

INTRODUZIONE:

L'industria del vetro è una delle industrie più antiche per la fabbricazione di manufatti, inizialmente la lavorazione avveniva essenzialmente in modo artigianale, poi, con il passare degli anni si è assistito ad una modernizzazione del processo produttivo con conseguente aumento dell'automazione e dei volumi di produzione.

Attualmente la produzione di vetro si divide principalmente in vetro cavo e vetro piano; il presente elaborato si pone l'obiettivo di approfondire le problematiche del vetro cavo, in particolare, il problema inerente al controllo della resistenza all'impatto.

Una delle priorità principali dell'industria vetraria moderna è quella di minimizzare il numero di rotture, siano queste nella linea di produzione o direttamente nelle mani dell'utilizzatore. L'elaborato vuole analizzare la resistenza all'impatto di un vaso di vetro particolarmente sensibile a rotture sia nella fase di realizzazione che nella fase di riempimento; rotture che avvengono come conseguenza di urti tra manufatti adiacenti. Si vuole quindi studiare l'andamento della resistenza dello stesso vaso in vetro all'impatto in relazione ai giorni di produzione, approfondendo l'analisi mediante un istogramma per ogni giorno di produzione e mediante la statistica di Weibull al fine di ipotizzare delle possibili azioni correttive tese a migliorare prima il processo produttivo e quindi il prodotto finito. Tutto ciò verrà preceduto da una parte teorica in cui si cercherà di capire quali siano le principali difettosità del vetro ed il loro comportamento.

1 ZIGNAGO VETRO S.p.a.:

Il Gruppo Zignago Vetro produce contenitori in vetro cavo, destinati ai mercati delle bevande e alimenti, della cosmetica e profumeria ed anche dei vetri speciali. Opera in tutto il mondo attraverso un modello “business to business” per mezzo di tre società operative: Zignago Vetro S.p.A., Verreries Brosse S.a.s e Vetri Speciali S.p.A (partecipata al 43,50%). La produzione è affidata ad impianti industriali dislocati in Italia e in Francia.

1.1 Un po' di storia:

Le prime produzioni di contenitori di vetro risalgono agli anni Cinquanta quando, per iniziativa di Gaetano Marzotto, venne realizzato un complesso produttivo molto diversificato e ben amalgamato nella zona, per trasformare industrialmente i prodotti agricoli prodotti nella circostante campagna. La produzione di bottiglie è nata inizialmente per una necessità di confezionare i prodotti delle campagne. Da allora Zignago Vetro si è evoluta, sviluppandosi prima nei vasi per alimenti, poi nelle bottiglie per vino e per olio ed infine nei flaconi per cosmetica e profumeria.

1.2 Lo stabilimento:

La Business Unit Zignago Vetro serve selezionati segmenti del mercato delle Bevande & Alimenti con vasi e bottiglie realizzati nei suoi stabilimenti.

Molti dei contenitori sono personalizzati secondo le esigenze dei clienti. Presso lo stabilimento di Portogruaro (VE), vengono prodotti i vasetti per baby-food con elevata efficienza, unendo standard di alto grado di qualità e servizio, come richiesto da questo segmento di mercato, mentre nello stabilimento di Empoli (FI) sono realizzate bottiglie per vino e per olio di oliva.

Entrambi gli stabilimenti producono inoltre bottiglie per passate di pomodoro e vasi per alimenti.

La ditta Zignago Vetro è anche attiva nel segmento dei contenitori in vetro per

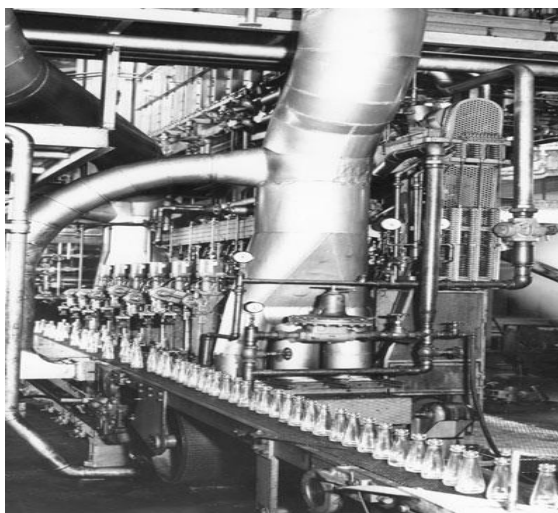


Figura. 1: Particolare prime produzioni (fonte Z.V).

Cosmetica & Profumeria che comprende vasetti per creme e flaconi per smalti, per la cura della pelle e per la profumeria media e mass market. L'elemento caratterizzante di questi

prodotti è la forma, che può essere standard o personalizzata, sulla base delle richieste del cliente. Spesso gli stessi contenitori, attraverso seconde lavorazioni, sono arricchiti con decorazioni e satinatura, per meglio caratterizzare il prodotto ed il brand.

I contenitori in vetro per Alta Profumeria sono realizzati dalla ditta Verreries Brosse, in Normandia, al centro di una regione di antica tradizione per la produzione di raffinati flaconi per l'alta profumeria francese. L'elevata qualità e la forte personalizzazione caratterizzano la produzione dello stabilimento di Vieux Rouen, che viene realizzata con moderne macchine automatiche ma anche con la più tradizionale tecnologia semi-



Figura 2: Esempio bottiglie prodotte (fonte Z.V.).

automatica.

Una parte rilevante dei contenitori è inoltre sottoposta a seconde lavorazioni per la valorizzazione della griffe.

La Business Unit Vetri Speciali produce bottiglie personalizzate destinate alle fasce “premium” di vino, olio e liquori, realizzate in forme originali e sofisticate, con ampia gamma di colori ed in

lotti anche molto piccoli.

La produzione dei contenitori speciali in vetro richiede un'elevatissima flessibilità produttiva e grande capacità di design.

La produzione nello stabilimento di Portogruaro è organizzata in 8 linee produttive, mentre quella di Empoli in 7; l'attività dell'industria si articola in 3 turni da 8 ore cadauno, così da garantire una produzione continua 24 ore su 24, 7 giorni su 7.

Nonostante la diversificazione produttiva che contraddistingue i vari stabilimenti, il filo conduttore che li unisce è la produzione di vetro cavo.

1.3 Produzione:

La produzione di vetro cavo si suddivide in 6 fasi:

- Preparazione della carica e della miscela: le materie prime vengono macinate e miscelate.
- Fusione: processo continuo che avviene in uno forno a bacino.
- Affinazione ed omogeneizzazione: rimozione delle bolle di gas dal liquido e omogeneizzazione.
- Formatura: il fuso viene messo in stampi, che devono dare la forma definitiva al vetro.
- Raffreddamento: la temperatura viene diminuita lentamente.
- Ricottura: trattamento con cui si vogliono eliminare le tensioni residue.

2 VETRO CAVO:

Il vetro cavo viene impiegato principalmente in campo alimentare quindi, tutti i recipienti immessi nel mercato, devono rispettare le norme di settore vigenti nel Paese in cui vengono distribuiti, per quanto riguarda l'Italia si deve fare riferimento alle seguenti norme:

- D.M. 21/03/1973 – *Disciplina igienica degli imballaggi, recipienti, utensili destinati a venire in contatto con le sostanze alimentari o con sostanze d'uso personale*, e s.m.i. (acronimo di successive modifiche ed integrazioni).
- D.M.S. 26/04/1993 – *Regolamento recante aggiornamento del Decreto Ministeriale 21/03/1973, concernente la disciplina igienica degli imballaggi, recipienti, utensili destinati a venire in contatto con le sostanze alimentari e con sostanze d'uso personale*, Recepimento delle Direttive Europee 82/711/CEE, 85/572/CEE e 90/128/CEE e 92/39/CEE.
- D.L. n. 108 del 25/01/1992 – *Attuazione della Direttiva n. 89/109/CEE concernente i materiali e gli oggetti destinati a venire a contatto con i prodotti alimentari*;
- D.L. n. 22 del 05/02/1997 – *Attuazione delle Direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio*.

Vi sono però ulteriori importanti requisiti da rispettare che riguardano le caratteristiche particolari di un recipiente, al fine di salvaguardare la sicurezza del consumatore.

2.1 Difetti e loro classificazione:

I difetti di un contenitore di vetro cavo si suddividono in quattro categorie a seconda della loro gravità.

Sono definiti **difetti critici** tutti quei difetti che compromettono la sicurezza e costituiscono un rischio per l'integrità fisica dell'utilizzatore; quindi si considerano critici tutti quei difetti che producono all'interno del contenitore particelle di vetro molto piccole che possono essere ingerite dal consumatore, oppure che aumentino il rischio di infortunio durante la manipolazione.

A questa categoria appartengono i seguenti difetti:

- bava sul piano bocca (overpress);
- bava sull'imboccatura (flange finish);
- spuntone all'interno della bocca;
- spuntone al fondo (spike bottom);
- filo del telefono (bird cage o bird swing);
- frammenti di vetro all'interno del contenitore (liberi o incollati);
- vesciche interne con pareti sottili;
- bave taglienti sul corpo;

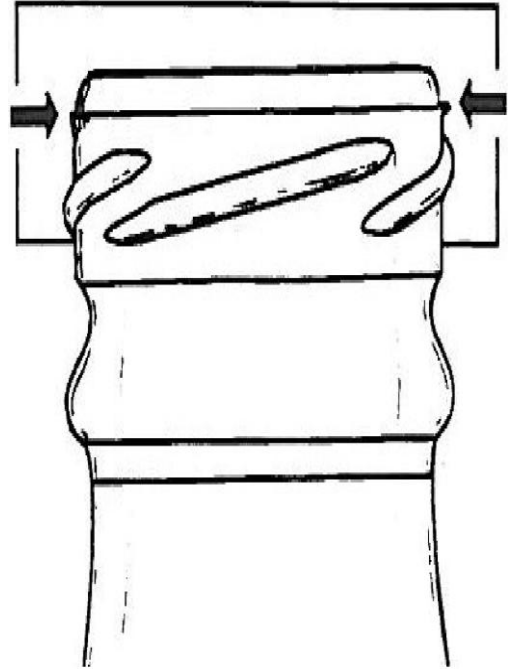


Figura 3: Bava all'imboccatura (giunzione anello). Bordo sporgente lateralmente o alla sommità dell'imboccatura (fonte S.S.V.).

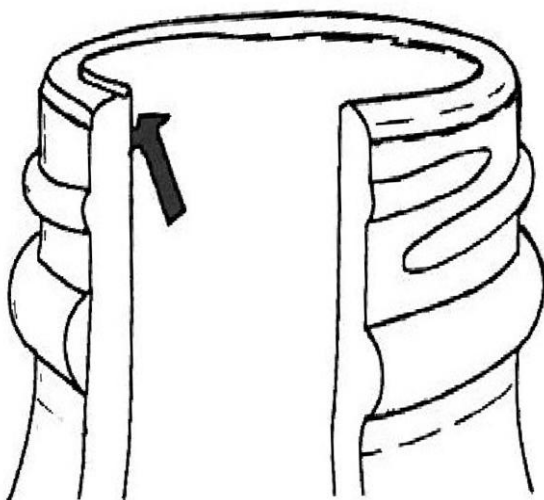


Figura 4: Bava sul piano bocca. Difetto critico per ogni tipo di imboccatura (fonte S.S.V.).

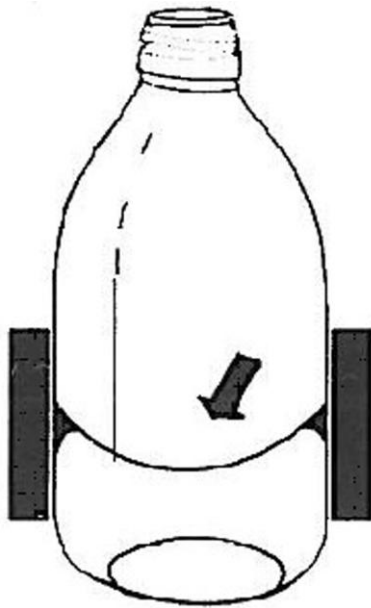


Figura .5:
*Filo del telefono, filo di vetro che si
estende
da una parete all'altra (fonte S.S.V.).*

Figura. 6:
Spuntone all'interno dell'imboccatura (fonte S.S.V.).

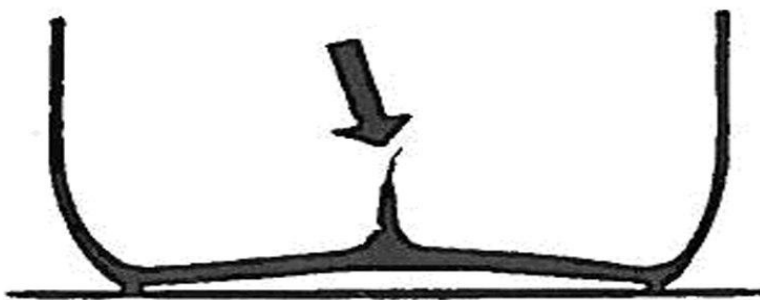
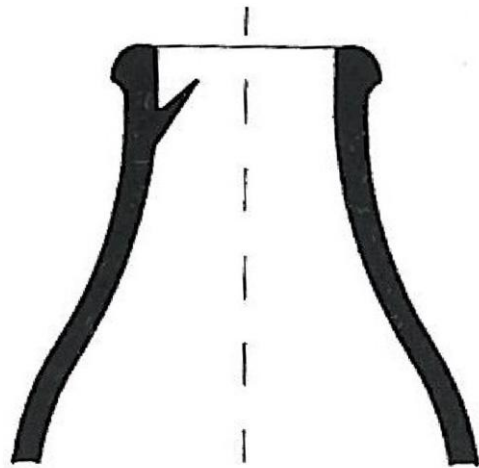


Figura 7: *Spuntone al fondo
(fonte S.S.V.).*

Figura .8:
*Frammenti di vetro all'interno.
Qualunque particella di vetro,
indipendentemente dalla dimensione (fonte S.S.V.).*

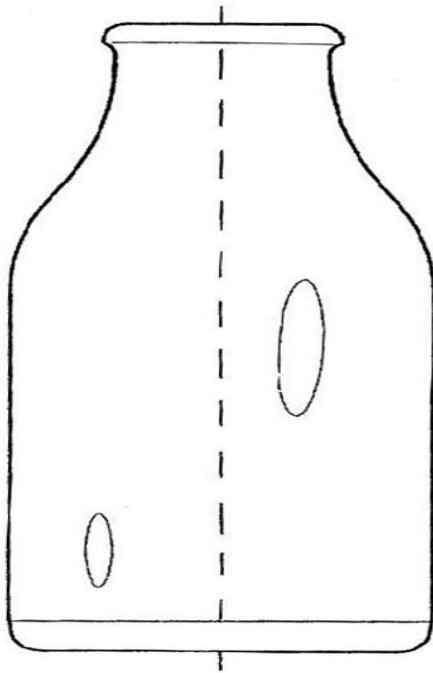
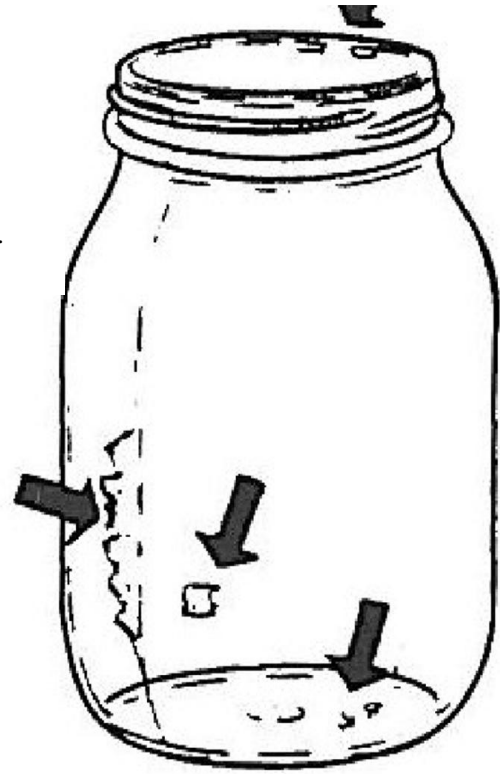


Figura 9: *Vesciche interne con
pareti sottili (fonte S.S.V.).*

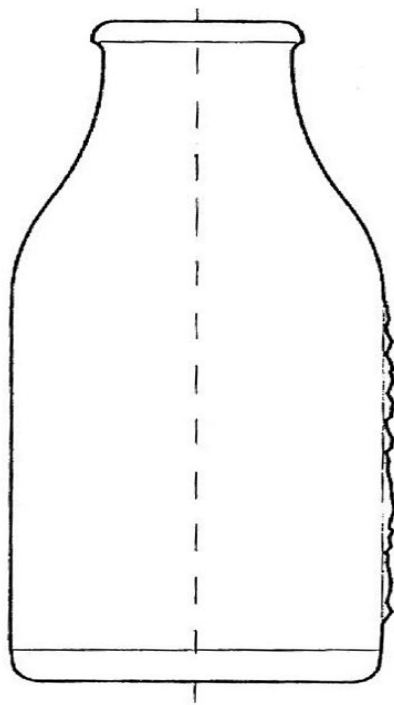


Figura 10: Bave taglienti sul corpo.
Generalmente sono dovute
all'incollaggio a caldo di due articoli
che si separano a freddo.

Si definiscono invece **difetti funzionali** quei difetti che compromettono una buona conservazione del prodotto a causa di una chiusura poco efficiente, tra i principali si ricordano:

- Imboccatura smerigliata o tagli in bocca (split finish);
- Filati in bocca (line over finish);
- Screpolature sul piano bocca (crizzle finish);
- Imboccatura non completamente formata o avvallata (unfilled finish, warp finish);
- Rientranza interna bocca (blowback finish);
- Imboccatura svasata all'interno (rolled in finish);
- Imboccatura ovalizzata (out of round finish);
- Imboccatura inclinata (l'asse dell'imboccatura forma un angolo con l'asse del contenitore);
- Imboccatura rigonfiata (bulged finish);
- Segno forbici sul piano bocca;
- Piega da pressata con smeriglio;

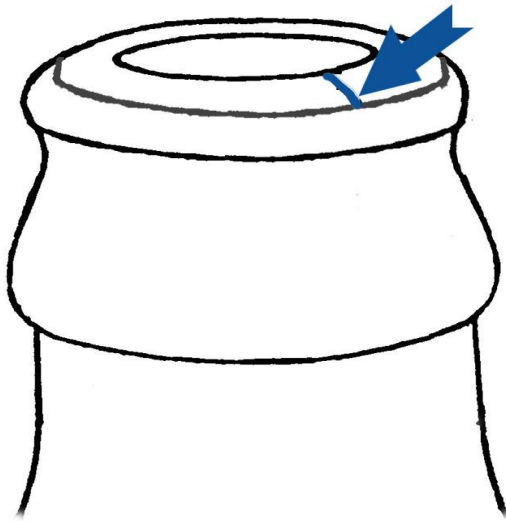


Figura. 11: Filato in bocca.
Cricca esterna che si estende sul pianobocca.
Viene rilevata con difficoltà non riflette la luce.
Talvolta vengono indicati come filati
delle bolle stirate a cavallo del piano bocca (fonte S.S.V.).

