

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

ANALISI DELL'AVANZAMENTO DELLE CRICCHE IN PROVINI SOTTOPOSTI A CARICHI DI FATICA

ANALYSIS OF THE PROGRESS OF THE CRACKS
IN SPECIMENS SUBJECTED TO FATIGUE LOADS

Relatore:

Prof. Marco Sasso

Tesi di laurea di:

Angelo Di Pinti

Correlatore:

Prof. Gianluca Chiappini

Anno Accademico 2018/2019

SOMMARIO

INTRODUZIONE	5
1 LA FATICA.....	7
1.1 GENERALITA' SULLA FATICA NEI METALLI.....	7
1.2 EFFETTO DEL FENOMENO DI FATICA SULLA DURATA DEI COMPONENTI MECCANICI.....	10
1.2.1 TIPOLOGIE DI SOLLECITAZIONI.....	10
1.2.2 SOLLECITAZIONI VARIABILI NEL TEMPO.....	12
1.2.3 ROTTURE PER FATICA.	16
1.3 LIMITE DI FATICA E RESISTENZA A FATICA.....	19
1.3.1 DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA A FATICA E LIMITE DI FATICA.	19
1.3.2 CURVA DEL WÖLER E CURVA DI FRENCH.....	20
1.3.3 DIAGRAMMI DELLA RESISTENZA A FATICA.....	22
1.4 FATTORI CHE INFLUENZANO LA VITA A FATICA.	24
1.4.1 I COEFFICIENTI.	24
1.4.2 CONCENTRAZIONE DEGLI SFORZI E SENSIBILITA' ALL'INTAGLIO.....	28
1.5 METODI DI CALCOLO.	29
1.5.1 CRITERI DI DANNEGGIAMENTO.....	29
1.5.2 COEFFICIENTE DI SICUREZZA A FATICA.....	34
2 IL MATERIALE	35
2.1 GENERALITA' SULL'ALLUMINIO.....	35
2.2 DESIGNAZIONE CONVENZIONALE.....	37
2.2.1 LE LEGHE DI ALLUMINIO.	39
2.3 ALLUMINIO 5754.....	46
2.4 TRATTAMENTO H22.....	47

2.5	I LAMINATI.....	48
2.5.1	ANISOTROPIA PLANARE.....	48
2.6	I PROVINI.....	49
2.6.1	TAGLIO AD ACQUA.....	50
2.6.2	DIFETTI DI LAVORAZIONE.....	51
2.7	CARATTERISTICHE DEL MATERIALE.....	53
2.7.1	PROVA DI TRAZIONE.....	53
3	IL SISTEMA DI ACQUISIZIONE E SUE MODIFICHE.....	57
3.1	LA PIATTAFORMA LABVIEW.....	57
3.2	VIRTUAL INSTRUMENT.....	59
3.2.1	PANNELLO FRONTALE.....	59
3.2.2	DIAGRAMMA A BLOCCHI.....	63
3.2.3	ICONE E CONNETTORI.....	63
3.3	STRUTTURE DI CONTROLLO DEL FLUSSO DI ESECUZIONE.....	65
3.3.1	STRUTTURE FOR LOOP E WHILE LOOP.....	65
3.3.2	STRUTTURE CASE E FLAT SEQUENCE.....	66
3.4	VISION AND MOTION SOFTWARE.....	67
3.5	INTRODUZIONE AL SISTEMA DI ACQUISIZIONE DI BASE.....	68
3.6	“DISTANZA UN PUNTO” E “DISTANZA DUE PUNTI”.....	69
3.7	CRITICITÀ DEI SISTEMI DI ACQUISIZIONE DI BASE.....	77
3.8	IL SISTEMA DI ACQUISIZIONE DEFINITIVO.....	78
3.8.1	IL PANNELLO FRONTALE.....	78
3.8.2	DIAGRAMMA A BLOCCHI.....	91
4	ESECUZIONE DELLA PROVA E RACCOLTA DATI.....	101
4.1	INTRODUZIONE.....	101
4.2	PREPARAZIONE DEL PROVINO.....	102
4.3	ALLESTIMENTO DELLA MACCHINA.....	104

4.4	AVVIAMENTO DELLA PROVA.	107
	CONCLUSIONI.....	110

INTRODUZIONE

Il seguente lavoro di tesi si basa sull'esperienza svolta presso l'Università Politecnica delle Marche, con esattezza all'interno dei laboratori del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche. L'obiettivo posto dall'Università era quello di arrivare a sviluppare, in modo efficiente ed affidabile, un sistema di acquisizione in grado di monitorare, istante per istante, l'avanzamento della cricca all'interno di provini sottoposti a carichi ciclici e contemporaneamente, ottenere un numero di immagini tali da riuscire ad osservare l'avanzamento della cricca, dal suo innesco fino alla rottura per sovraccarico del provino.

