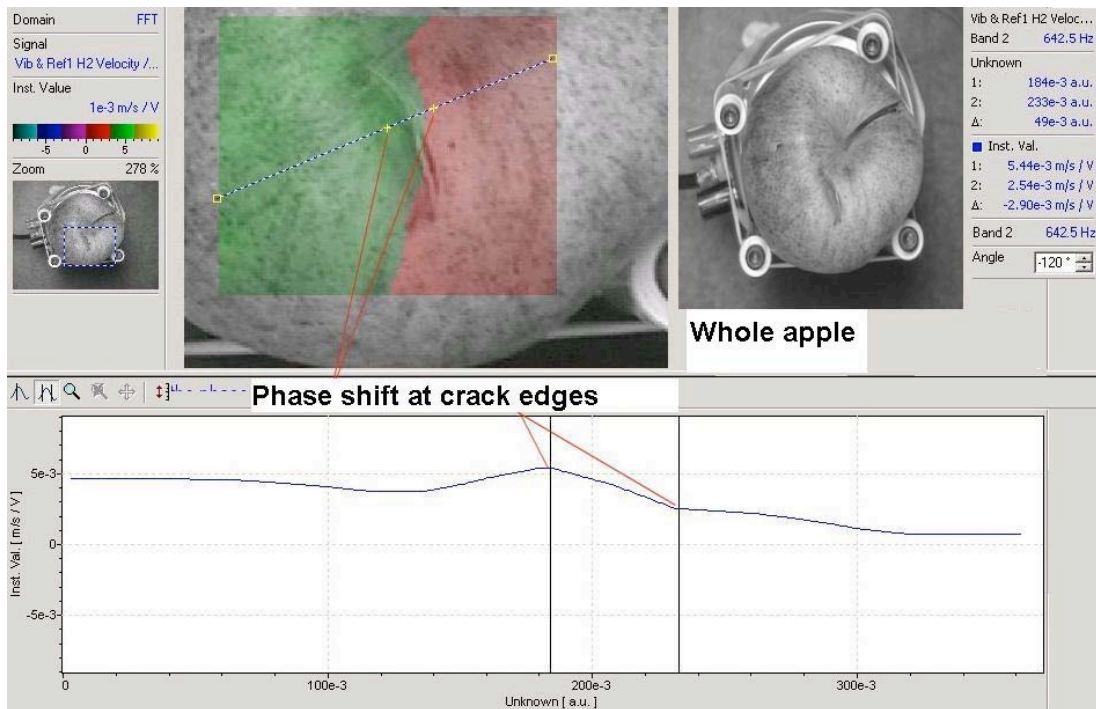


Figura 4 Osservazione di un difetto in una mela Royal Gala (caso n.3)

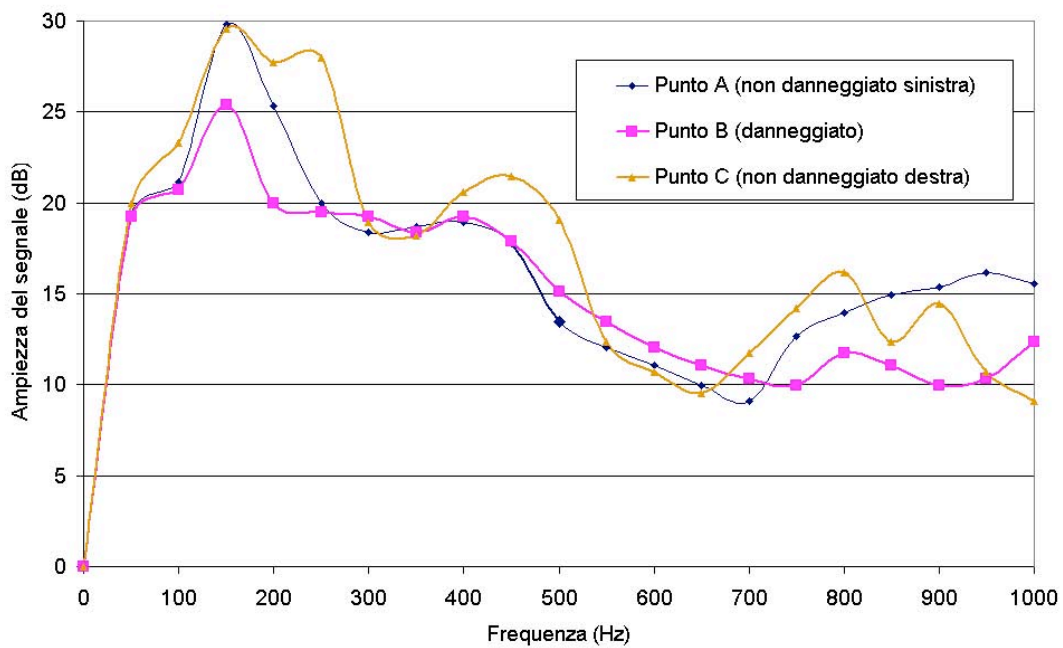


Figura 5 Studio del danneggiamento in un avocado Hass (caso n.4)