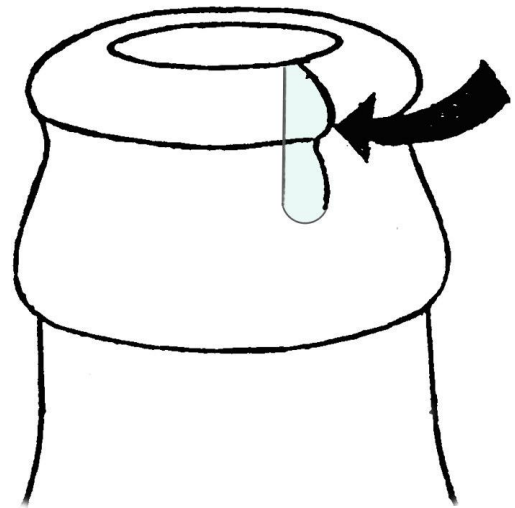


Figura -12: Imboccatura smerigliata.
Frattura che si estende nello spessore
dell'imboccatura partendo dalla sommità
e proseguendo verso il collo(fonte S.S.V.).

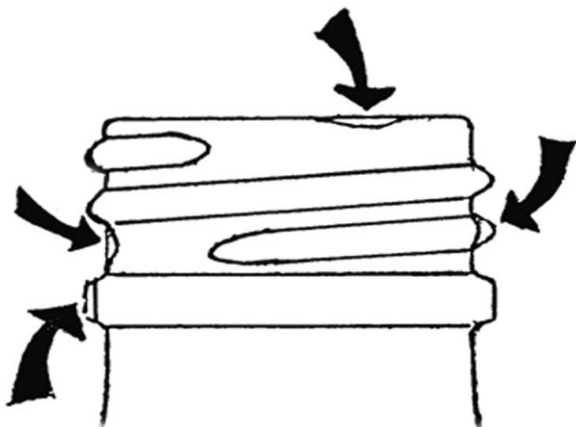


Figura 13: *Imboccatura incompleta o avvallata.*
L'imboccatura non è regolare: la filettatura è stampata male o non è stampata; manca vetro sul piano-bocca (fonte S.S.V.).

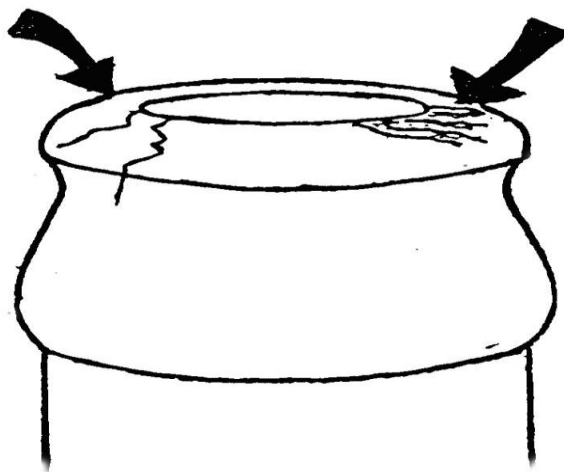


Figura 14:
Screpolature sul piano-bocca.
Superficie di chiusura con alcune o molteplici cricche(fonte S.S.V.).

Si dicono **difetti primari** quelli che causano rotture nelle linee di riempimento o quelli che comunque provocano riduzioni di produttività, questi sono:

- Smeriglio all'imboccatura o sotto l'imboccatura (checked finish, check under the finish): il taglio sotto l'imboccatura può portare al distacco completo della bocca anche con leggeri impatti;
- Collo strozzato (chocked neck): restringimento interno del collo che può interferire con le cannucce di riempimento o provocare schiumatura durante il riempimento;
- Imboccatura fuori asse (offset finish);
- Collo storto (bent neck): può essere causa di problemi sia in riempimento che in tappatura;
- Smeriglio alla base del collo;
- Articolo sottile;
- Fuori verticalità;
- Corpo ovalizzato: può determinare problemi di capacità, etichettatura, distribuzione vetro;
- Tagli da pressione e tagli a caldo (pressure checks, hot checks): cricche "V" inizialmente poco profonde che possono determinare la rottura del contenitore per effetto di altre sollecitazioni;
- Tagli sul fondo (checked bottom);
- Cattiva distribuzione del vetro (uneven distribution);
- Pareti rientrate (sunken side): può determinare problemi di capacità e difficoltà di etichettatura;
- Pareti gonfiate (bulged side): può portare al blocco delle bottiglie sulle linee di riempimento, difficoltà di etichettatura, eccessiva capacità;
- Fondo spostato (spessore di vetro molto più elevato su un lato del fondo);
- Fondo sottile (light bottom): presenza di un punto sottile sul fondo che può innescare la rottura;
- Fondo sporgente (centro del fondo più basso del suo bordo esterno): determina instabilità del contenitore e eccessiva capacità.
- Giunzione abbozzatore collo corpo o fondino abbozzatore troppo marcata;
- Fondo deformato;
- Zigrinatura fondo poco evidente: può dar luogo a microcricche per sbalzo termico.

Vengono definiti infine **difetti estetici** quei difetti che non compromettono l'integrità del pezzo, ma riguardano solo l'aspetto del contenitore:

- Spalla non completamente formata;
- Segni (pieghe) da caricamento;
- Segni del maschio (rugosità interna);
- Segni delle cesoie sul fondo: difetto primario per contenitori soggetti a pressione interna;
- Bolle (diametro maggiore di 1,5mm);
- Grinze;
- Fondo pesante;
- Buccia d'arancia;
- Finitore spostato;
- Piegatura da pressatura non smerigliata;

2.2 Livello di qualità accettabile:

E' di estrema importanza per un'azienda quantificare il livello di qualità per un contenitore di vetro. Il Livello di Qualità Accettabile (AQL) è il livello di qualità espresso come percentuale di elementi non conformi, corrisponde alla peggior media di processo tollerabile quando una serie di lotti è sottoposta a campionamenti per l'accettazione; non è un livello di qualità desiderabile, bensì un livello oltre il quale il prodotto è considerato non conforme, è un limite per l'idoneità di un contenitore. L'AQL ci fornisce delle informazioni sul livello di qualità richiesta alla produzione, e, a seconda degli impieghi può essere più alto o più basso, ad esempio nel caso di vetro destinato ad usi sanitari avremo un AQL molto basso, questo per la criticità che potrebbe avere un' eventuale difetto.

L'AQL deve essere quindi stabilito tra il produttore e il cliente e, nel caso in cui il produttore non soddisfi i requisiti richiesti la merce può essere contestata. Quindi si deve considerare che fissato un piano di campionamento, a ciascun AQL corrisponde sia una determinata probabilità di accettazione di un lotto con un livello di qualità non soddisfacente (rischio dell'utilizzatore), sia una probabilità che un lotto di qualità accettabile venga scartato (rischio del fornitore).

Quindi la scelta di un AQL deve tener conto delle conseguenze di un eventuale difetto: se il difetto provoca un danno limitato, un AQL relativamente elevato può essere ammissibile, al contrario all'aumentare della gravità del difetto, si dovrà scegliere un AQL più severo, come nel caso di produzione di vetro ad uso sanitario.

Detto questo, nel caso di difetti critici, non è possibile ammettere alcuna percentuale di articoli con difettosità critica, in quanto un possibile difetto comprometterebbe l'integrità dell'utilizzatore, per gli altri tipi di difetto invece ci si può riferire agli AQL riportati in tabella.

Tabella 1

| Categoria di difetto | AQL |
|-----------------------------|------------|
| Difetti critici | - |
| Difetti funzionali | 0.40 |
| Difetti primari | 0.65 |
| Difetti estetici | 4.0 |

Controlli per garantire la qualità dei prodotti vengono eseguiti in vetreria con lo scopo di individuare l'origine di un difetto e permettere rapide azioni correttive. La frequenza dei controlli può essere stabilita dal vetraio, ma è nel suo interesse avere un numero di controlli tale da garantire un certo livello di AQL. Accanto a questi controlli si possono prevedere dei collaudi per l'accettazione del lotto utilizzando piani di campionamento coerenti, come quelli previsti dalla norma ISO 2859-1 per il collaudo per attributi indicizzati in funzione dell' AQL. Nel caso di metodi di verifica non-distruttivi, le caratteristiche critiche dovrebbero essere collaudate utilizzando una numerosità del campione uguale alla numerosità del lotto e un numero di accettazione pari a zero. Se il controllo non può avvenire su tutto il lotto per ragioni di tempo, per avere una idea del numero di articoli da controllare si può fare riferimento alle modalità di campionamento del collaudo distruttivo, la numerosità del campione da esaminare n si ottiene dalla seguente formula:

$$n = \left[N - \frac{d}{2} \right] \cdot \left(1 - \beta^{\frac{1}{d+1}} \right) \quad (1)$$

con: **N**: numerosità del lotto;

β: probabilità specificata di non riuscire a scoprire almeno una non conformità critica;

d: numero massimo di elementi non-conformi presenti nel lotto;

2.3 Analisi della frattura:

La presenza di difetti come quelli sopracitati compromette la resistenza meccanica del contenitore.

La resistenza meccanica di un oggetto indica la tensione massima che esso può sopportare senza accusare fenomeni visibili di frattura; il vetro, come in genere tutti i materiali fragili, si comporta in modo elastico lineare sia su scala globale che su scala microscopica, dove avviene la rottura dei legami atomici. Griffith, per primo, ha indicato che l'usuale bassa resistenza meccanica del vetro trova spiegazione nella presenza sulla superficie di cricche microscopiche e sub-microscopiche: dallo studio del campo di tensione lineare elastica risulta, infatti, che una cricca amplifica localmente il valore della tensione nominale applicata.

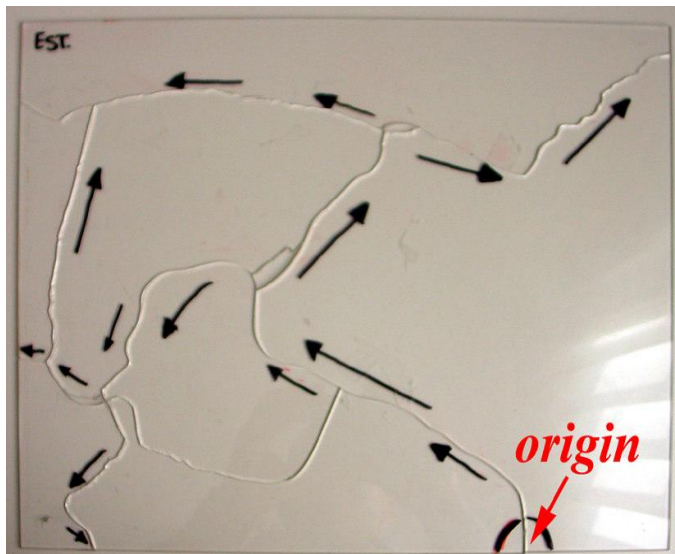


Figura 15: Ricostruzione di una lastra rotta per individuare l'origine di frattura (fonte S.S.V.).

Nello studio del comportamento meccanico di un oggetto di vetro bisogna tenere conto della presenza di difetti non visibili agenti da concentratori di sforzo, per cui non conta tanto la tensione applicata, ma la tensione locale amplificata. Questa dipendenza da difetti non controllabili è così marcata che rende la resistenza pratica del vetro non una proprietà del materiale (legata alla composizione chimica), ma una caratteristica di un particolare prodotto. L'analisi della frattura è l'analisi delle superfici che si creano nella frattura e

l'interpretazione delle linee di frattura visibili su queste superfici, questo studio è molto importante perché si possono ottenere informazioni sulla direzione di propagazione della frattura o sullo sforzo al momento della frattura. E', in molti casi, parte integrante delle prove meccaniche e del controllo della produzione; nel caso in cui avvenga una rottura in utilizzo un'analisi della frattura può far capire la causa della rottura al fine di sancire eventuali responsabilità dell'utilizzatore o dell'azienda produttrice.

L'*origine di frattura* è facilmente distinguibile in virtù della sua morfologia, una semplice operazione di ricomposizione di un vaso rotto, può mostrare la posizione dell'origine di frattura e può fornire informazioni sia sullo stato tensionale al momento della rottura sia sulla sequenza con cui le rotture si sono sviluppate. Per l'interpretazione dei segni sulla superficie di frattura si deve tener conto che nei materiali fragili isotropi, vale la *legge della tensione normale*, secondo la quale la frattura si propaga sempre ortogonalmente alla direzione locale dello sforzo principale.

La superficie di frattura vicino all'origine è in genere molto liscia e riflettente e prende il nome di *specchio di frattura*.

Quando il vetro si rompe a bassi sforzi (come nella maggior parte delle fratture termiche) l'intera superficie di frattura potrebbe essere a *specchio*, senza, o con pochissimi, segni di frattura. Viceversa, se la sollecitazione è più elevata (come tipicamente avviene nelle prove di resistenza meccanica) la frattura accelera man mano che si allontana dall'origine. All'istante della rottura si ha una considerevole quantità di energia elastica immagazzinata nel vetro e molta di questa energia è utilizzata per creare la superficie di frattura; quando la velocità si approssima alla massima possibile nel materiale (per vetro sodico calcico 1500 m/s), il fronte di cricca singolo si suddivide su scala microscopica: questa superficie di frattura rugosa e di aspetto appannato viene chiamata *mist*. La suddivisione microscopica del fronte di cricca, incrementando la superficie di frattura, consente una ulteriore dissipazione dell'energia elastica immagazzinata. Se questo non è sufficiente, il singolo fronte di frattura si ramifica in due cricche; a questo punto la frattura ha raggiunto la sua massima velocità ($\sim \frac{1}{2}, \frac{3}{2}$ della velocità delle onde elastiche trasversali nel materiale): la ramificazione è indicata sulla superficie di frattura dalla presenza di estese linee appuntite chiamate *velocity hackle*, parallele alla direzione di propagazione della frattura. *Mist* e *velocity hackle* delimitano lo *specchio di frattura*.

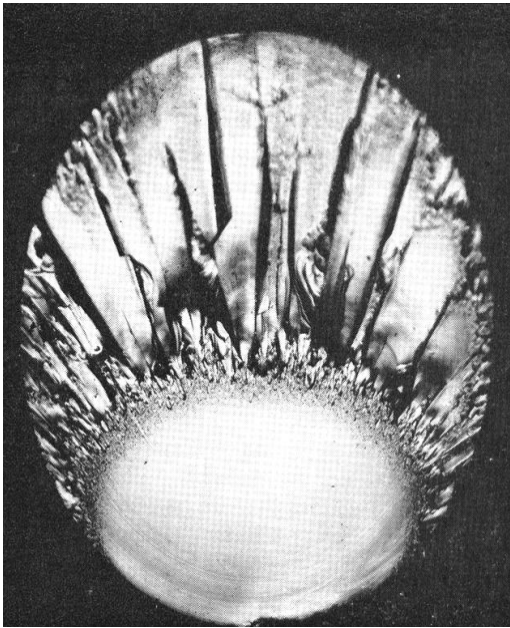


Figura 16 :Specchio semicircolare, indica rottura per trazione Uniforme (fonte S.S.V.).

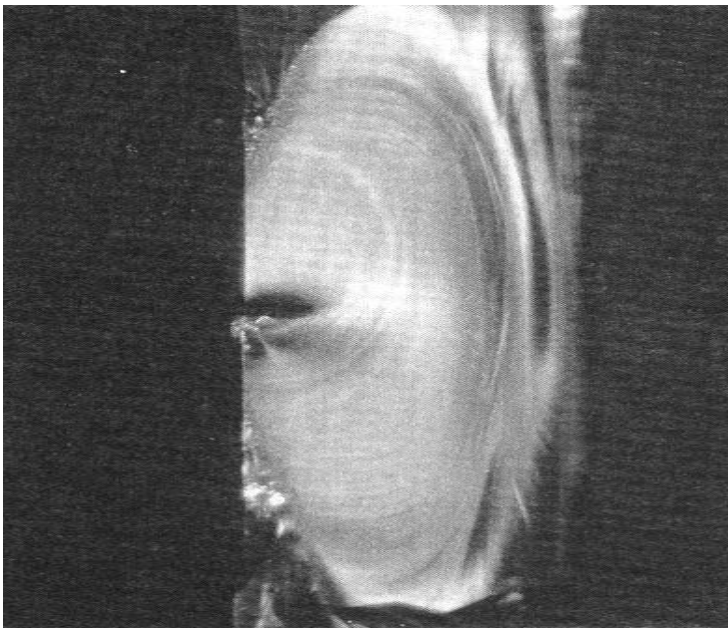


Figura 17: Specchio aperto definito una zona mist solo lungo la superficie libera originale, indica rottura per flessione (fonte S.S.V.).

La forma dello specchio di frattura è quindi fortemente dipendente dallo stato tensionale al momento della rottura, nel caso di trazione uniforme lo specchio di frattura si presenta come un semicerchio centrato sull'origine della frattura. Nelle rotture prodotte da uno sforzo di trazione non uniforme che presentano il massimo sulla superficie, diminuiscono nello spessore e cambiano di segno; la zona di aspetto appannato (*mist*) delimita lo specchio soltanto in corrispondenza della superficie libera su cui si trova l'origine della frattura, perché il fronte di frattura viene rallentato dalla diminuzione della tensione, o

addirittura ostacolato dagli sforzi di compressione. La dimensione dello specchio risulta inversamente proporzionale allo sforzo di rottura: infatti, tanto più bassa era la trazione al momento della rottura, tanto maggiore risulta lo spazio impiegato per aumentare la velocità del fronte di frattura fino alla velocità limite. Da questo è così possibile ricavare lo sforzo di rottura quando è presente la zona di *mist* attorno all'origine di frattura, prendendo come dimensione caratteristica la distanza dal centro dell'origine all'inizio della zona *mist*, detta *raggio dello specchio di frattura*, è stata più volte dimostrata la seguente relazione:

$$\sigma \times \sqrt{R} = A = K \quad (2)$$

Dove **R**: raggio dello specchio di frattura [m].

σ : tensione agente al momento della rottura [Mpa].

La superficie di frattura però offre anche altri segnali che vengono utilizzati in frattografia questi sono:

- **Linee di Wallner**: sono delle linee curve che ricordano le increspature prodotte da un sasso gettato in uno specchio d'acqua, sono formate dall'interferenza del fronte di frattura con le onde elastiche che lo intersecano durante l'avanzamento, causando così una temporanea deviazione della direzione locale dello sforzo principale; quindi il fronte di frattura, dovendo mantenersi sempre normale alla direzione locale dello sforzo, segue queste deviazioni inclinandosi temporaneamente fuori il suo piano originario, creando così un effetto a onda delle superfici.
- **Linee di arresto**: è una linea molto marcata che si forma quando la frattura si ferma e successivamente riprende a propagarsi sotto un campo tensionale differente; questa linea si può formare anche quando la cricca cambia bruscamente il piano in cui si propaga. Le linee di arresto danno sempre la forma del fronte di frattura, poichè segnano la posizione del fronte all'istante dell'arresto o della brusca variazione di piano.
- **Hackle**: è la linea disposta parallelamente alla direzione locale di propagazione della frattura che separa due porzioni parallele della superficie di rottura.
- **Twist hackle**: è un'insieme di linee hackle, si verifica quando il campo tensionale davanti alla frattura in propagazione si torce; obbedendo alla legge della tensione normale, la frattura tenta di seguire questo cambiamento con un svergolamento, l'intero fronte però non riesce a curvare come un piano unico, ma si fraziona in una serie di fronti paralleli, infatti l'aspetto di queste linee ricorda una scala vista dall'alto.

- **Shear hackle:** Sono anche dette striature o piume di Woodworth, nascono dalla sovrapposizione di uno sforzo di taglio ad uno sforzo di trazione principale.