Come base di partenza per lo sviluppo di questo sistema, si è partiti da una base preesistente, che è stata poi opportunamente integrata, modificata e adattata per soddisfare le esigenze del caso.

La seguente tesi si articola principalmente in quattro capitoli, tutti caratterizzati da aspetti teorici e pratici, opportunamente combinati tra loro per rendere il più chiaro possibile il lavoro svolto.

Il primo capitolo ha l'intento di descrivere il fenomeno della fatica, trattando le cause che hanno portato alla sua scoperta, gli effetti sull'affidabilità e la sicurezza di componenti meccanici, nonché le teorie che sono alla base della descrizione dei fenomeni di fatica, i fattori influenzanti e le metodologie di calcolo comunemente usate nella progettazione.

Il secondo capitolo si pone l'obiettivo di descrivere in modo esaustivo le caratteristiche del materiale utilizzato, le lavorazioni subite e le possibili criticità derivanti dalle stesse, fondamentali per prevenire e gestire eventuali comportamenti anomali dei provini durante l'esecuzione dei test di laboratorio.

Il terzo capitolo invece, è suddiviso in due parti: la prima parte, nella quale si descrive con approccio generale il sistema di acquisizione cui si è partiti; mentre nella seconda parte, si vanno a descrivere le modifiche effettuate per ottenere un sistema di acquisizione in grado di soddisfare le esigenze richieste. Di questa seconda parte, particolare attenzione sarà rivolta nei confronti dei fattori influenzanti, che hanno reso necessaria l'adozione di strumentazione aggiuntiva, affinché si riuscisse ad eseguire in modo corretto le varie prove. Tenendo comunque in considerazione che, l'aumento della strumentazione utilizzata, rende necessaria ed indispensabile la rettifica dell'intero sistema di

acquisizione preesistente. Inoltre, in quest'occasione vengono poste le basi per le future modifiche, atte a migliorare lo svolgimento dei test e la gestione della grande mole di dati prodotta dagli stessi.

Il quarto ed ultimo capitolo, caratterizzato da un'impronta quasi puramente pratica, descrive prevalentemente l'esperienza di laboratorio. Verranno prese in analisi i processi e le difficoltà rilevate durante la preparazione e lo svolgimento della prova.

Saranno quindi protagonisti di questa parte, il set-up della strumentazione fisica quali: telecamere, sistemi di illuminazione, nonché l'attrezzaggio della macchina servo-pneumatica per le prove di fatica e la preparazione dei relativi provini. Non da meno per quanto riguarda la strumentazione software, verranno di fatti descritti in ordine cronologico, i passaggi che porteranno all'ottenimento di un setting ideale per quanto riguarda: il programma di gestione delle telecamere Pixelink, le funzioni facenti parte della libreria "Vision and Motion" di Labview ed infine il "Virtual Instrument" utilizzato per reperire tutti i dati necessari alla buona riuscita della sperimentazione, anch'esso sviluppato all'interno del programma Labview.

1 LA FATICA

1.1 GENERALITÀ SULLA FATICA NEI METALLI.

La fatica è un fenomeno avente numerose definizioni molto simili tra loro, tra le più significative ne spicca una in particolare, secondo la quale: la fatica è un fenomeno di danneggiamento progressivo, che ha origine in una fenditura microscopica del materiale e che propaga sottoforma di cricca all'interno del componente, sino a raggiungere dimensioni critiche, tali da provocare la rottura per sovraccarico del componente stesso. Il danneggiamento per fatica è un processo legato a fenomeni di micro-deformazioni plastiche localizzate, indotte da sollecitazioni cicliche che, a causa della presenza di micro-intagli e/o discontinuità possono generare sforzi locali superiori al limite di snervamento, anche se il carico applicato esternamente è notevolmente inferiore. In particolare, il danneggiamento per fatica propaga secondo più stadi, con una sequenza ben precisa:

- 1) *L'innescò della frattura*, che avviene prevalentemente sulla superficie del componente, dove vengono a crearsi le condizioni di irregolarità adatte all'innescò.
- 2) *La nucleazione della frattura* è caratterizzata dall'avanzamento dei micro-intagli attraverso un numero sempre crescente di grani, sino al raggiungimento degli 0.1 mm di profondità, oltre i quali la nucleazione termina, dando vita ad una vera e propria cricca. L'avanzamento, durante questa fase, è favorito anche dalla nascita dell'effetto d'intaglio.
- 3) *Propagazione della cricca*, durante questa fase la cricca avanza attraverso i grani cristallini del metallo, secondo due tipologie di comportamento differenti. Inizialmente, la cricca propaga seguendo una traiettoria posta a 45° rispetto alla direzione di massimo sforzo; in seguito invece, tale orientamento viene a modificarsi, assumendo una traiettoria perpendicolare rispetto alla direzione di massimo sforzo, così da generare le caratteristiche linee di spiaggia presenti sulle superfici di frattura.
- 4) *Frattura finale*, l'ultimo stadio dell'intero processo si riduce a pochi istanti, difatti la cricca continua a propagarsi sotto l'azione del carico ciclico, fin tanto che la sezione non raggiunge dimensioni talmente ridotte, da generare uno stato tensionale all'interno del materiale in grado di superare il valore di tensione massima statica. In

definitiva, il componente cede in pochi istanti sotto l'azione del carico, con tutte le conseguenze che una tale rottura comporta.

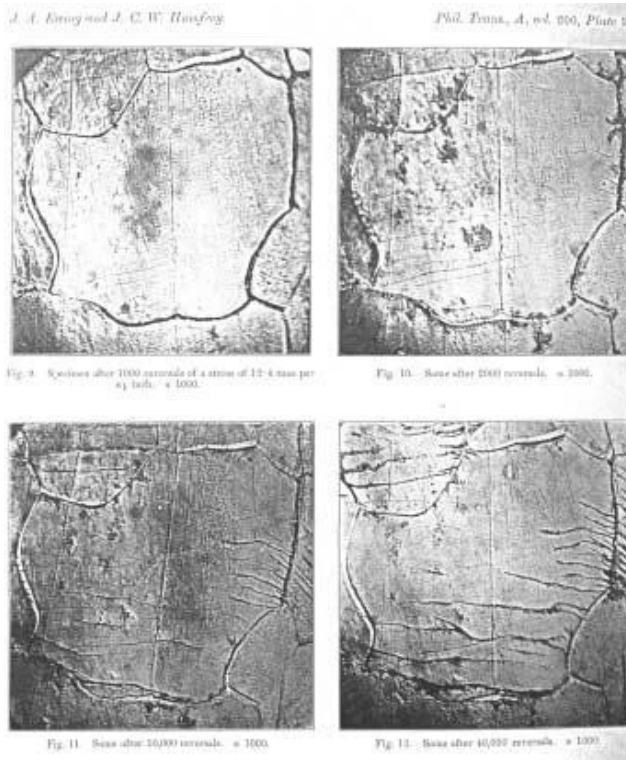


Fig.1.1 Micrografie nelle quali possiamo notare la crescita delle microfratture all'interno del componente all'aumentare del numero di cicli a cui viene sottoposto.

(Ewing & Humfrey, 1903).

Il fenomeno in analisi è causa di circa l'80-90% dei cedimenti che avvengono all'interno di componenti strutturali, molti dei quali con risvolti economici sfavorevoli ed esiti catastrofici. A causa dell'elevata pericolosità nell'insorgenza dei fenomeni di fatica, sin dal XIX secolo, la comunità scientifica investe annualmente notevoli risorse, per approfondire e sviluppare teorie in grado di prevenire in maniera sempre più accurata il fenomeno della fatica.



Fig.1.2 Effetti del cedimento a fatica di uno dei piloni portanti della piattaforma petrolifera "Alexander Kielland" che il 27 Marzo 1980 causò 123 morti.

I primi studi sul fenomeno della fatica vennero effettuati in Germania, nel 1829, per mano dell'ingegnere minerario W.A.J. Albert, il quale effettuò test su catene metalliche sottoposte a carico ripetuto. Negli anni successivi, precisamente tra il 1852 ed il 1870, un altro ingegnere tedesco, August Wöhler, si dedicò allo studio del fenomeno della fatica, ma questa volta in modo schematico e rigoroso, con l'obiettivo di far luce sulle inspiegabili rotture a cui erano soggetti gli assili ferroviari, nonostante i carichi applicati fossero nettamente inferiori rispetto al carico di snervamento del materiale.

Gli studi che ne derivarono, ed il materiale raccolto, permisero di tracciare una serie di curve, basate su approssimazioni statistiche, chiamate "curve del Wöhler" che costituiscono le fondamenta per la progettazione classica a fatica. A seguito dell'analisi delle curve ottenute, è stato possibile individuare un valore di tensione, al di sotto del quale il materiale non risente dell'effetto della fatica, riuscendo a resistere idealmente ad un numero infinito di cicli, che nella pratica comune si attesta intorno ai 100 milioni di cicli, oltre i quali il materiale viene erroneamente definito resistente a vita infinita. Il valore di tensione che delimita teoricamente le due zone, rispettivamente a vita finita e a vita infinita, è chiamato "limite di fatica".