Lo studio di queste tracce fornisce così informazioni utili sia a rintracciare l'origine, sia a rintracciare gli eventi che hanno portato alla rottura. La localizzazione dell'origine di frattura permette quindi di individuare il difetto critico da cui si è innescata la rottura e quindi stabilire se si tratta di un difetto derivante dal processo oppure prodotto successivamente e di conseguenza correre a dei ripari.



Figura 18: Forma delle linee di Wallner (fonte S.S.V.).

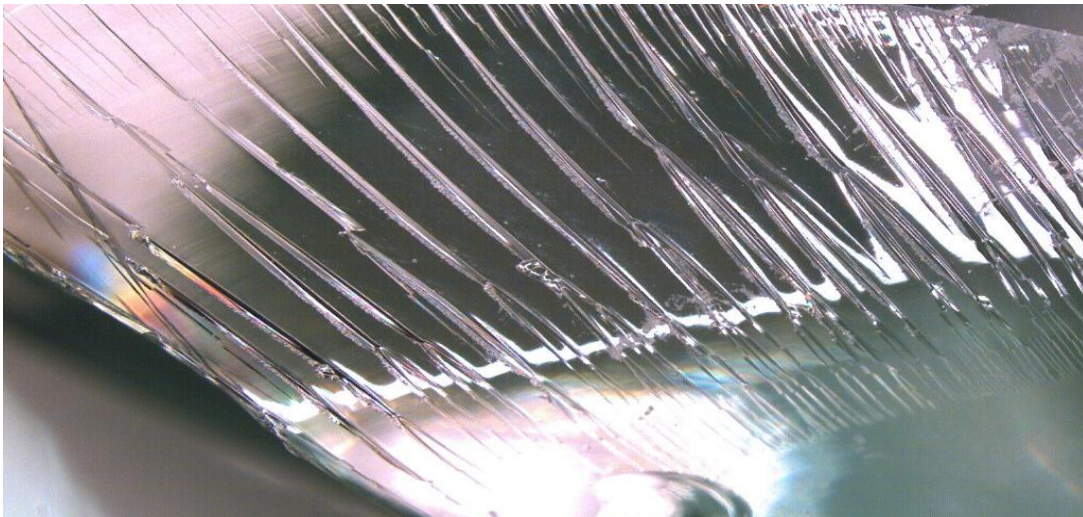


Figura 19: Hackle (fonte S.S.V.).

3 IMPACT TEST:

Il test ad impatto o impact test, è una prova distruttiva che consente di determinare la resistenza meccanica all'impatto di un vaso di vetro, dato il comportamento fragile del vetro ogni esperimento porterà il vaso a rottura; potremmo così avere a disposizione una serie di dati di rotture che possono aiutarci a comparare la resistenza media per giorno di produzione, al fine di monitorare costantemente e migliorare la resistenza dei vasi di vetro.

3.1 Lo strumento:

Lo strumento utilizzato per le prove è l' AGR Pendulum Impact Tester, questo apparecchio è basato sul principio del pendolo di Izod e Charpy utilizzato per le prove sui metalli, è composto dalle seguenti parti:

- **Un pendolo** che porta nella parte terminale un martello a battente sferico in acciaio temprato (durezza = 55 Rockwell C) di dimensioni prestabilite in base all'energia d'urto che si vuole ottenere. Il suo baricentro deve risultare esattamente sull'asse della sfera.

- **Un'asta rigida** fissata ad una ruota dentata che permetta di trattenere mediante un gancio a molla il martello del pendolo.

- **Una ruota dentata**

azionata da una vite senza fine mediante una manopola (volantino) la quale sposti il sistema asta-pendolo variando l'altezza di caduta del martello.

- **Una scala a corona circolare**, fissata sulla ruota dentata, sulla quale si possano leggere direttamente valori di energia d'urto compresi tra 0 e 2,5 N*m, con una sensibilità che va da 0,05N*m a 0,10N*m , il valore massimo registrabile è di 2,5 N*m

- **Una colonna di sostegno** ancorata al basamento dell'apparecchio che sostenga tutte le parti sopra descritte.

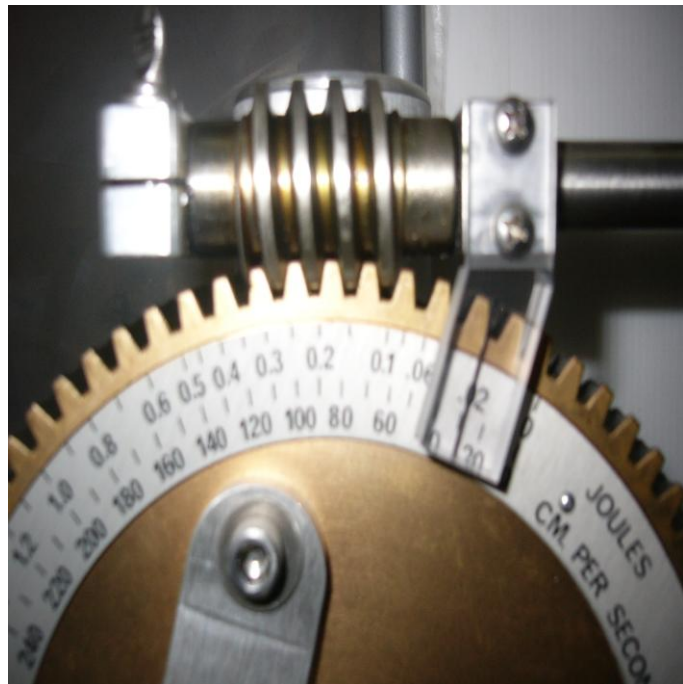


Figura 20: Particolare strumento

- **Una piastra** che porta il sistema di supporto e appoggio del contenitore ed il cui movimento orizzontale sul piano del basamento dell'apparecchio permetta di regolare la posizione del contenitore in modo che la sua parete sia tangente al battente sferico del martello quando questo si trova nel punto di quiete del pendolo.
- **Una colonna** fissata alla piastra che sostenga il sistema di supporto del contenitore regolabile in altezza da un congegno vite-madrevite azionato da una manopola, ed alla cui sommità è stato bloccato il sistema di appoggio, a forma di V, del contenitore. Tale appoggio deve essere saldamente contrastato posteriormente da una staffa o da una parete rigida, per garantire il più possibile l'assenza di vibrazioni secondarie al momento dell'urto. La colonna ed il sistema di appoggio devono essere costruiti in acciaio. L'intera apparecchiatura dovrà essere messa in bolla e ancorata rigidamente ad un banco robusto oppure direttamente a pavimento.



Figura 21: AGR Pendulum Impact Tester.

3.2 Modalità di prova:

Le modalità di prova sono formalizzate dalla norma italiana UNI9302: Contenitori di vetro: determinazione della resistenza all'urto del febbraio 1988.

Oggetto delle prove sono i vasi Barilla 425 prodotti al primo turno (8-18) nella linea 11, ogni linea ha 24 stampi, quindi sono stati prelevati per ogni pallet un numero complessivo di 24 vasi di vetro ordinati per numero di stampo, le date in oggetto sono: 30, 31 Luglio, 1,

2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 13, 22, 23 Agosto. Dopo aver prelevato i vasi e averli ordinati per numero di stampo, si è cominciato a testare ogni vaso.

Il vaso veniva posto sull'apparecchiatura portandone la parete a contatto del battente sferico nel punto di quiete del pendolo e regolandone l'altezza in modo che il martello andasse a colpire la zona ad un'altezza di 2cm dal fondo-vaso. Si è successivamente portato il sistema asta pendolo mediante l'apposita manopola al richiesto valore di energia d'urto, successivamente si è sganciato il martello in modo che questo colpisse la parete nel punto prescelto, cercando di evitare colpi successivi dovuti al rimbalzo della sfera. Con lo stesso valore d'energia d'urto si sono impressi altri 3 colpi ruotando il vaso di 90° alla volta, la prova è stata portata avanti aumentando progressivamente il valore di energia d'urto seguendo la seguente scala in J: 0,02; 0,04; 0,06; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,60; 0,70; 0,80; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0; 2,1; 2,2; 2,3; 2,4; 2,5.

3.3 Comportamento dei vasi all'impatto:

Prima di andare ad analizzare i risultati della prova ad impatto è opportuno chiarire i meccanismi e le modalità secondo le quali si genera e si propaga una tensione all'interno del vaso di vetro sottoposto ad impact test:

Generalmente durante l'impatto del pendolo sulla superficie del vaso vengono generati tre distinti sistemi tensionali di trazione: *sforzi di contatto*, *sforzi di flessione* e *sforzi di incastro*.

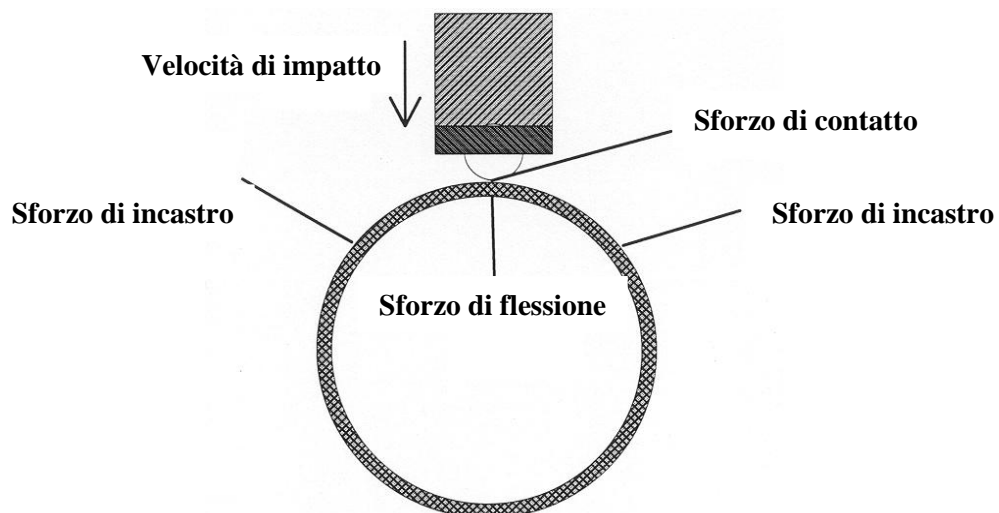


Figura 22: Sistemi di tensione generati nell'urto
(fonte Z.V.).

Lo *sforzo di contatto* o *sforzo Hertziano* è la tensione più critica che viene generata nell'urto, ciò nonostante risulta circoscritto ad una piccola area di contatto tra il vaso ed il corpo collidente, questo tipo di sforzo aumenta all'aumentare della durezza dell'oggetto collidente e al diminuire del suo raggio, è poi funzione della rigidità del punto di impatto che dipende a sua volta dallo spessore del vetro nel punto d'impatto e dalla geometria della zona di contatto; risulta quindi fondamentale un'analisi degli spessori all'interno del vaso: partendo dall'altro si vede come questo passi da 3,40mm a 1,80mm a media altezza, abbassandosi vertiginosamente in prossimità della curvatura inferiore (circa 2 cm dal fondo), è quindi ovvio che in prossimità del fondo (2cm) essendoci uno spessore di vetro inferiore lo sforzo di contatto hertziano sia molto più alto che nelle altre parti del vaso, ecco il motivo per cui la prova viene effettuata proprio a quella altezza. Data poi la dipendenza di questo sforzo della geometria del vaso è d'obbligo un disegno tecnico del vaso in esame:

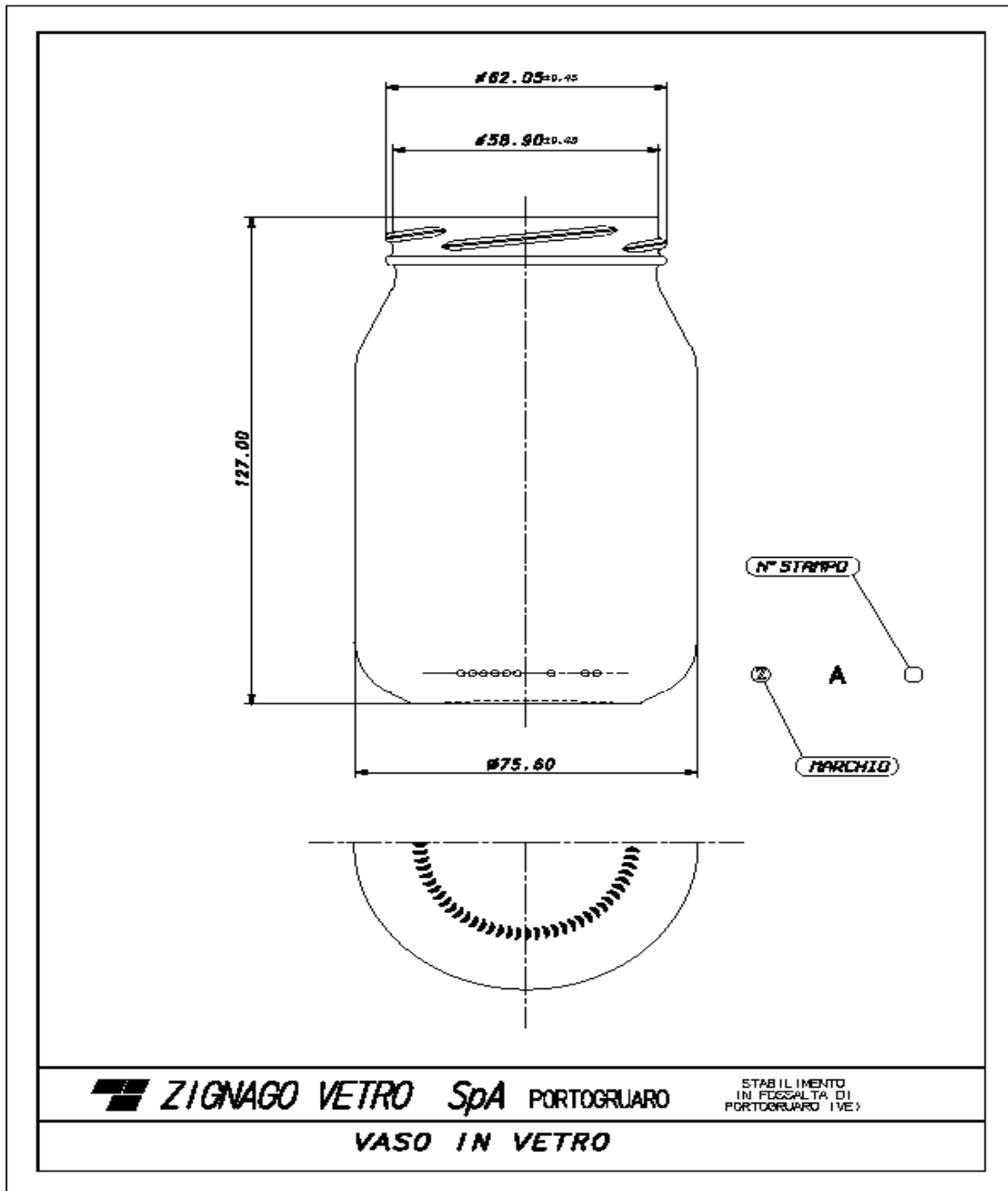


Figura 23: Disegno tecnico Vaso Barilla 425 (fonte Z.V.).

La criticità di questa tensione non deriva tanto dalla sua grandezza, ma dal fatto che agisce sulla superficie esterna del contenitore, per natura dotata di minor resistenza meccanica. Sulla superficie di contatto lo sforzo Hertziano ha direzione radiale rispetto al punto d'impatto e la frattura prodotta ha la forma di una circonferenza che si propaga con la forma di un cono: *cono Hertziano* (vedi figura in basso).

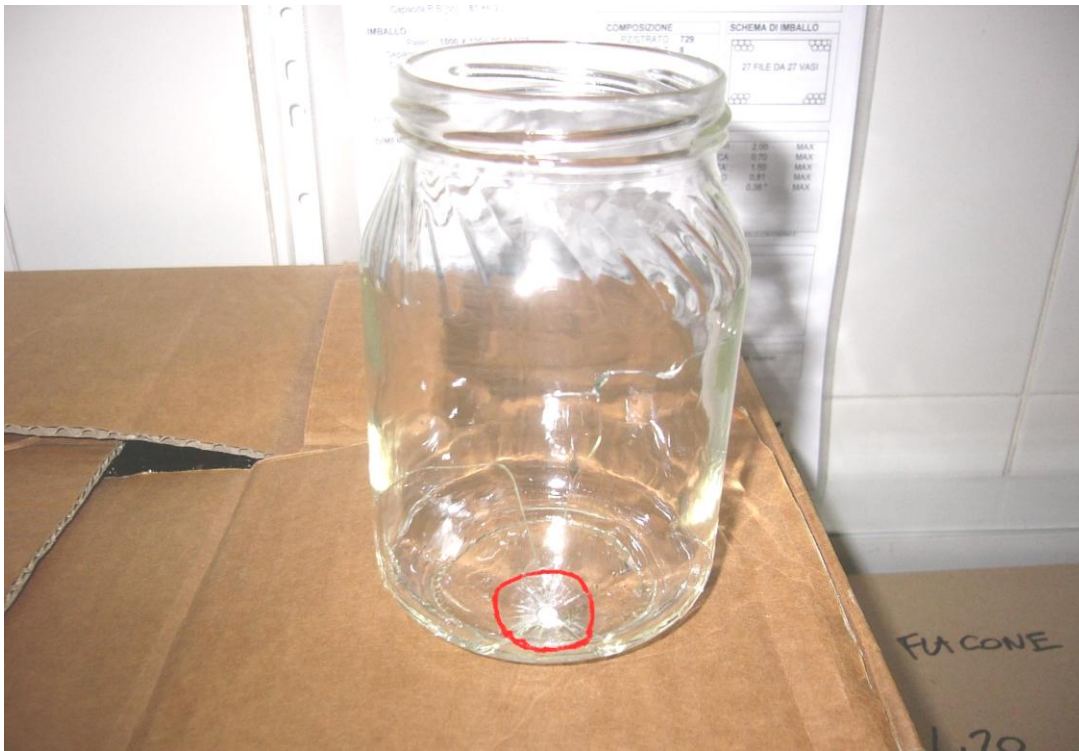


Figura 24: Esempio cono hertziano.

Non sempre lo sforzo di contatto porta alla rottura del vaso, se l'urto ha sufficiente energia, dalla cricca hertziana si possono innescare altre fratture dovute ad altri fattori (flessione) che rendono difficile l'individuazione della frattura originaria.

Un'altra tensione degna di nota è quindi lo *sforzo di flessione* che produce sulla superficie direttamente opposta al punto d'impatto una tensione di trazione che tende ad aumentare al crescere della flessibilità e quindi al diminuire dello spessore del vetro nella zona di contatto, questo sforzo si verifica in una zona abbastanza localizzata e protetta dal danneggiamento, quindi la rottura si verifica solo nel caso in cui ci siano dei difetti presenti nella superficie interna del manufatto. Lo sforzo flessionale massimo ha direzione tangente alle circonferenze centrate nel punto d'impatto quindi la frattura ha la caratteristica forma a raggiera detta Star crack.

Tra i gli sforzi più bassi generati nell'urto ci sono gli *sforzi di incastro* che sono distribuiti su una zona più ampia rispetto ai precedenti, tra l'altro questa zona è quella maggiormente esposta al danneggiamento durante l'utilizzo, questa tipologia di frattura ha origine lontano dal punto di contatto e si propaga proprio verso quest'ultimo, ne risulta quindi una frattura asimmetrica rispetto al punto d'impatto.