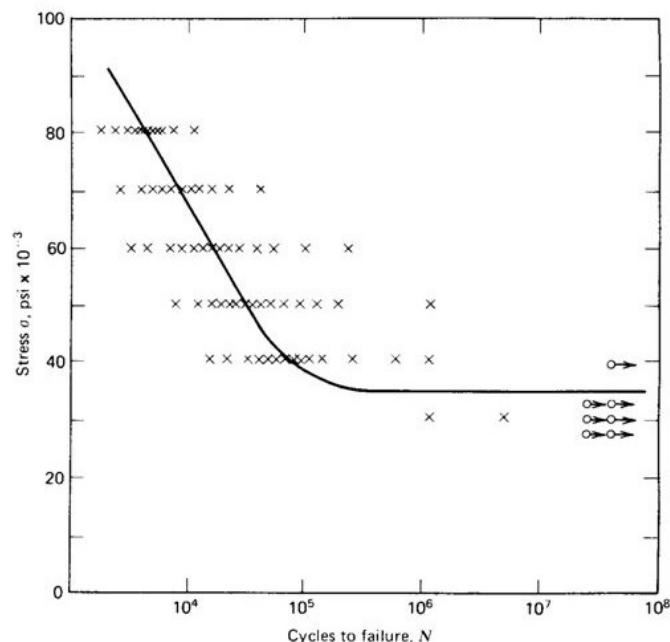


Fig.1.3 *Curva del Wöhler ottenuta per valori assegnati di tensione media. Sulle ascisse troviamo il valore del numero di cicli, mentre sulle ordinate è presente il valore di tensione espresso in MPa.*

1.2 EFFETTO DEL FENOMENO DI FATICA SULLA DURATA DEI COMPONENTI MECCANICI.

1.2.1 TIPOLOGIE DI SOLLECITAZIONI.

A seguito della messa in utilizzo di un elemento costruttivo, questo subisce l'azione dei carichi applicati, i quali devono essere opportunamente distinti in base al tipo di sollecitazione, poiché possono assumere comportamenti diversi nel tempo, generando a loro volta reazioni diverse all'interno del materiale. Per poterli inserire in modo funzionale nel calcolo di progetto, è necessario fare prima una distinzione in base al tipo di sollecitazione ed alle relative conseguenze. Semplificando il problema reale, le sollecitazioni possono essere di due tipologie principali:

-Sollecitazione statica, è l'insieme di tutti i carichi che agiscono sul corpo e la loro distinzione viene effettuata facendo riferimento alla direzione di applicazione del carico rispetto all'asse geometrico principale del solido. La sollecitazione statica è di tipo crescente e viene applicata in modo permanente, costante o ininterrotto, come quella presente all'interno di serbatoi o in elementi accoppiati di carpenteria metallica. Ne fanno parte anche gli sforzi generati dall'effetto della forza centrifuga, ma anche gli sforzi generati dalle forze di spunto o dalle forze frenanti, che si manifestano raramente. Il cedimento che consegue all'applicazione di questa tipologia di carico, si presenta sotto forma di rottura da sovraccarico o da deformazione plastica, rispettivamente a seguito del superamento della resistenza a rottura o del limite di snervamento dell'elemento costruttivo. Volendo effettuare un'ulteriore precisazione, la sollecitazione statica può essere di due tipi:

- *Sollecitazione statica semplice*, se la forza statica agisce lungo un'unica direzione.
- *Sollecitazione statica composta*, se vi è la presenza di più forze agenti sul corpo.

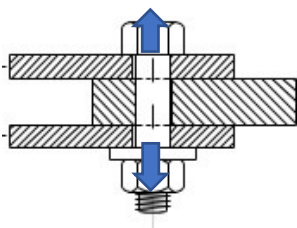


Fig. 1.4 collegamento bullonato sollecitato da carico statico semplice, dovuto allo sforzo assiale indotto dal serraggio del bullone.

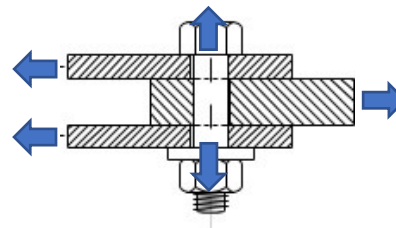


Fig. 1.5 collegamento bullonato sollecitato da carico composto, dovuto allo sforzo assiale indotto dal serraggio del bullone e allo sforzo di taglio indotto dalla lamiera in trazione.

-Sollecitazione di fatica, è l'insieme di tutti i carichi che agiscono sul corpo in modo dinamico, assumendo un andamento oscillatorio nel tempo. Nel caso della sollecitazione dinamica, lo sforzo oscilla tra un valore massimo ed un valore minimo, attorno ad una sollecitazione media riferita al precarico iniziale. Sono soggetti a questo tipo di sollecitazione componenti di macchina quali: assi, alberi, ruote dentate, cuscinetti ed elementi di accoppiamento. Il cedimento che consegue all'applicazione di questa tipologia di carico, si manifesta come una cricca, che aumenta con il numero di cicli e che sfocia con una rottura da sovraccarico finale o con danneggiamento superficiale da fatica da contatto (pitting).



Fig. 1.6 cricca all'interno di un telaio motociclistico in acciaio legato, causata probabilmente dalla presenza di tensioni residue o da alterazioni localizzate della composizione chimico-fisica del materiale.



Fig. 1.7 danneggiamento superficiale da fatica da contatto sulla superficie interna di un cuscinetto a rulli, causata da pressioni di contatto eccessive.

1.2.2 SOLLECITAZIONI VARIABILI NEL TEMPO.

Le tensioni variabili nel tempo spesso assumono la forma di una sinusoide a causa della natura rotante di alcuni organi di macchina. In generale, però, le tensioni possono assumere anche forme piuttosto irregolari; questo è il caso di ciò che avviene all'interno delle protesi medicali.

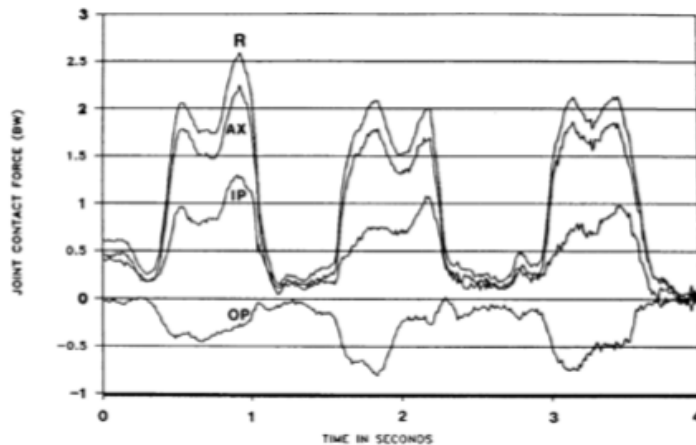


Fig. 1.8 andamento fortemente irregolare delle sollecitazioni all'interno di una protesi d'anca.

-Forme sinusoidali, osservando il comportamento dei componenti al variare della forma della sinusoide, si è compreso che, se il ciclo di un carico presenta massimi e minimi relativi tutti uguali, la forma del ciclo non è importante e per effettuare la caratterizzazione dello stesso, è sufficiente conoscere l'entità della tensione massima e di quella minima.

L'andamento delle sollecitazioni sinusoidali, può essere sempre ricondotto a uno dei seguenti casi fondamentali:

- a) *Sollecitazione alternata simmetrica (tensione media nulla).*
- b) *Sollecitazione alternata asimmetrica.*
- c) *Sollecitazione oscillante dall'origine (tensione minima nulla).*
- d) *Sollecitazione pulsante.*

In questi casi, è possibile ricorrere ad una semplice idealizzazione del fenomeno di fatica, in modo da semplificare notevolmente l'analisi degli andamenti reali delle sollecitazioni, che possono risultare molto più complessi; basti pensare al caso in cui le sollecitazioni vengono generate da fenomeni vibrazionali ad elevata frequenza.

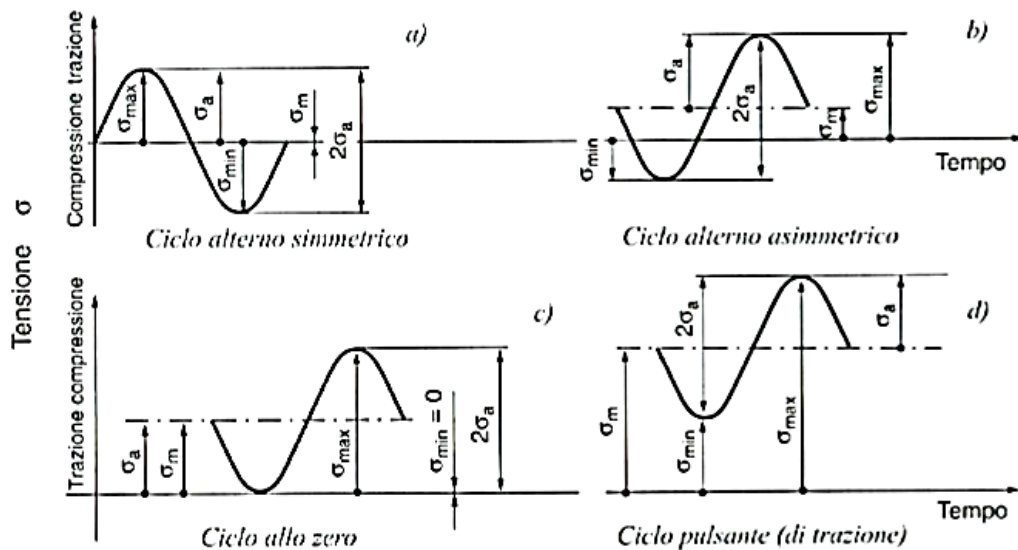


Fig. 1.9 possibili andamenti delle sollecitazioni sinusoidali fondamentali.