Queste 3 tipologie di tensioni sono difficilmente ricavabili per via sperimentale, ma vengono stimate attraverso modelli teorici.

4 RISULTATI:

Nella seguente tabella si sintetizzano i dati raccolti per giorno di produzione:

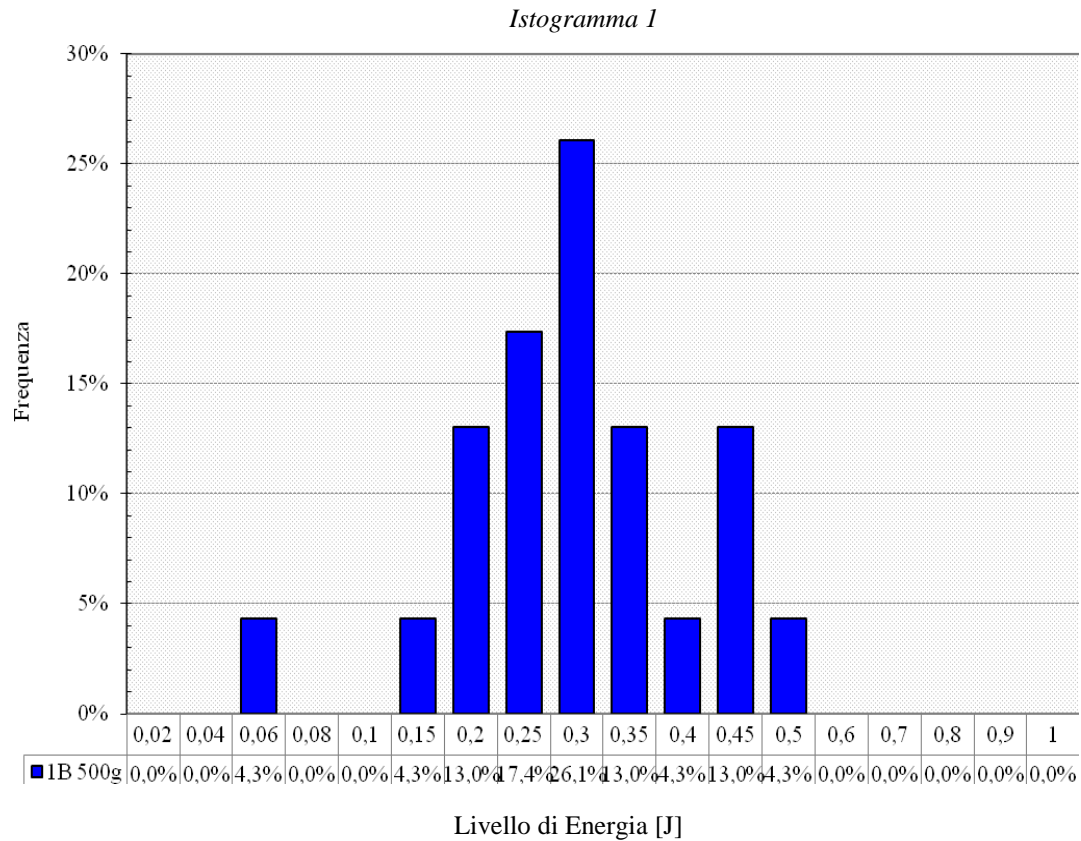
Tabella 2

| | 30-lug | 31-lug | 01-ago | 02-ago |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| media | 0,300 | 0,283 | 0,367 | 0,315 |
| dev.st | 0,106 | 0,130 | 0,157 | 0,164 |
| confidenza 95% | 0,029 | 0,036 | 0,043 | 0,046 |
| Min | 0,060 | 0,100 | 0,150 | 0,060 |
| Max | 0,500 | 0,600 | 0,800 | 0,600 |
| | 03-ago | 04-ago | 05-ago | 08-ago |
| media | 0,283 | 0,271 | 0,296 | 0,346 |
| dev.st | 0,143 | 0,091 | 0,189 | 0,194 |
| confidenza 95% | 0,040 | 0,025 | 0,053 | 0,054 |
| Min | 0,060 | 0,100 | 0,060 | 0,100 |
| Max | 0,600 | 0,450 | 0,800 | 0,700 |
| | 09-ago | 10-ago | 11-ago | 13-ago |
| media | 0,365 | 0,309 | 0,363 | 0,308 |
| dev.st | 0,172 | 0,140 | 0,187 | 0,138 |
| confidenza 95% | 0,048 | 0,039 | 0,052 | 0,038 |
| Min | 0,150 | 0,100 | 0,100 | 0,100 |
| Max | 0,800 | 0,600 | 0,700 | 0,700 |
| | 22-ago | 23-ago | | |
| media | 0,281 | 0,287 | | |
| dev.st | 0,125 | 0,134 | | |
| confidenza 95% | 0,035 | 0,037 | | |
| Min | 0,040 | 0,100 | | |
| Max | 0,600 | 0,700 | | |

Il valore medio della resistenza all'impatto si aggira attorno a 0,30 Joule, con delle variazioni all'interno dei singoli giorni di produzione: il valore medio massimo si ha il 1 Agosto 2010 mentre il minimo valore lo si ha il 4 agosto, questo è dovuto come già detto al diverso spessore dei manufatti o alla presenza di difetti microscopici che ne precludono la resistenza all'impatto.

Si sono poi analizzati gli istogrammi della distribuzione dei valori di rottura in Joule per ogni giorno di produzione:

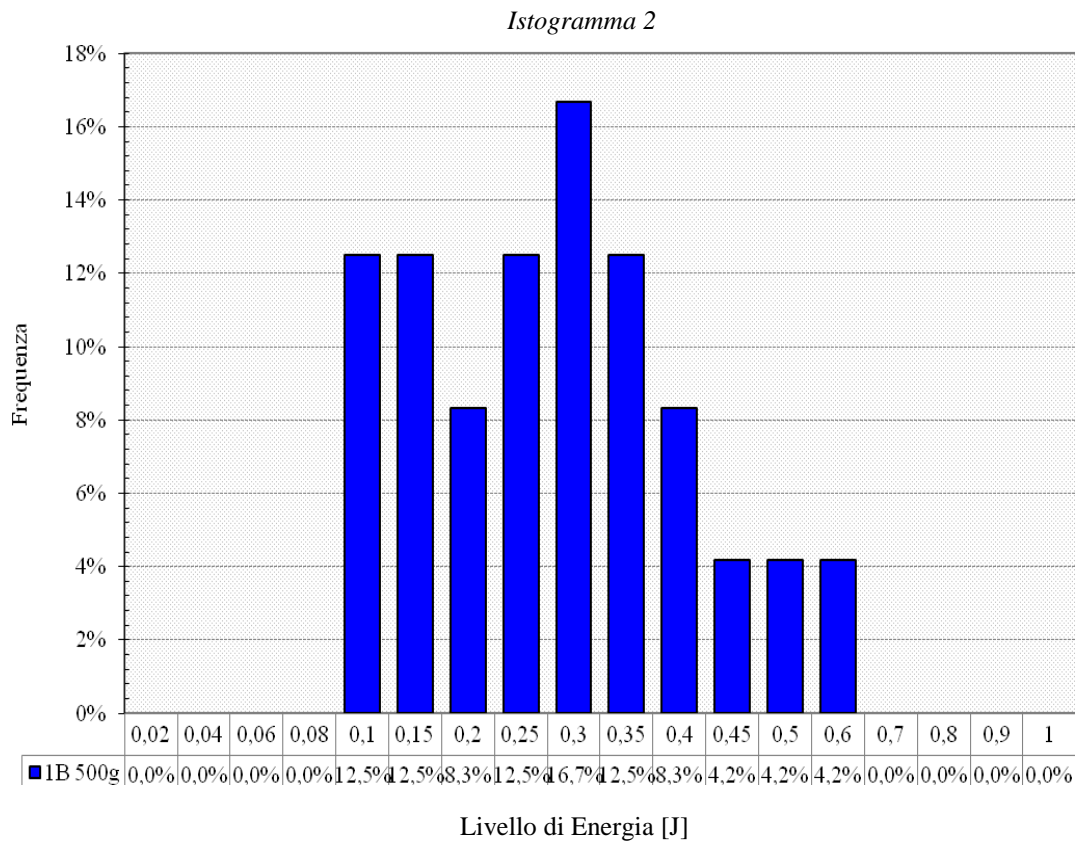
4.1 30 luglio:



L'istogramma approssima in modo soddisfacente la distribuzione normale, si vede infatti come in prossimità del valor medio si ha la percentuale più alta di rotture, agli estremi invece questa distribuzione presenta lo stesso valore in percentuale di rotture.

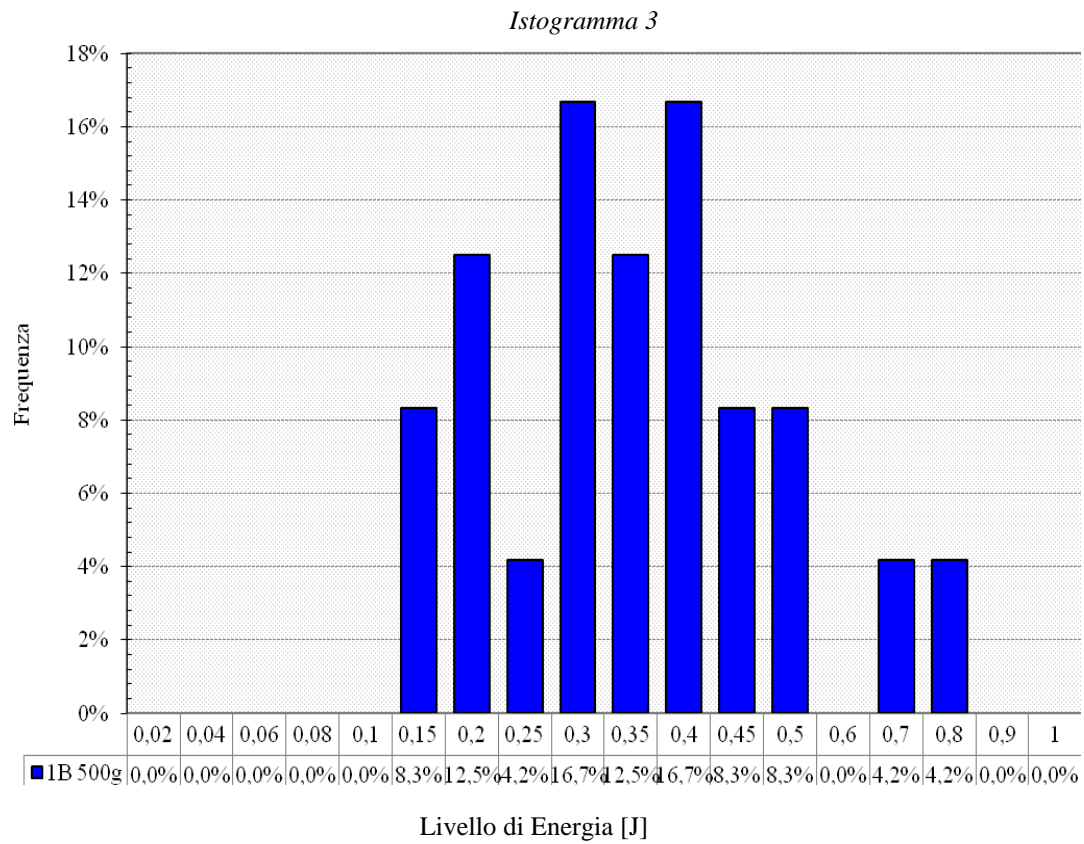
Nessun vaso si è rotto ad un livello di energia inferiore o uguale a 0,04 J, come si nota dall'istogramma il 4,3% dei vasi si è rotto ad un energia di 0,06 J (energia minima di rottura), il livello di energia massimo è di 0,5 J, con cui si è rotto il 4,3% dei manufatti.

4.2 31 luglio:



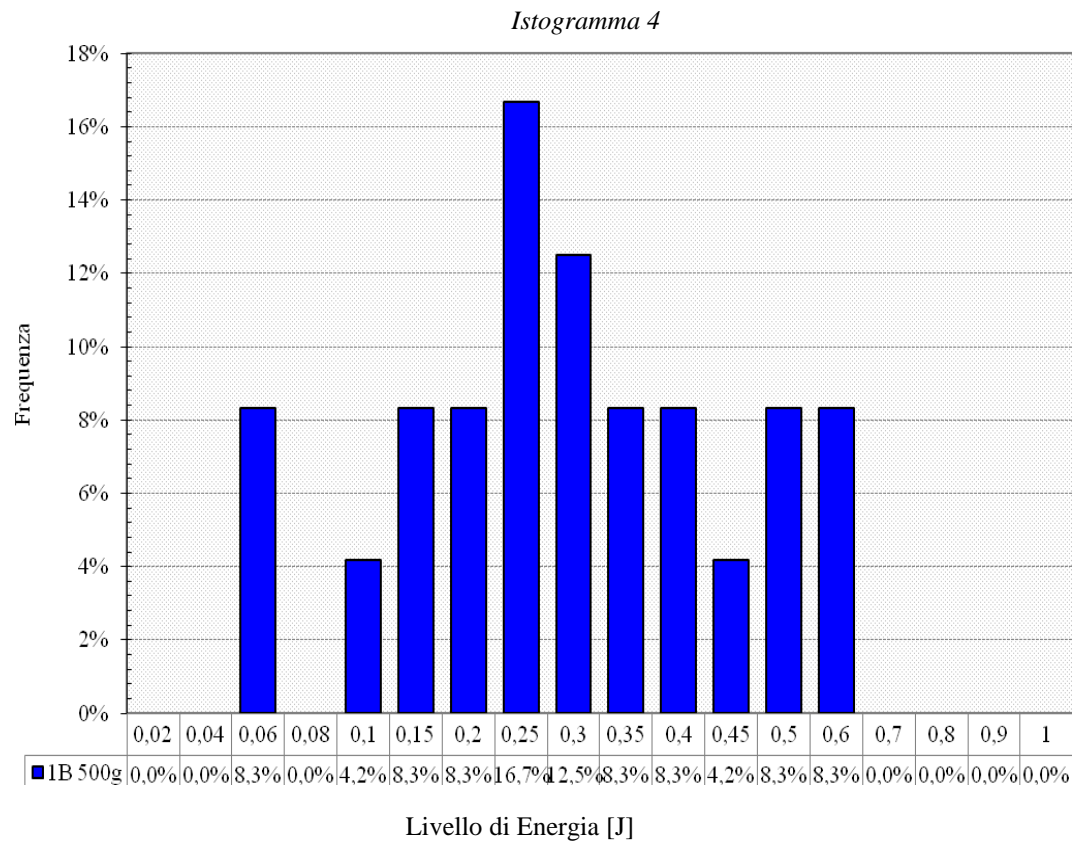
L' istogramma ha il massimo in prossimità del valor medio, rispetto a quello precedente però emerge una sensibile asimmetria che vede percentuali di rottura più alte a più bassi livelli di energia. Rispetto all'istogramma precedente si nota subito che il valore minimo di energia di rottura risulta più alto, infatti con 0,1 J si rompe il 12,5% dei vasi, il livello massimo di energia è di 0,6 J con cui si rompe il 4,2% dei vasi.

4.3 1 agosto:



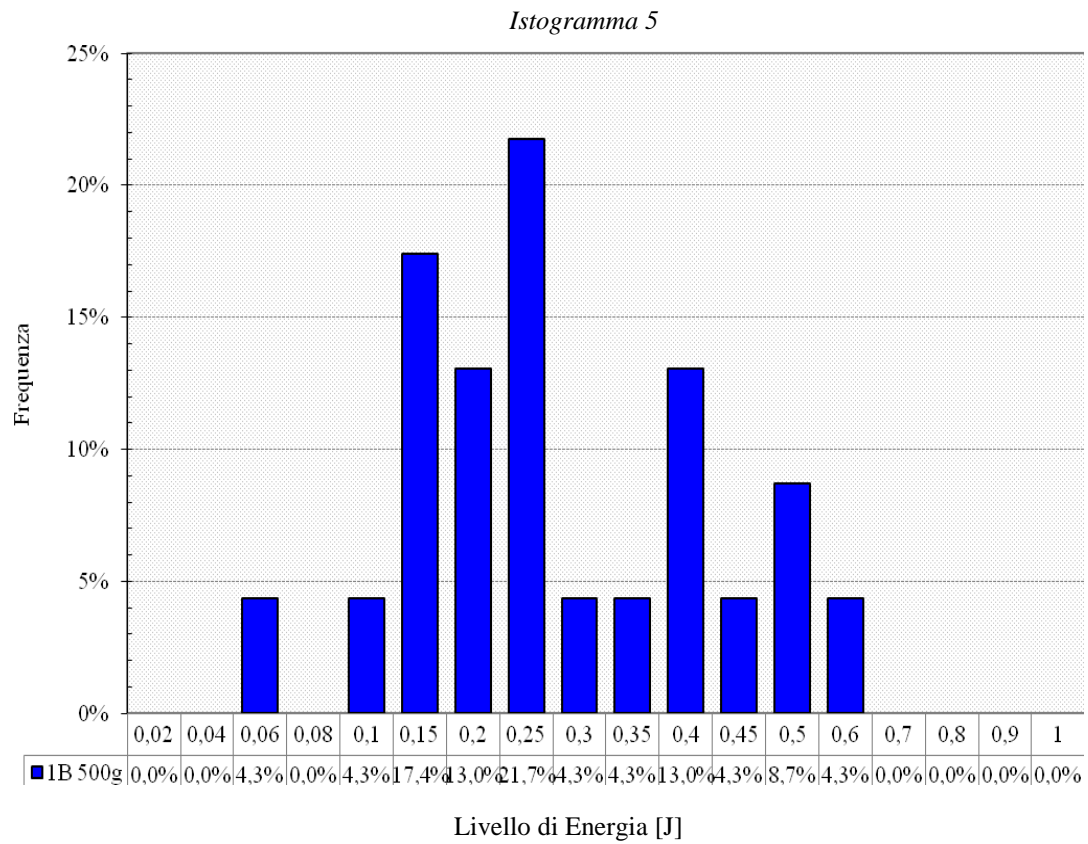
Come si vede dall'istogramma nessun vaso si è rotto per un livello di energia minore o uguale a 0,1 J, il livello minimo di energia con cui si ha rottura è di 0,15 J, mentre il livello massimo è di 0,8 J con percentuali rispettivamente del 8,3% e del 4,2%.