I quattro casi fondamentali sopra elencati, possono essere associati ad una legge matematica di tipo sinusoidale, secondo cui per ogni istante di tempo “t” il valore della tensione può essere espresso dalla relazione:

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \sin \omega t$$

Cioè, qualsiasi ciclo può essere rappresentato analogamente dalla sovrapposizione di una tensione alternata pura di semiampiezza σ_a (ampiezza di tensione), pulsazione ω e tensione statica σ_m (tensione media). Per individuare un ciclo, sono necessari almeno due parametri indipendenti, relativi alla tensione o alla deformazione (normativa UNI

3964). Qualunque sia il tipo di ciclo, è sempre possibile distinguere un valore superiore della tensione σ_{max} e un valore inferiore σ_{min} , espressi in funzione della tensione media e della ampiezza di tensione:

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a$$

$$\sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a$$

Da queste relazioni si ricava che la tensione media σ_m vale:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

Mentre si ottiene un valore di semiampiezza σ_a pari a:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

Con riferimento ai quattro cicli fondamentali, è possibile specificare:

- **Per carichi alternati simmetrici:**

$$\sigma_{max} = -\sigma_{min} = \sigma_a, \quad \text{con } \sigma_m = 0$$

- **Per carichi alternati asimmetrici:**

$$\sigma_m \neq 0, \quad \sigma_{max} > 0, \quad \sigma_{min} < 0, \quad \text{con } \sigma_m < \sigma_a$$

- **Per carichi oscillanti all'origine:**

$$\frac{\sigma_{max}}{2} = \sigma_m = \sigma_a, \quad \text{con } \sigma_{min} = 0$$

- **Per carichi pulsanti:**

$$\sigma_m \neq 0, (\sigma_{max} - \sigma_{min}) > 0, \quad \text{con } \sigma_m > \sigma_a$$

-Il rapporto di tensione R , il comportamento a fatica non dipende solo dall'ampiezza della sollecitazione alternata σ_a , ma anche dalla tensione media σ_m che spesso risulta diversa da zero. Introduciamo, perciò, il rapporto di tensione, definito come il rapporto tra il valore minimo e massimo di tensione dei cicli in analisi. Questa nuova quantità tiene conto contemporaneamente dell'ampiezza della sollecitazione e componente media di tensione, caratterizzando in un certo senso la sollecitazione sinusoidale. Si ha dunque:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a}$$

Il rapporto di tensione R può variare tra $+1$ e $-\infty$, quando $\sigma_a = 0$ (sollecitazione statica pura) R assume il valore massimo, mentre quando $\sigma_{max} = 0$ (sollecitazione ripetuta a compressione) R assume il valore minimo. Per $\sigma_m = 0$ si ha $R = -1$, in questo caso siamo in presenza di una sollecitazione alterna simmetrica.

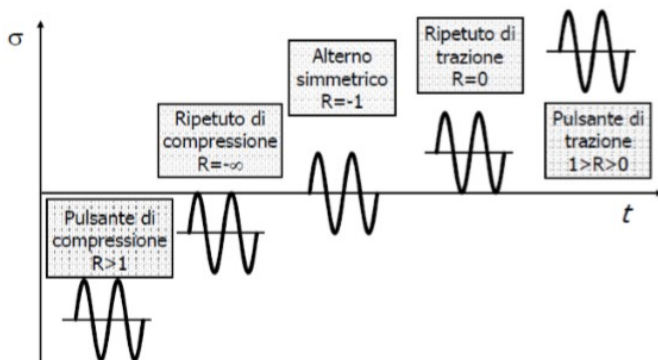


Fig. 1.10
sollecitazioni
fondamentali
e relativi
valori di R .

-Danno cumulativo, in questo paragrafo procediamo ad analizzare in modo più realistico il problema del danneggiamento a fatica, distaccandoci dalle storie di carico ideali costituite da n cicli alterni simmetrici ad ampiezza costante, per passare all'analisi delle sollecitazioni in un organo di macchina sottoposto ad una legge di carico irregolare, caratterizzata da più picchi e valli, differenti tra loro.

A questo punto è cruciale riuscire a capire quali tensioni intercorrono nel danneggiamento e qual è l'entità del danno verificatosi. Per riuscire nel nostro intento ci serviamo del metodo di ***Palmgren-Miner***, che risulta essere una variante della tecnica del "rain-flow"; tale metodo viene applicato a partire dal diagramma delle tensioni variabili, il quale descrive l'andamento temporale del carico irregolare, per poi procedere alla ricerca del cosiddetto ciclo "nascosto", ovvero il ciclo di partenza viene suddiviso in modo da considerare inizialmente i cicli caratterizzati da massimo e minimo assoluto, per poi passare all'analisi dei sotto-cicli precedentemente esclusi. Successivamente i valori ottenuti a seguito dell'analisi andranno espressi in termini di componente di tensione media e tensione alternata.

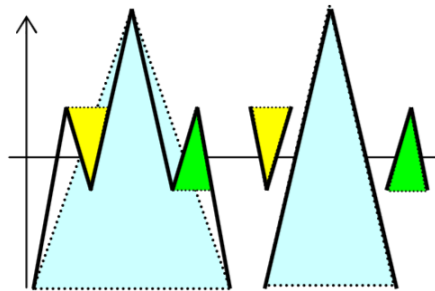


Fig. 1.11
rappresentazione
semplificata del
metodo di
suddivisione del
ciclo.

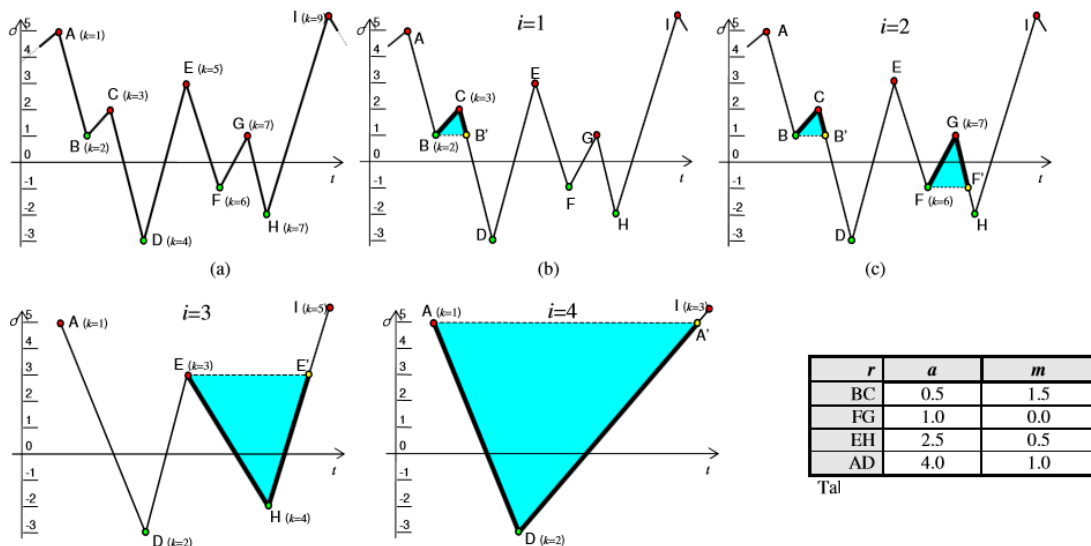


Fig. 1.12 esempio di applicazione del metodo rain-flow.

Una volta individuati i singoli cicli, si procede in via analitica, calcolando la somma dei rapporti caratteristici di ogni ciclo:

$$\sum_{i=1}^N \frac{n_i}{N_i} = c$$

dove n_i è il numero di cicli al livello di tensione σ_i e N_i è il numero di cicli necessari per portare a rottura con il medesimo livello di tensione. Il parametro c viene determinato sperimentalmente e generalmente assume valori compresi tra $0.7 \leq c \leq 2.2$, con valore medio ~ 1 . Usando la formula deterministica come una regola di danno lineare, possiamo scrivere:

$$D = \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{N_i}$$

In cui D è il danno accumulato. Quando $D = c = 1$ avviene la rottura del componente.

Sebbene l'uso della regola di *Palmgren-Miner* sia ormai diffuso e consolidato, essa presenta due aspetti in disaccordo con l'esperienza diretta. In primo luogo, questa teoria prevede una diminuzione del carico statico a seguito dell'applicazione del ciclo di carico ad ampiezza massima; inoltre, la teoria viene sviluppata indipendentemente dall'ordine con cui vengono applicati i carichi. Ebbene, entrambe le ipotesi non vengono confermate dai test effettuati in laboratorio e costituiscono quindi, fonti di errore nel calcolo del danno cumulato all'interno degli organi di macchina.

1.2.3 ROTTURE PER FATICA.

Nei paragrafi precedenti, sono già stati discussi gli aspetti generali che riguardano la frattura e la sua formazione a livello microscopico; di seguito quindi, verranno descritti gli aspetti macroscopici della frattura, senza avere la pretesa di esporre in modo completo tutte le innumerevoli tipologie di frattura ma, con l'obiettivo principale di rendere questo lavoro di tesi il più semplice e chiaro possibile.

La rottura per fatica, in linea di massima, parte dalla superficie (da tagli, solchi o variazioni di sezione) dove per effetto delle sollecitazioni variabili nel tempo si generano cricche, che proseguono all'interno del materiale seguendo la direzione di massimo sforzo normale. La superficie rotta per fatica, si può spesso riconoscere dalle caratteristiche

“linee di spiaggia” marcate, mentre la superficie di rottura (da sovraccarico) restante risulta piuttosto rugosa e frastagliata. La superficie interessata da rottura per fatica è tanto più estesa, liscia e piana quanto più lentamente avviene la rottura, dunque di fondamentale importanza è l’entità del carico, che deve essere basso. Anche nei materiali duttili, la rottura per fatica si manifesta come una rottura fragile, in assenza di deformazione, poiché la rottura finale avviene sempre per sovraccarico della sezione rimanente.