4.4 2 agosto:



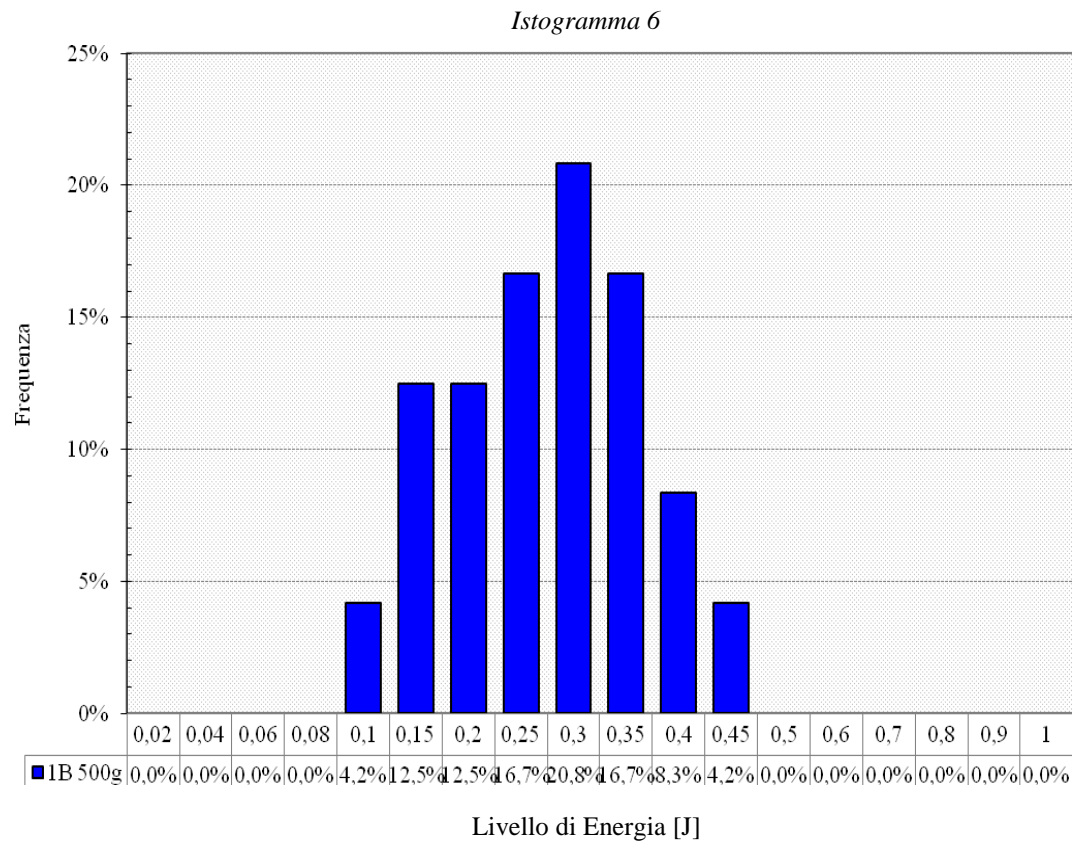
Come si vede sopra nessun vaso si è rotto ad un livello di energia minore od uguale a 0,04 J, il livello di energia di rottura minimo è 0,06 J con cui si rompe l' 8,3% dei manufatti, il livello massimo di energia è 0,6 J, livello a cui si rompe l'8,3% dei vasi.

4.5 3 agosto:



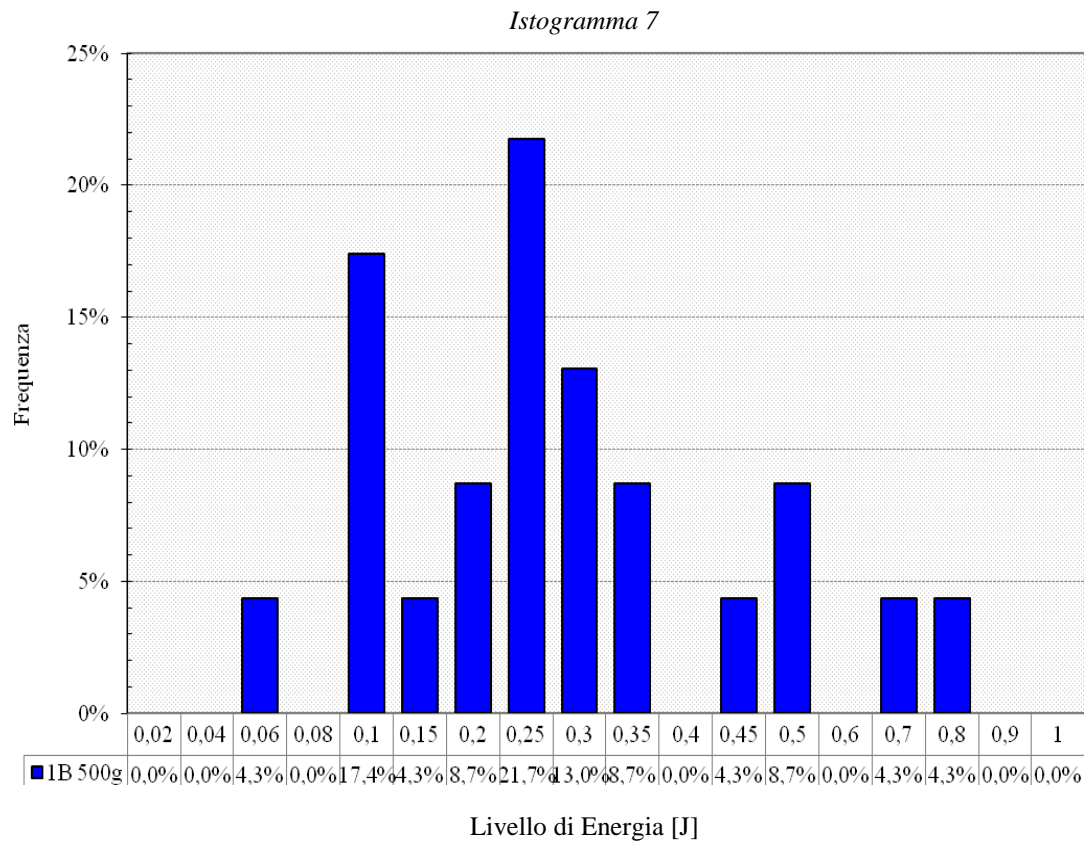
Dall'istogramma si nota che nessun vaso si rompe ad un livello di energia minore od uguale a 0,04 J, il livello di energia minimo a cui si registra una rottura è di 0,06 J (4,3%), mentre il livello massimo è di 0,6 J (4,3%).

4.6 4 agosto:



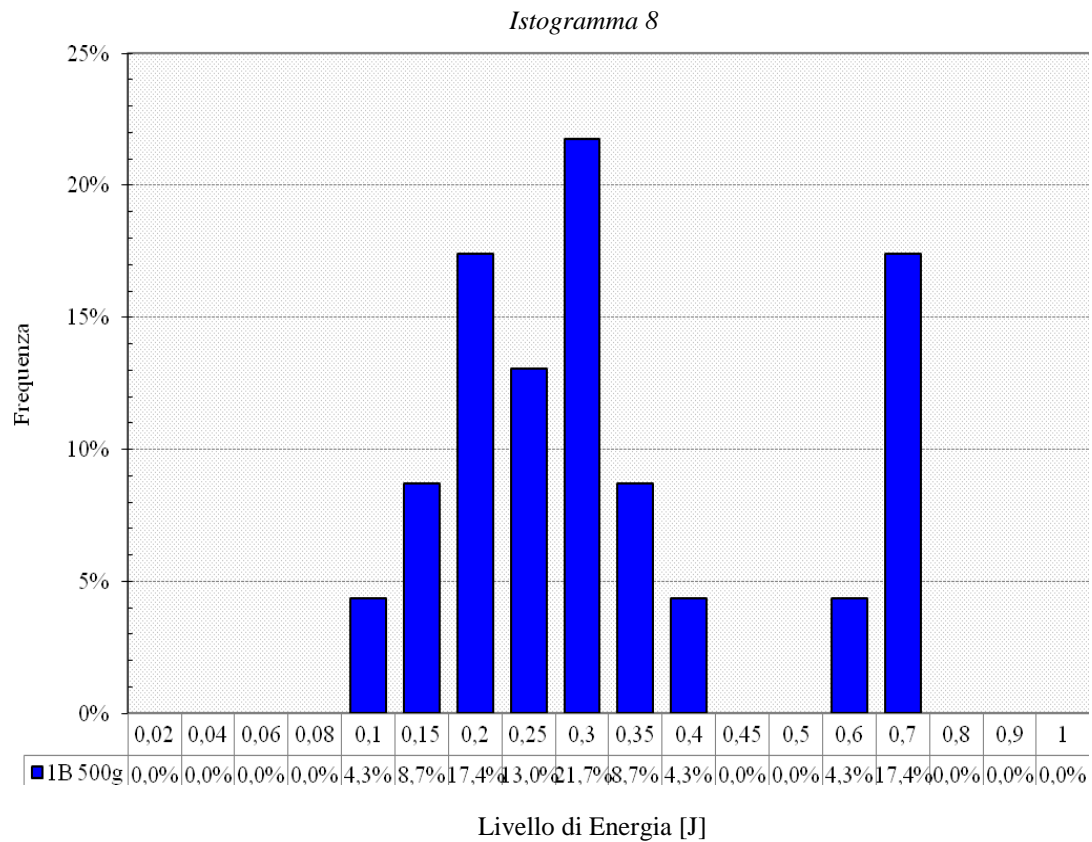
Rispetto agli istogrammi precedenti, si nota subito che i valori sono racchiusi in un intervallo minore, infatti il livello minimo di energia (0,1 J) a cui si rompe il 4,2% di vasi e il livello massimo (0,45 J) a cui si rompe il 4,2% dei vasi, risultano rispettivamente più alto e più basso rispetto ai casi precedenti.

4.7 5 agosto:



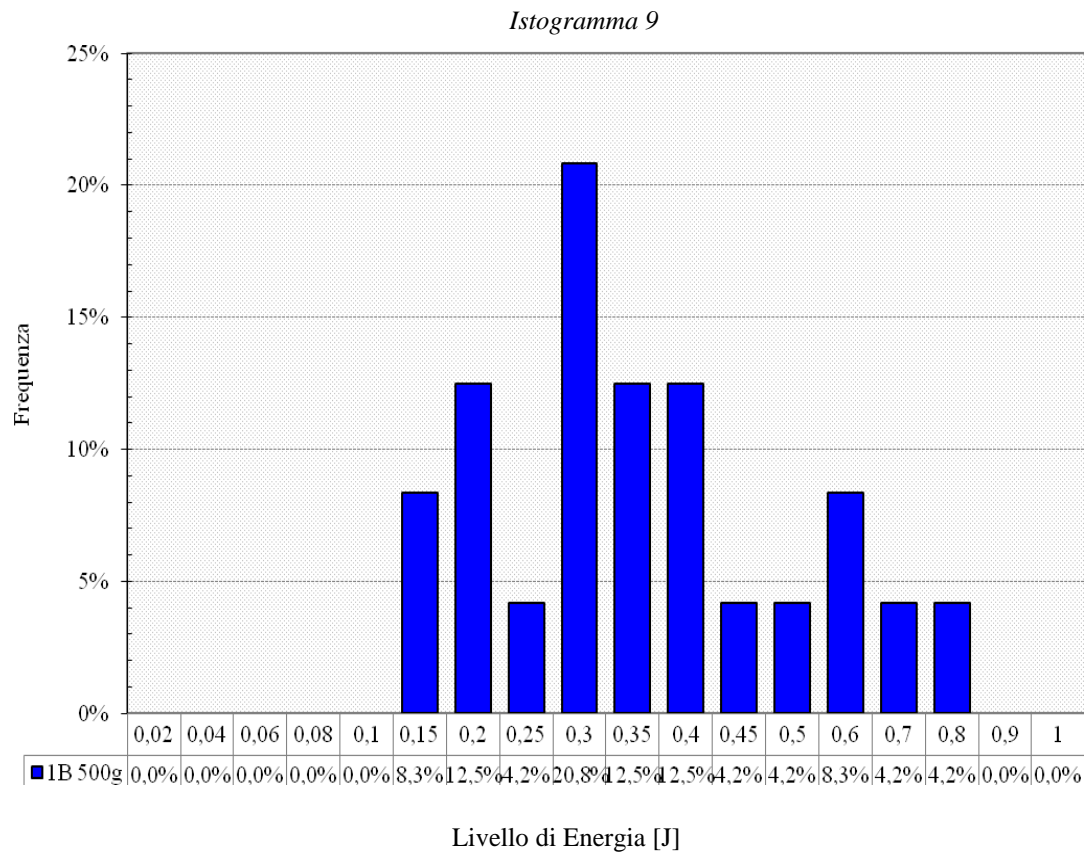
Come si nota dall istogramma, nessun vaso si rompe ad un livello di energia minore od uguale a 0,04 J, il livello di energia minimo a cui si registra una rottura è di 0,06 J (4,3% del totale), mentre il livello di energia massimo è relativamente più elevato rispetto ai casi precenti (0,8 J) a cui si rompe il 4,3% dei manuffatti.

4.8 8 agosto:



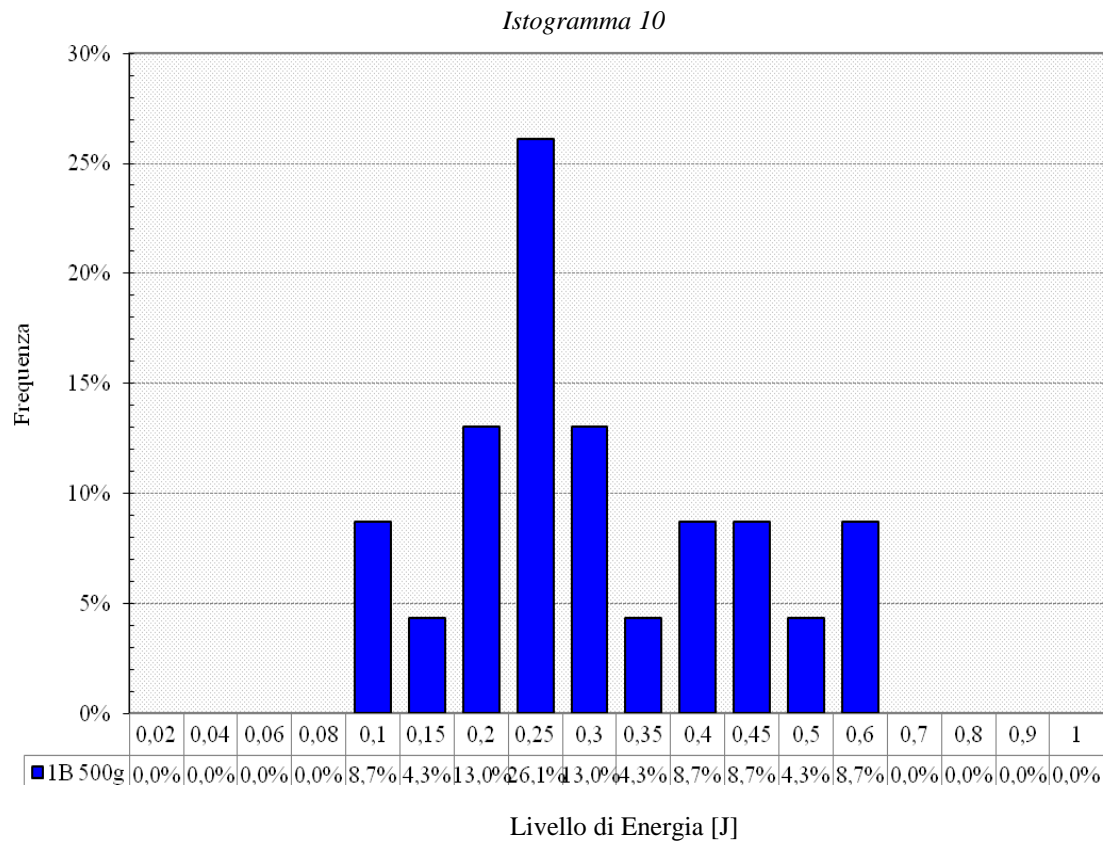
Questo istogramma presenta una distribuzione atipica, infatti salta subito all'occhio la frequenza di rotture che si registra al livello massimo di energia (0,7 J) che è del 17,4%, il livello minimo di energia a cui si registra una rottura è di 0,1 J (4,3%), inoltre nell'intervallo tra 0,45 J e 0,5 J estremi compresi non si registra alcuna rottura.

4.9 9 agosto:



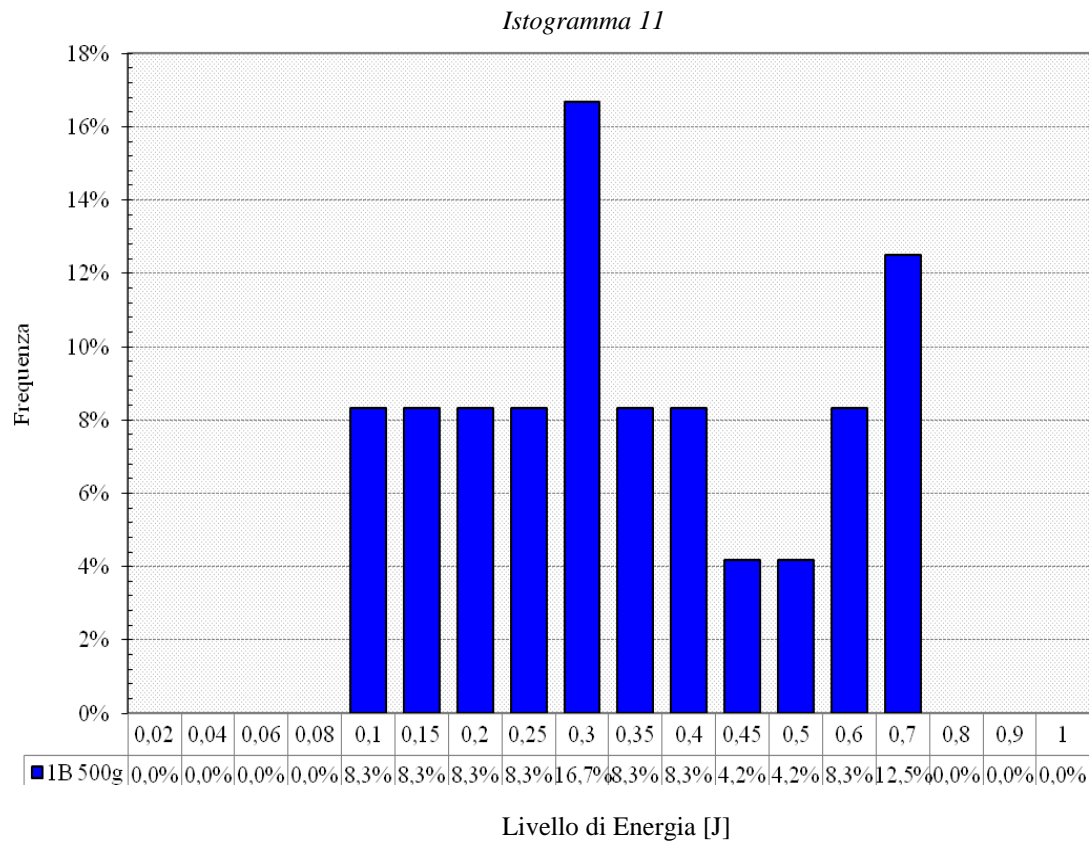
Dall'istogramma si vede che nessun manufatto si rompe ad un livello di energia minore od uguale a 0,1 J, il livello minimo di energia a cui si registra una rottura è di 0,15 J, livello in cui si rompe l' 8,3% del totale dei vasi; il livello massimo di energia invece è di 0,8 J, in cui si rompe il 4,2% del totale dei vasi.

4.10 10 agosto:



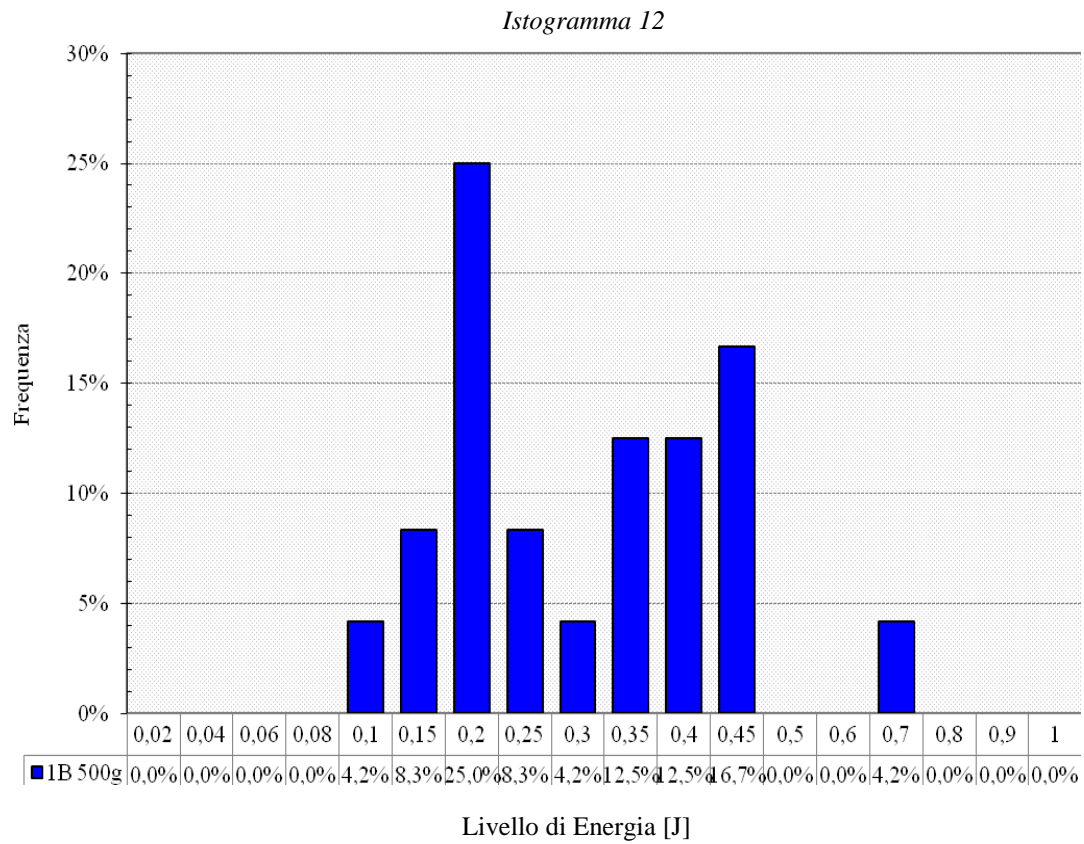
Dall' istogramma si vede che nessun vaso si rompe ad un livello di energia minore od uguale a 0,08 J, il livello minimo di energia a cui si registra una rottura è di 0,1 J (8,7% del totale), mentre il livello massimo è di 0,6 J (8,7% del totale).

4.11 11 agosto:



Questo istogramma presenta una distribuzione abbastanza omogenea, si nota subito che per livelli di 0,1 J, 0,15 J, 0,2 J e 0,25 J la frequenza di rottura è identica (8,3%), il livello di energia massimo è di 0,7 J, livello a cui si rompe il 12,5% dei vasi totali.

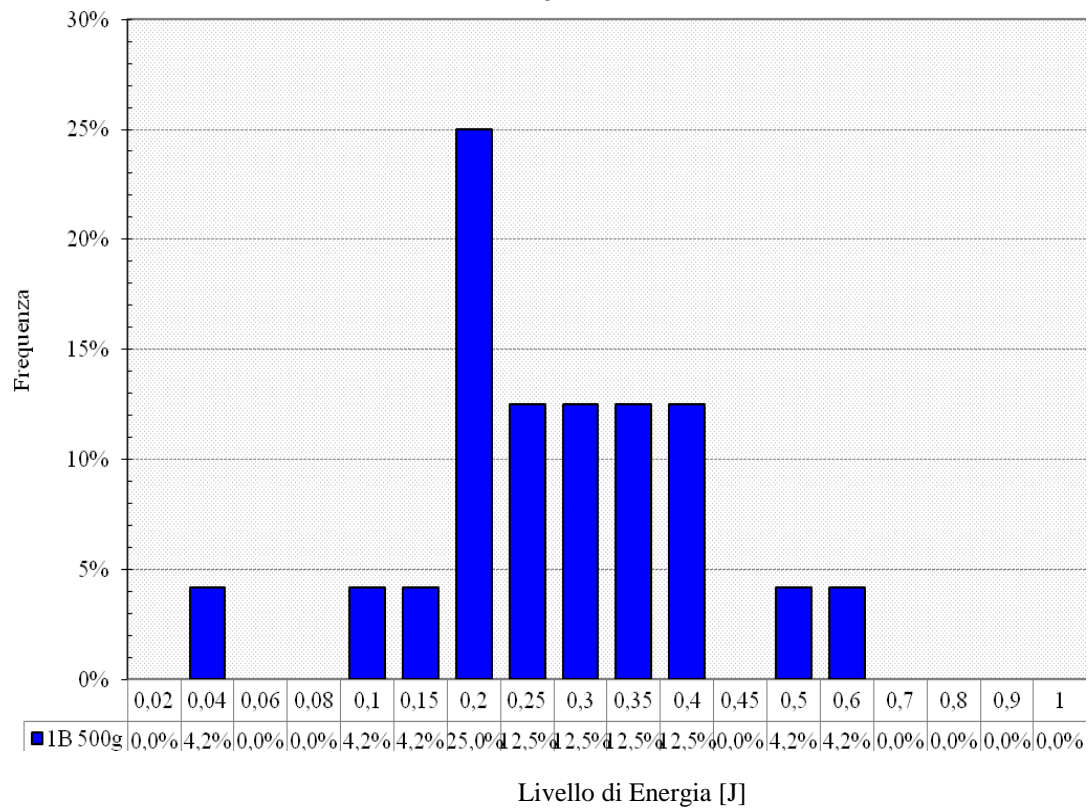
4.12 13 agosto:



Dall'istogramma si vede che nessun manufatto si rompe ad un livello di energia minore od uguale a 0,08 J, il livello minimo a cui si registra una rottura è di 0,1 J (4,2% del totale), mentre il livello massimo è di 0,7 J (4,2% del totale).

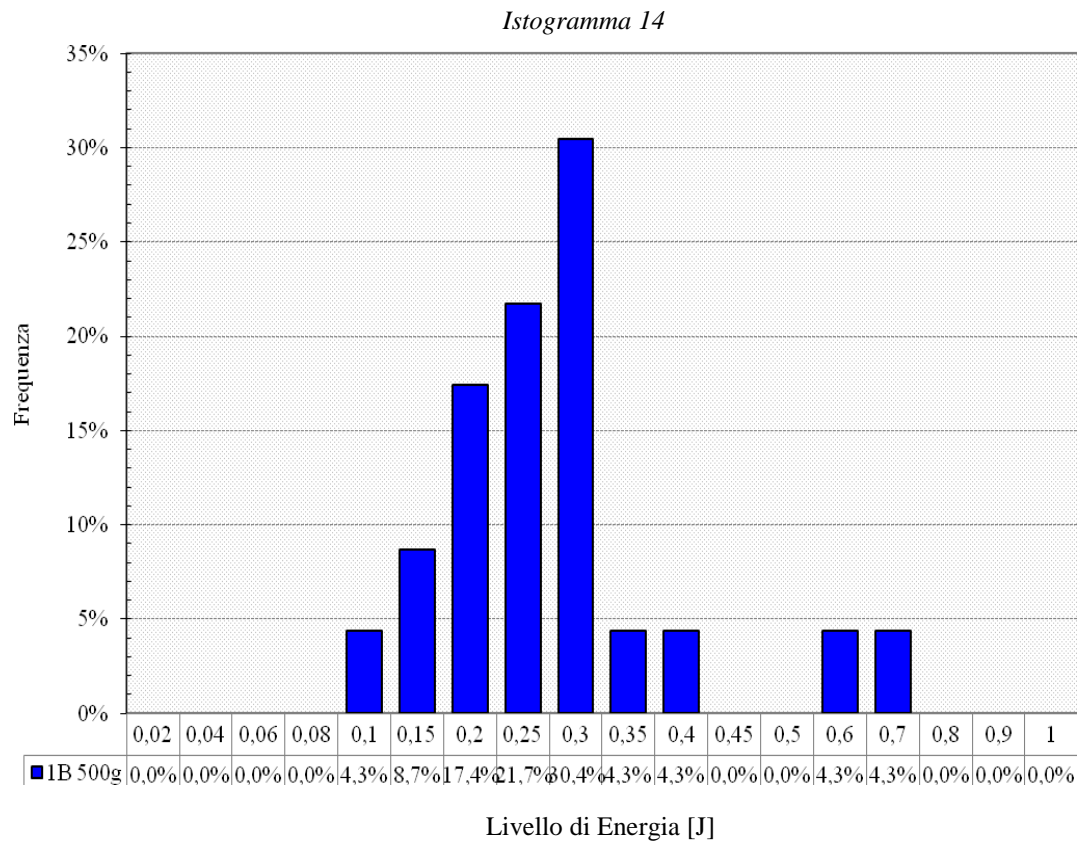
4.13 22 agosto:

Istogramma 13



Dall'istogramma si nota che il minimo livello di energia a cui si registra una rottura è di 0,04 J (4,2% del totale), mentre il livello massimo di energia è di 0,6 J, livello a cui si rompe il 4,2% del totale dei vasi.

4.14 23 agosto:



Dall' istogramma si nota che nessun vaso si rompe ad un livello di energia minore od uguale a 0,08 J, il livello minimo a cui si registra rottura è di 0,1 J (4,3% del totale), mentre il livello massimo di energia è di 0,7 J a cui si rompe il 4,3% dei manufatti.

5 STATISTICA DI WEIBULL:

5.1 Cenni teorici:

Nella produzione industriale, come descritto precedentemente, la presenza di difetti può portare ad una rottura del contenitore; ad esempio, in una popolazione di n contenitori di vetro ci sarà una certa percentuale di rotture; avremo quindi una probabilità di sopravvivenza che in relazione al costo del manufatto può essere accettabile o meno. Un ingegnere svedese, Waloddi Weibull, per primò ha formulato un approccio statistico che consente di identificare una probabilità di sopravvivenza $P_s(V_0) = (1-P_R)$ come la frazione di campioni uguali di volume V_0 , che sopravvivono ad un carico σ :

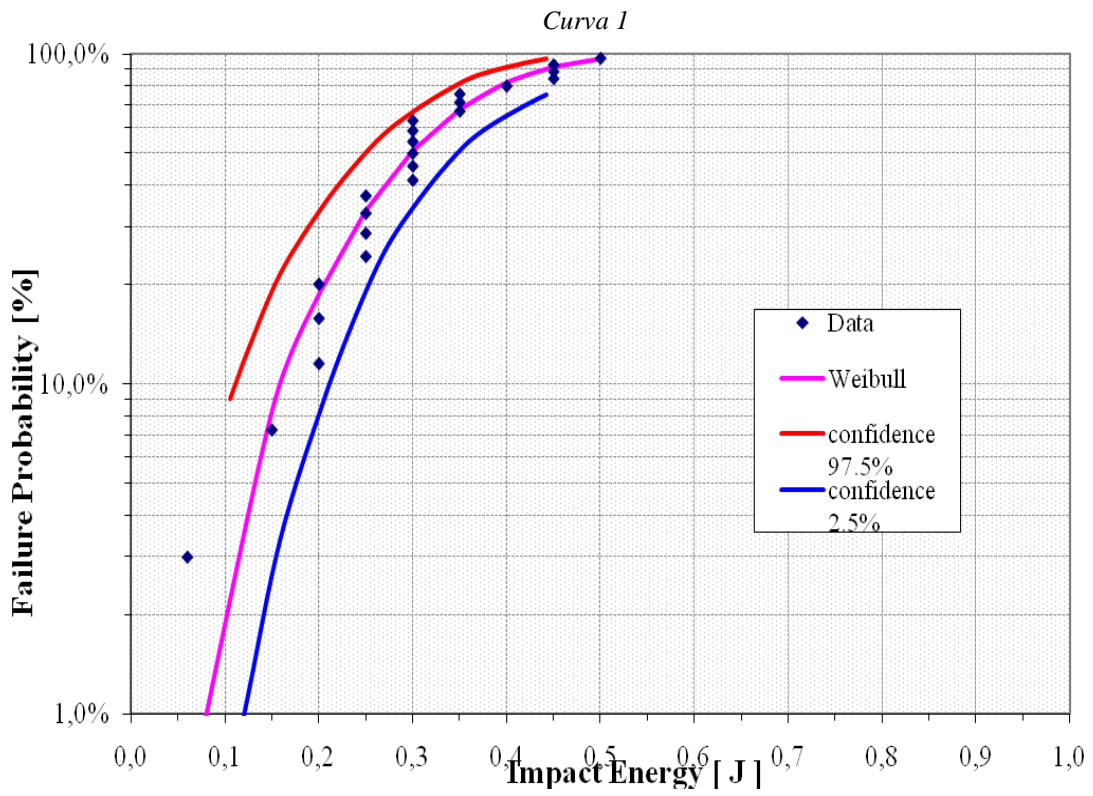
$$P_s(V_0) = e^{[-(\sigma/\sigma_0)^m]} \quad (3)$$

Dove m è un parametro detto modulo di Weibull, e σ_0 un parametro di normalizzazione. Nel caso in cui $\sigma=0$ $P_s(V_0)=1$, visto che tutti i campioni sopravviveranno. Per sforzi molto grandi però, tutti i campioni saranno rotti, ovvero $P_s(V_0)=0$.

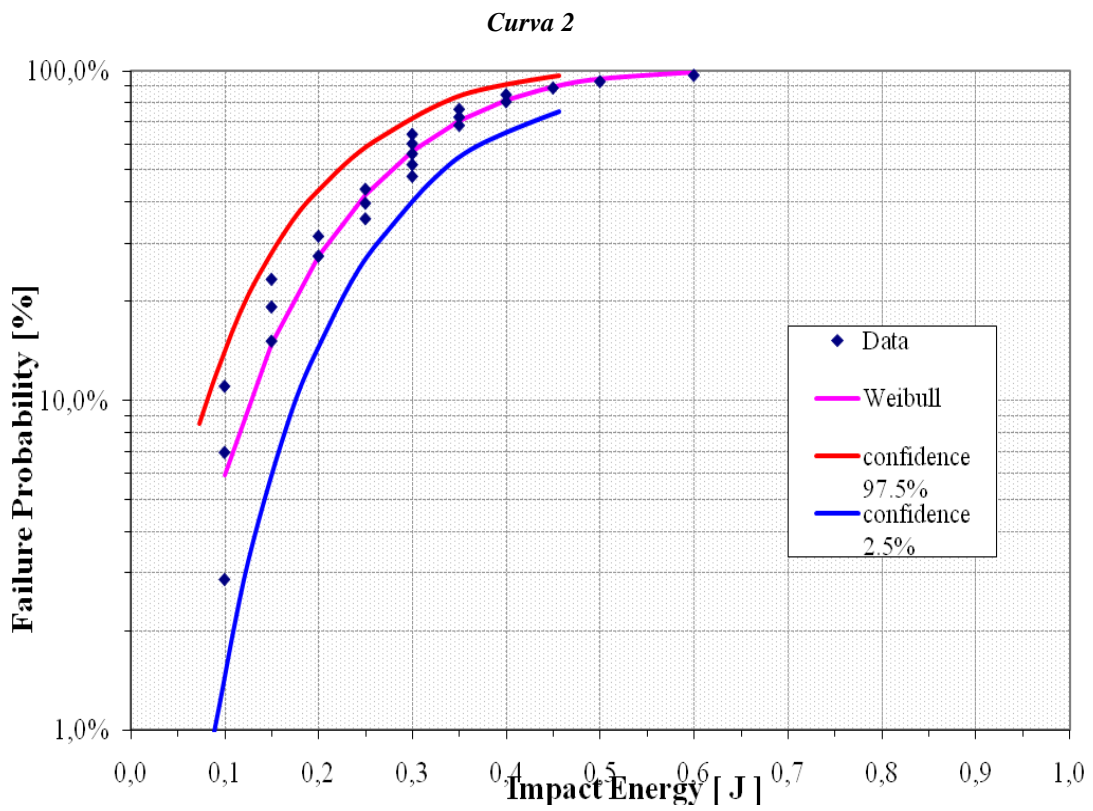
Esaminando vari materiali e i relativi valori di m , sarà evidente che materiali con m basso hanno una forte probabilità di rottura anche a carichi bassi, materiali con m elevato, invece, avranno una probabilità di sopravvivenza molto elevata. Si può quindi facilmente apprezzare la diversa affidabilità dei materiali al variare di m così da poter monitorare costantemente e correggere la resistenza di un materiale.

Di seguito si è voluto approfondire lo studio sulla resistenza all' impatto applicando la statistica di Weibull per ogni giorno di produzione graficando la probabilità di rottura in funzione del livello di energia al quale è sottoposto il contenitore di vetro.

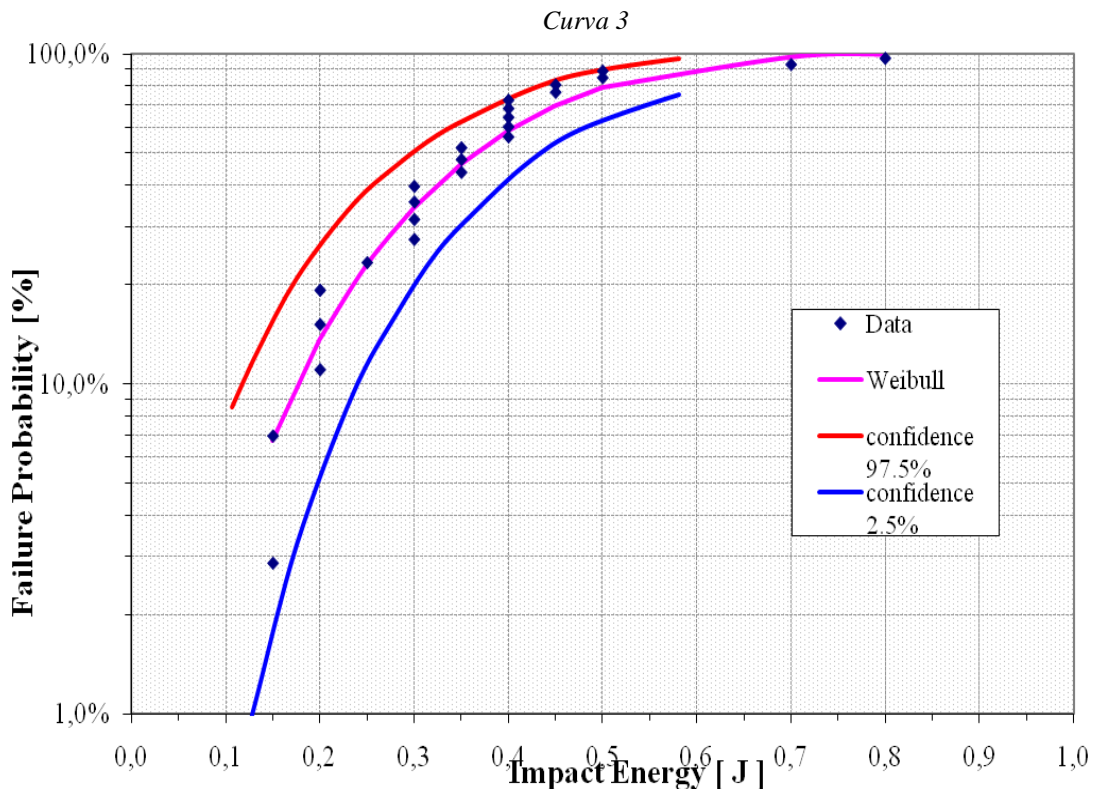
5.2 30 luglio:



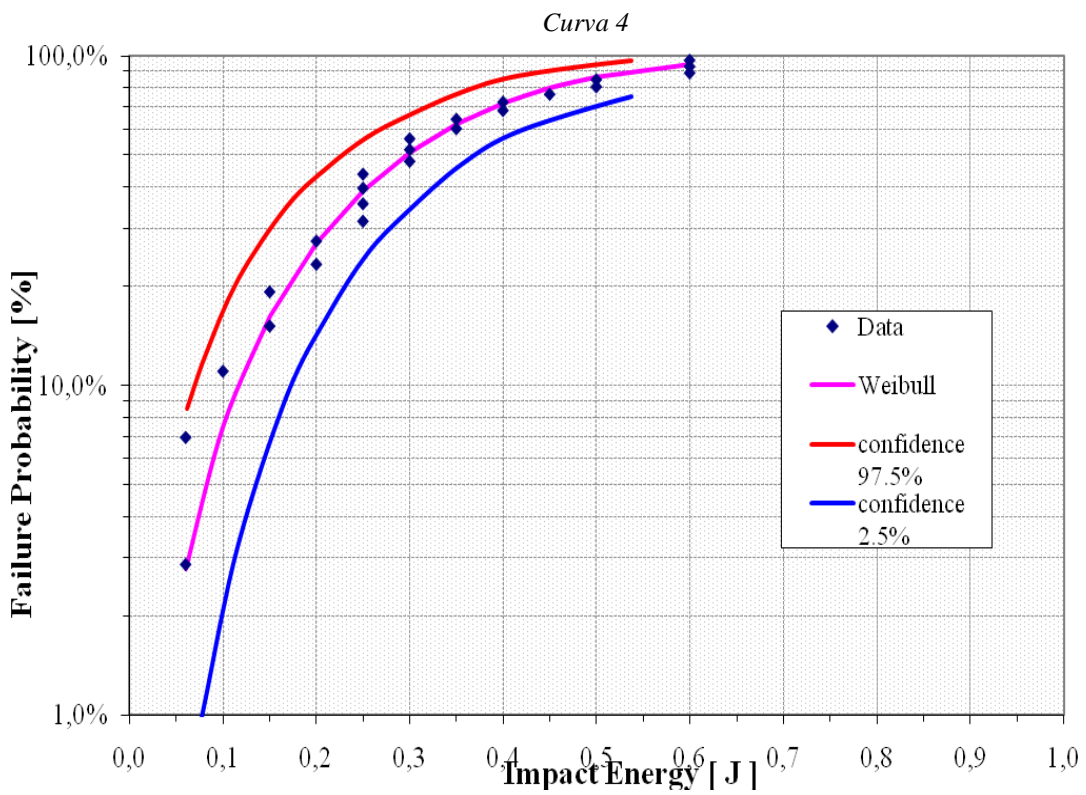
5.3 31 luglio:



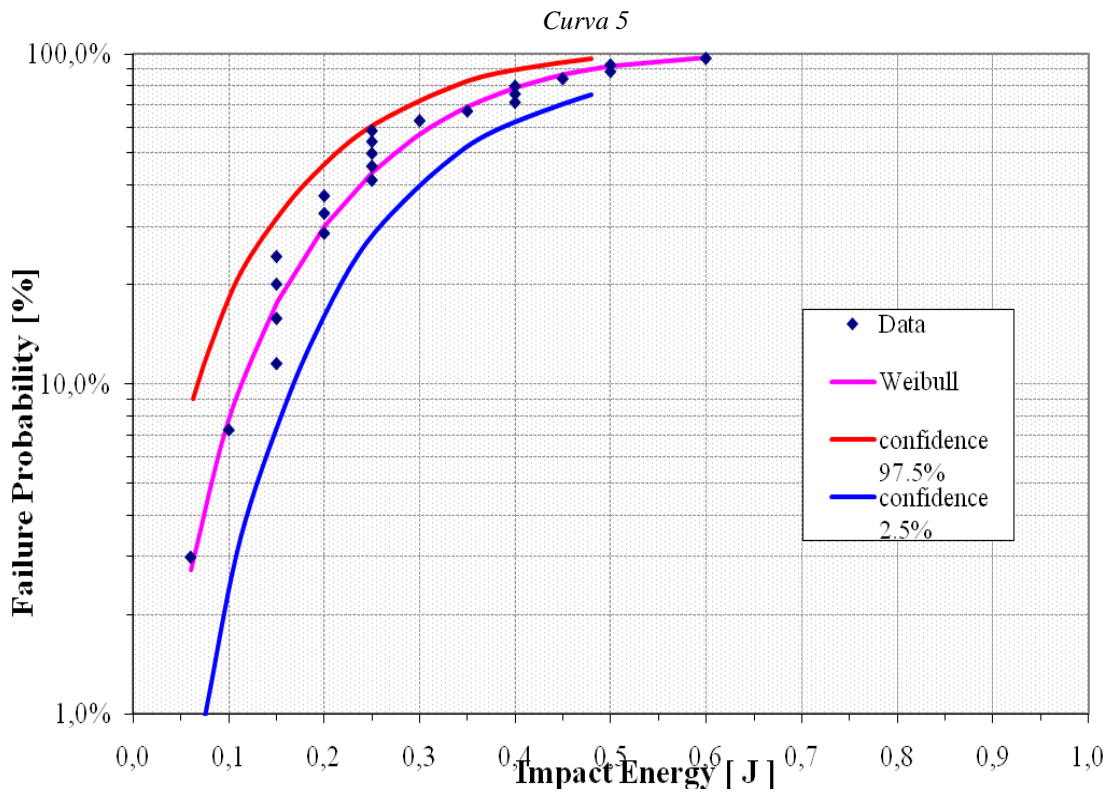
5.4 1 agosto:



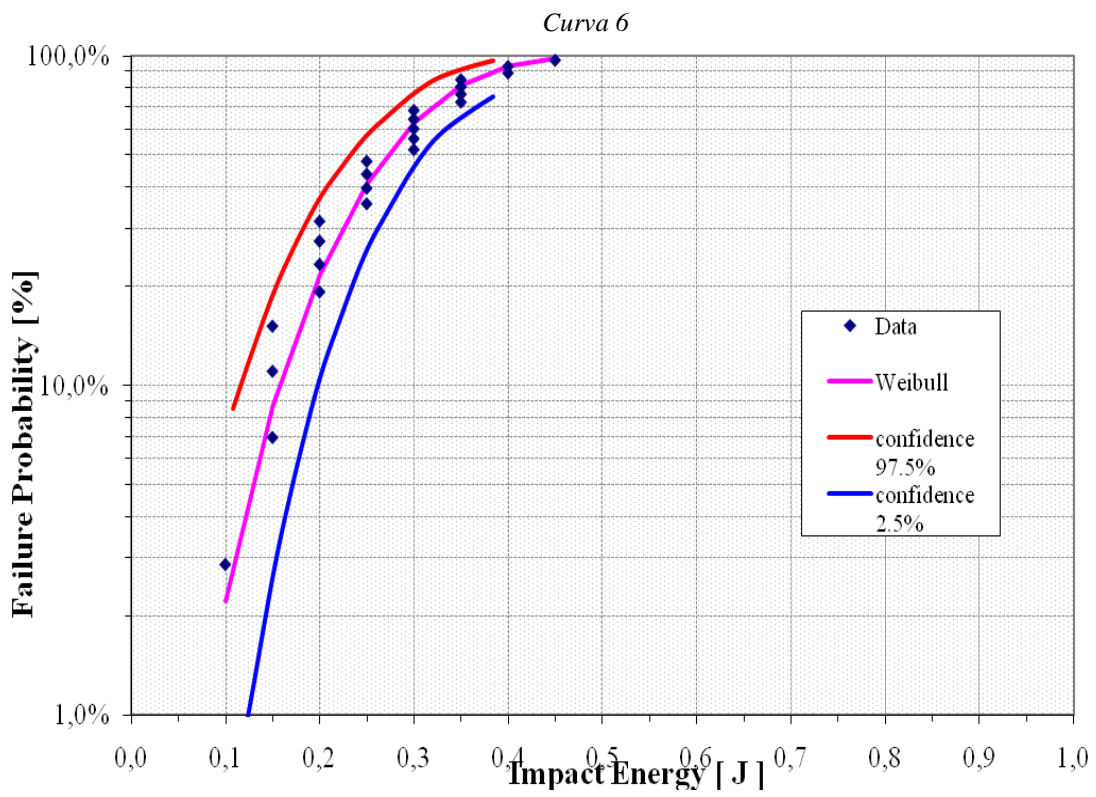
5.5 2 agosto:



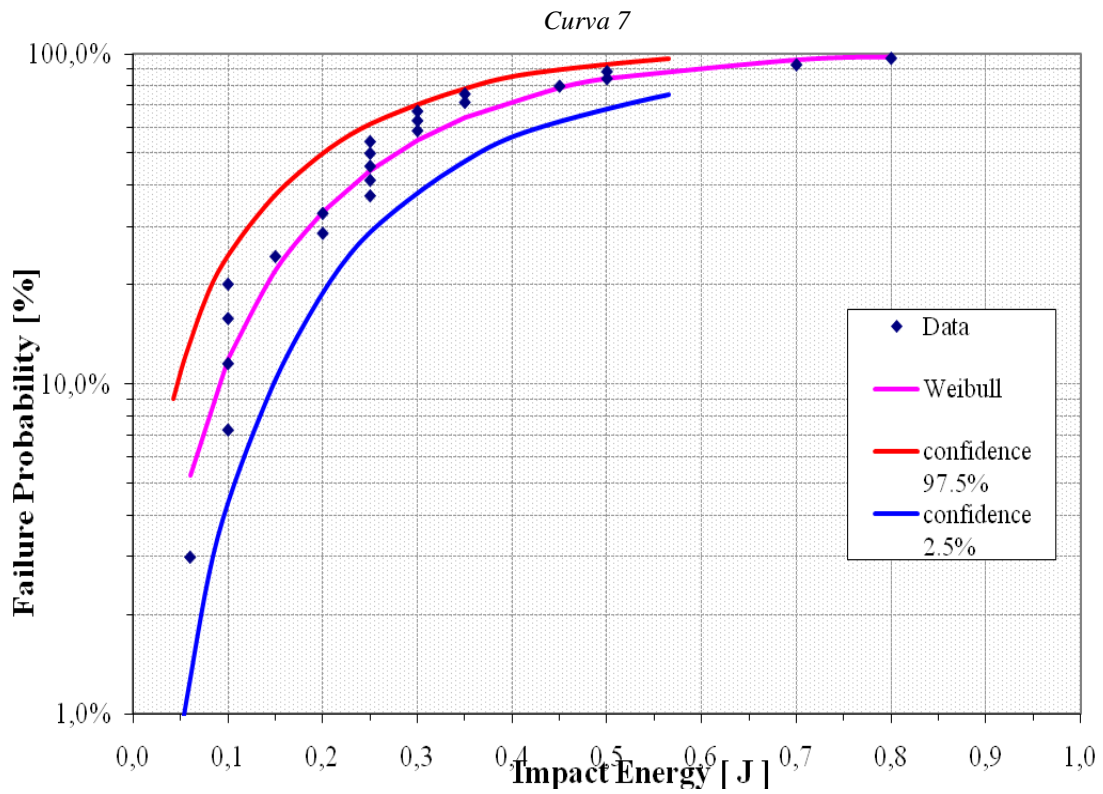
5.6 3 agosto:



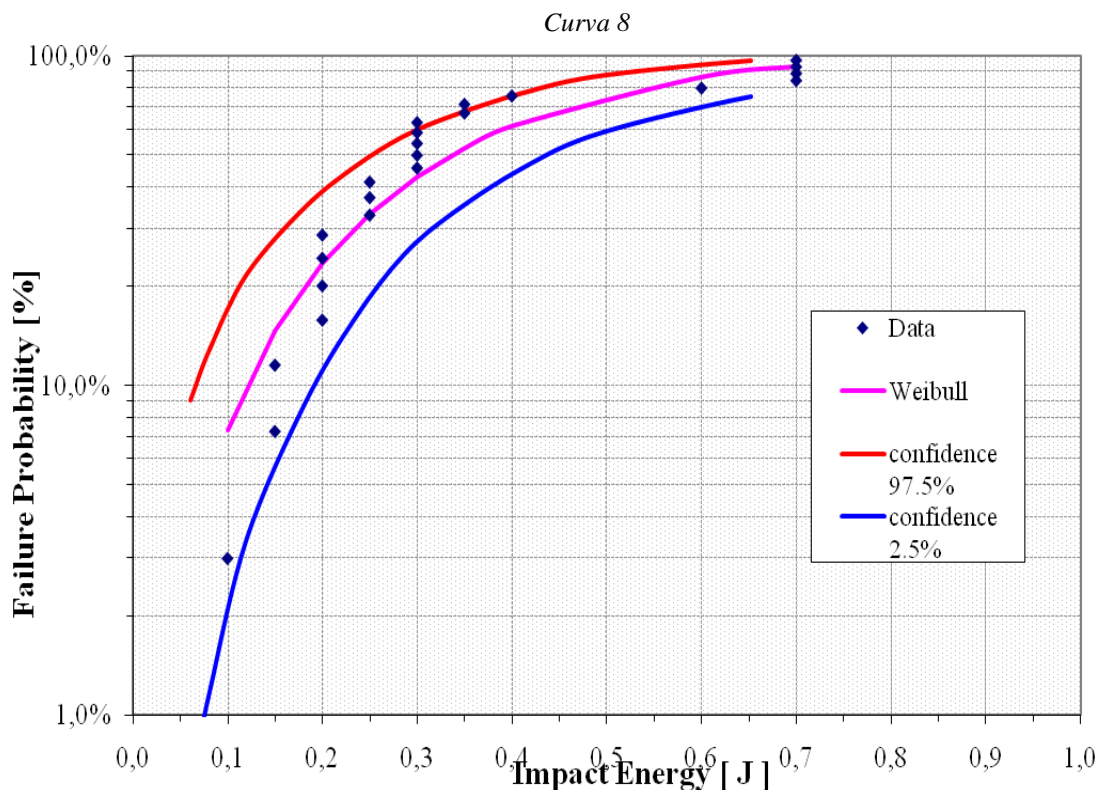
5.7 4 agosto:



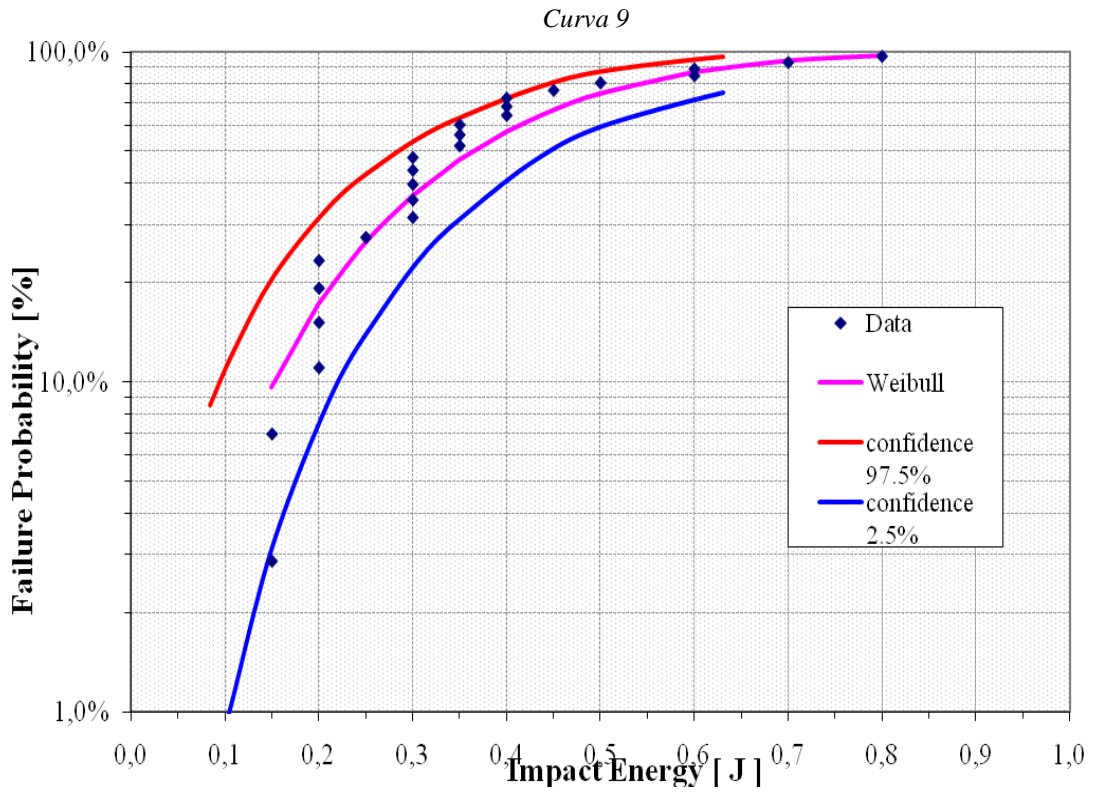
5.8 5 agosto:



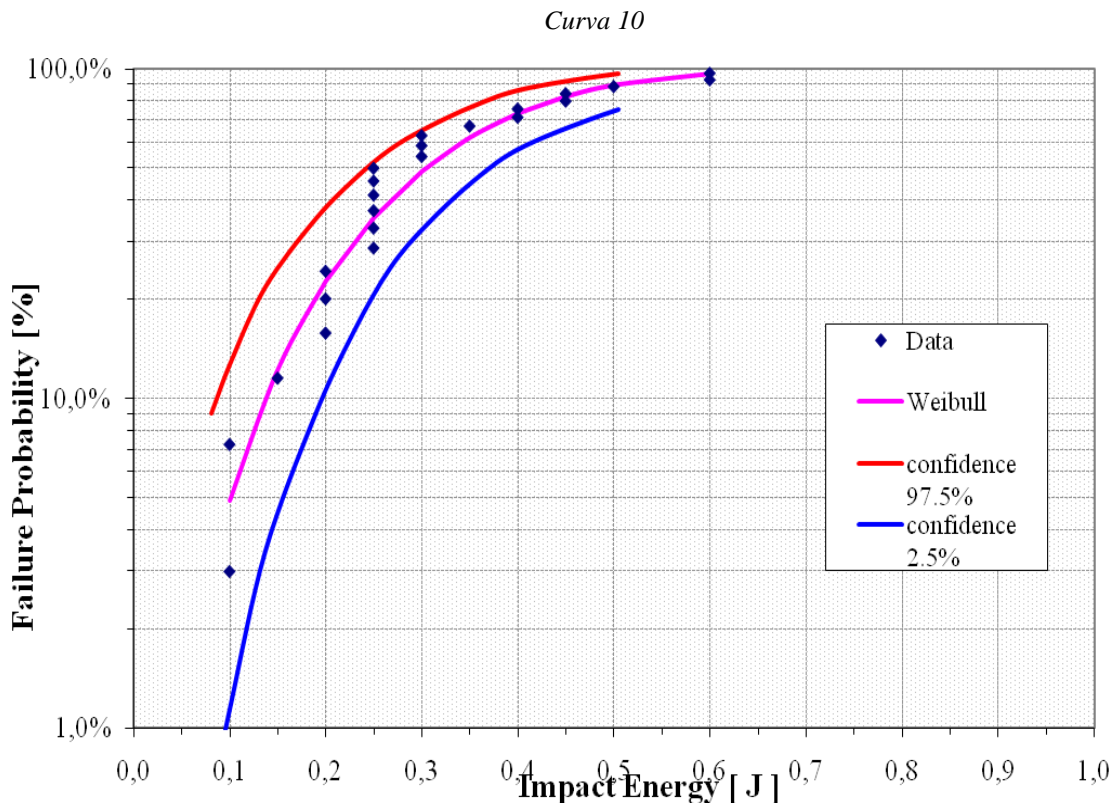
5.9 8 agosto:



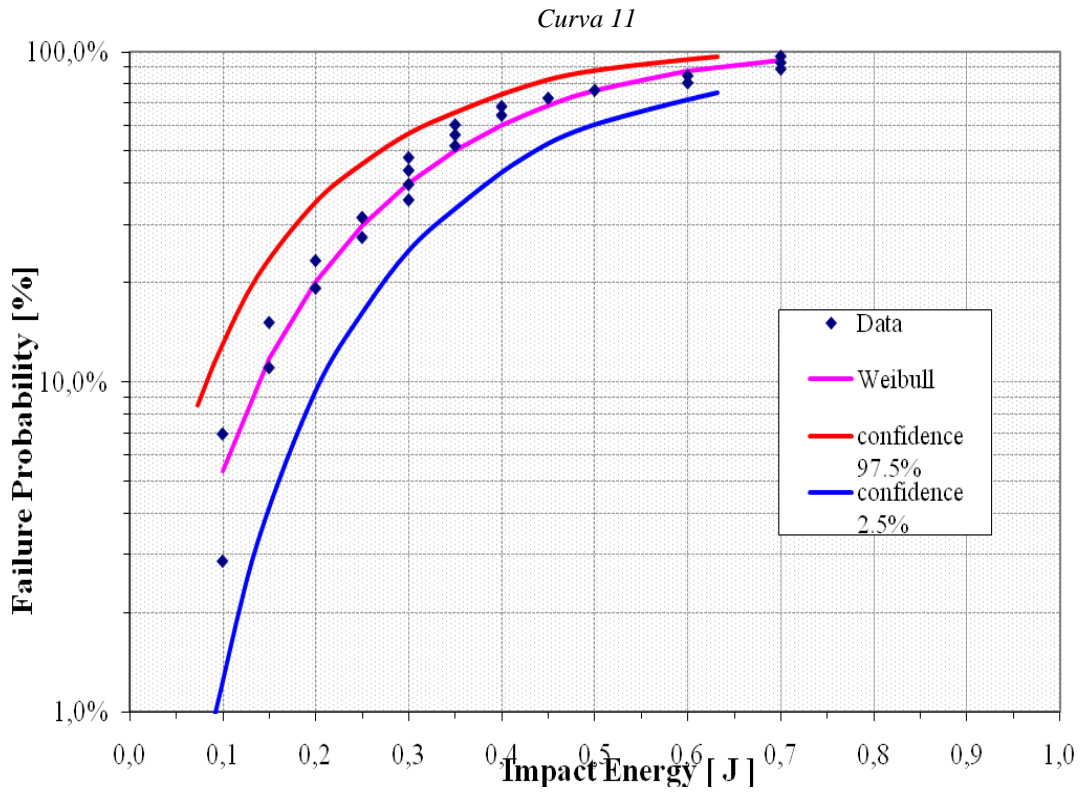
5.10 9 agosto:



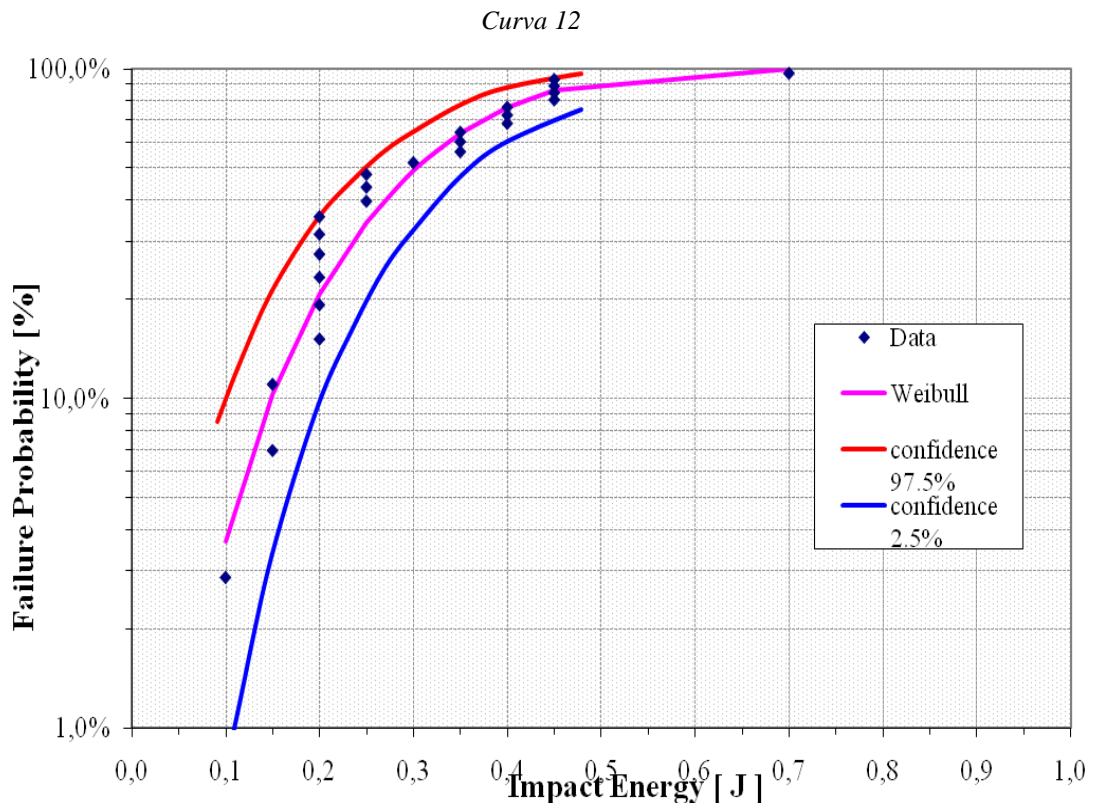
5.11 10 agosto:



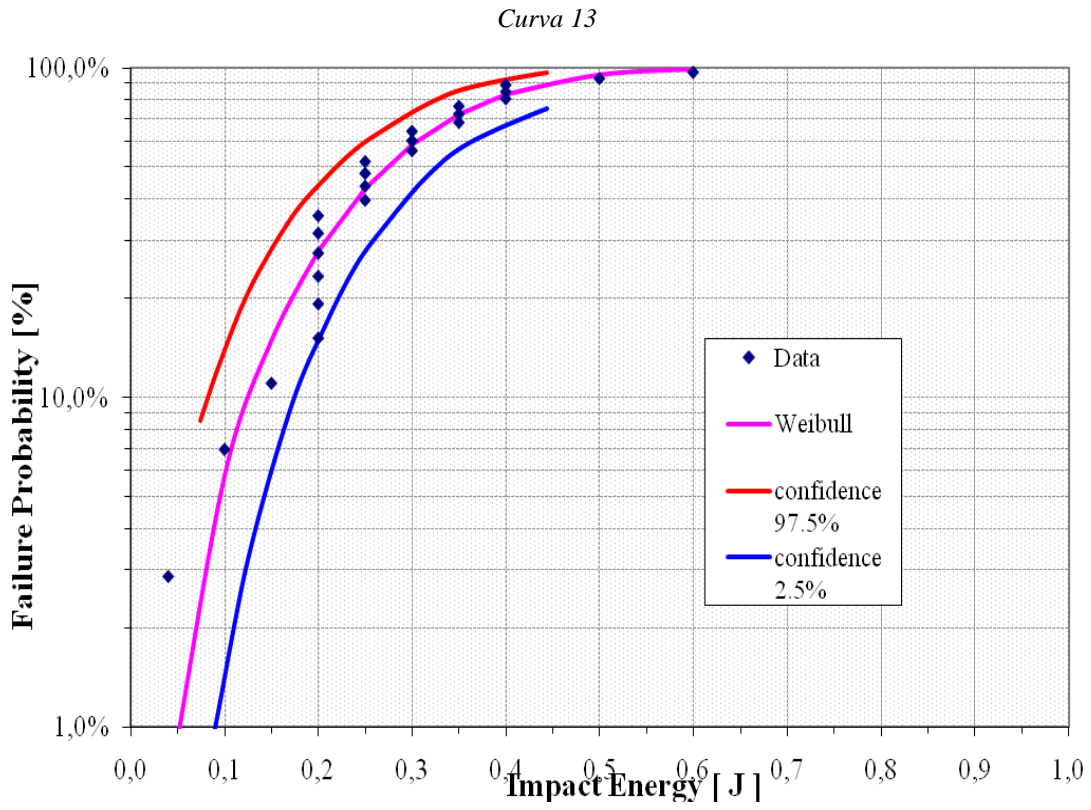
5.12 11 agosto:



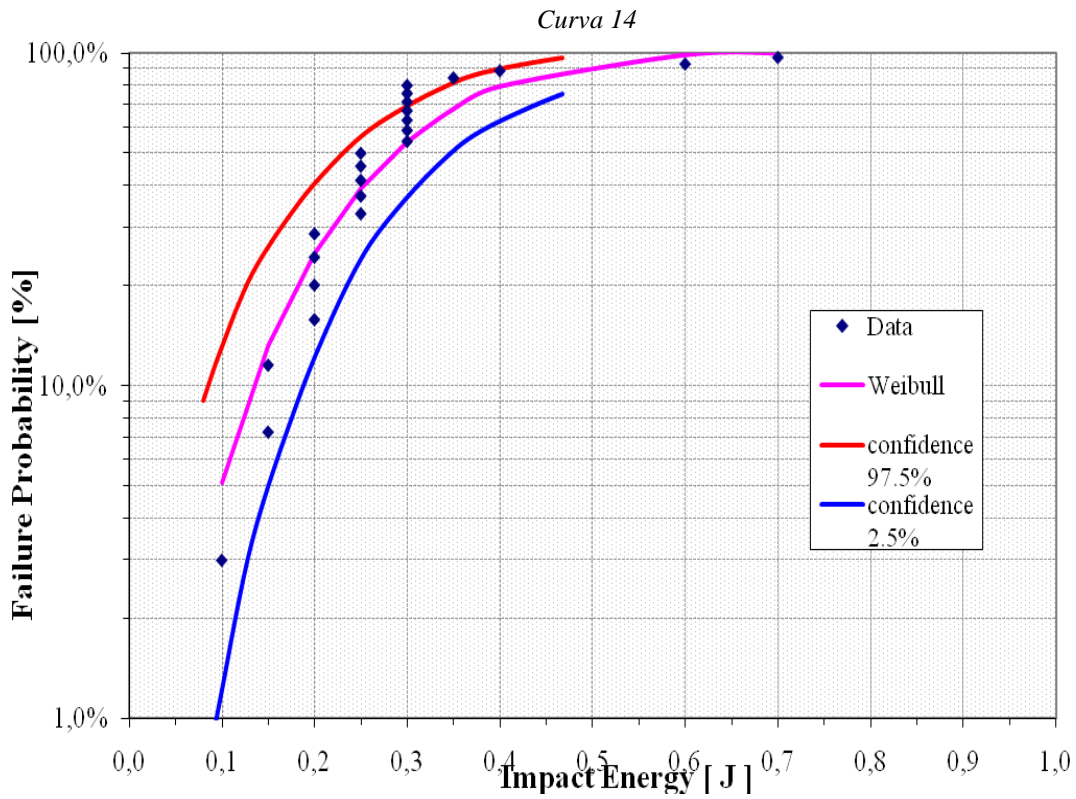
5.13 13 agosto:



5.14 22 agosto:



5.15 23 agosto:



6 ANALISI STAMPI:

Analizzando la resistenza all'impatto per ogni stampo e per ogni giorno di produzione possiamo notare il trend che ha ogni stampo nei giorni di produzione; per ragioni di ordine si sono traslate le varie funzioni una rispetto all'altra al fine di evidenziare eventuali trend comuni:

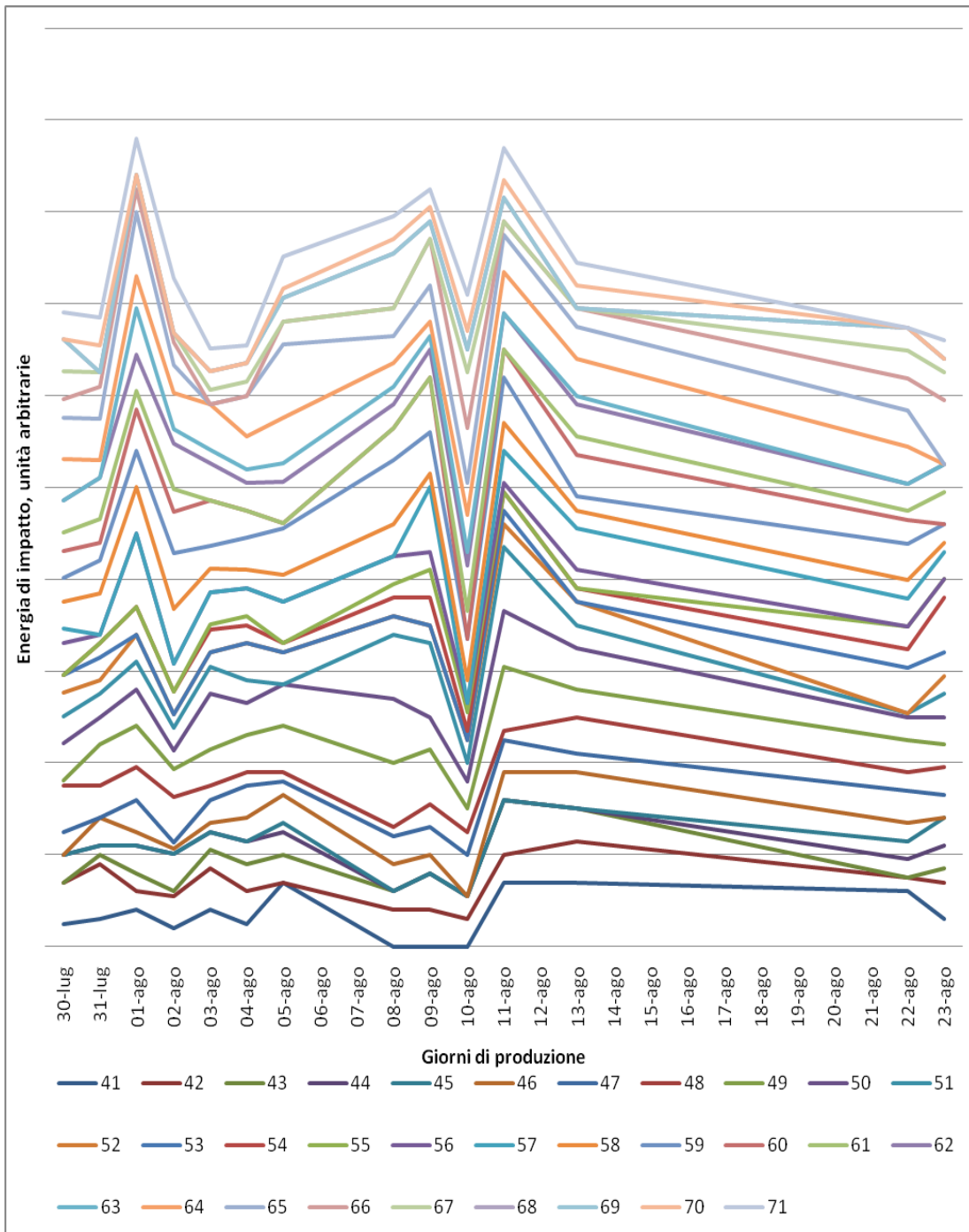


Grafico 1: comparazione stampei

Osservando il grafico si notano subito alcuni giorni in cui c'è un forte trend negativo o positivo; ad esempio tra il 31 luglio e il 1 agosto tendenzialmente tutti gli stampi producono contenitori di vetro con una resistenza all'impatto elevata. Il 10 agosto invece, si nota un crollo della resistenza all'impatto pressochè in tutti gli stampi e, dopo tale picco negativo si assiste ad un nuovo miglioramento seguito da una fase di circa 10 giorni in cui la resistenza sembra diminuire molto lentamente.

7 CONCLUSIONE:

Quanto esposto nell'elaborato ha cercato di dimostrare come tutti gli stampi destinati alla produzione industriale del vaso di vetro in esame, producano vasi con resistenze all'impatto comparabili; da questo si può facilmente dedurre che il numero di stampo non ha una grossa influenza sulla resistenza. Il citato *grafico n. 1* mette con chiarezza in evidenza che la resistenza all'impatto, più che dal numero di stampo, è influenzata dal giorno di produzione e quindi da problematiche relative al fuso come ad esempio un calo di viscosità o alla qualità della materia prima. Questa contingenza è sostenuta anche confrontando l'analisi statistica di Weibull per ogni giorno di produzione, infatti si nota dai grafici un picco negativo attorno all'11 agosto e un picco positivo attorno al 1 agosto.

Tendendo quindi a migliorare la resistenza all'impatto della produzione, alla luce di quanto esposto, non sarà quindi prioritario controllare eventuali problematiche negli stampi, bensì monitorare fattori diversi come la qualità della materia prima o la viscosità del fuso che rappresentano variabili che possono tendere a compromettere la qualità del prodotto finito. Infine ritengo sia fondamentale per l'ottenimento di un prodotto di qualità procedere ad un monitoraggio sistematico della temperatura di goccia e delle condizioni di raffreddamento dello stampo.

BIBLIOGRAFIA:

- (1) Sito aziendale: www.zignagovetro.com
- (2) Documenti tecnici Zignago Vetro.
- (3) Dispense didattiche della Stazione Sperimentale del Vetro.
- (4) Disegno tecnico Zignago Vetro.
- (5) www.qualitydigest.com
- (6) Emhart Glass, Glass Container Defects – Causes and Remedies.
- (7) D.L. 3 luglio 1976, n. 451 Attuazione delle direttive del consiglio delle Comunità europee n. 75/10/CEEE relativa al confezionamento in volume di alcuni liquidi in imballaggi preconfezionati e n. 75/107 relativa alle bottiglie impiegate come recipienti-misura.
- (8) M.W. Davis: *Bottle Strength Analysis*, Glass, June 1994.
- (9) A.G. Evans: *Strength degradation by projectile impacts*, J. Am. Ceram. Soc., 56 (1973), pp. 405-409.
- (10) B. Lawn, R. Wilshaw: *Indentation fracture: principles and applications*, J. Mat. Sci., 10 (1975), pp. 1049-1081.
- (11) J.L. Glathart, F.W. Preston: *The Behaviour of glass under impact: theoretical considerations*, Glass Technol., Vol. 9, n° 4 (1968) pp. 89-100.
- (12) Norma italiana UNI9302 contenitori di vetro: determinazione della resistenza all'impatto del febbraio 1988.
- (13) Materiale didattico Prof. Bernardo, sulla statistica di Weibull.