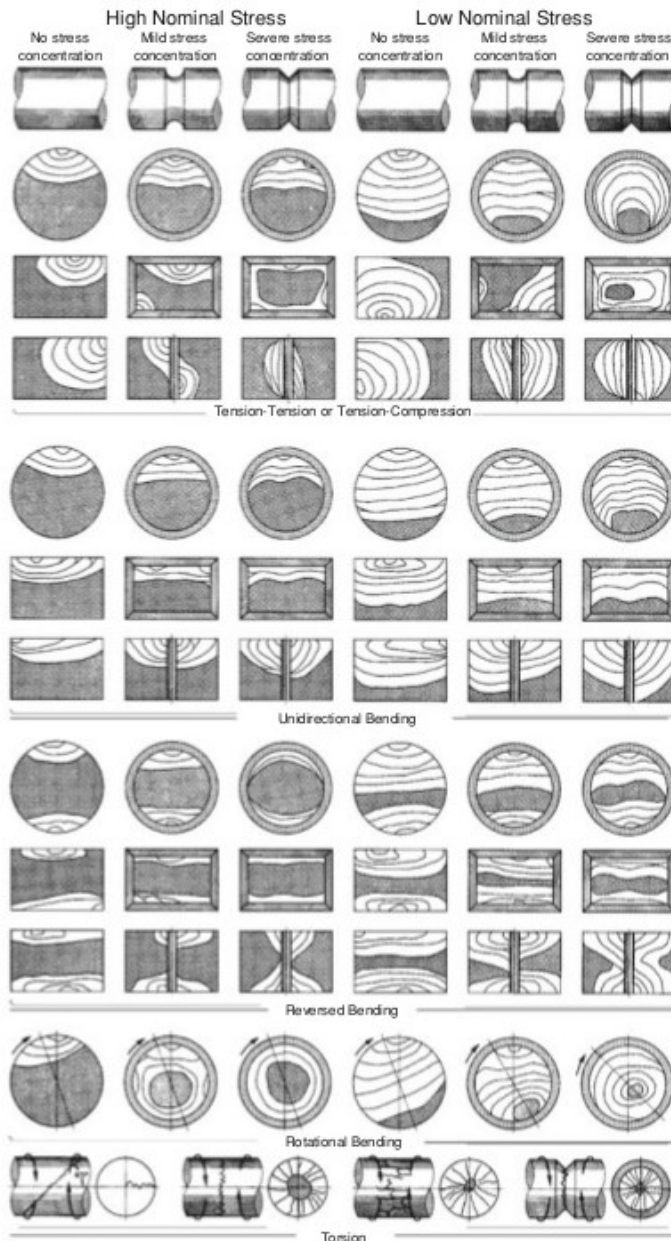


Fig. 1.13 schema delle superfici di rottura a fatica in componenti lisci e intagliati, soggette a diversi tipi di carico variabile.

C’è molto da imparare dall’osservazione delle rotture a fatica. In fig. 1.13 vengono messi in evidenza i diversi effetti della tipologia di carico, dell’entità del carico e degli intagli. È possibile notare la suddivisione orizzontale in cinque fasce orizzontali, rispettivamente dall’alto verso il basso:

- i. *trazione-trazione o trazione-compressione.*
- ii. *flessione unidirezionale.*
- iii. *flessione alternata.*
- iv. *flessione rotante.*
- v. *torsione.*

Inoltre, viene effettuata un'ulteriore suddivisione, questa volta verticalmente facendo distinzione tra l'entità della tensione nominale e contemporaneamente sull'influenza del fattore d'intaglio. Notiamo difatti due colonne principali:

- i. *elevata tensione nominale.*
- ii. *bassa tensione nominale.*

A loro volta suddivise tra:

- nessun effetto d'intaglio.
- effetto d'intaglio medio.
- alto effetto d'intaglio.

È importante notare che, nel caso di flessione rotante, anche il senso di rotazione influenza la forma della frattura. Inoltre, è palese l'effetto amplificante che intagli e fori hanno sulla cricca; come già noto, la loro presenza genera discontinuità nel materiale e seguente intensificazione delle tensioni. Osservando ancora lo schema, è evidente l'aumento del numero di linee di spiaggia presenti sulla superficie di frattura al diminuire della tensione nominale. In ogni modo, la formazione e la propagazione della cricca sono influenzate da numerosi fattori, che verranno esposti successivamente.



Fig. 1.14
esempio di rottura a fatica di un albero di trasmissione sottoposto a tensioni nominali di lieve entità.

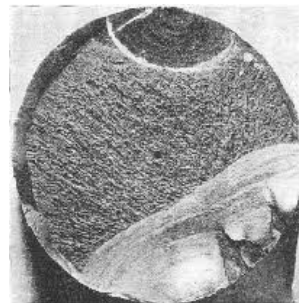


Fig. 1.15
esempio di rottura a fatica di un albero sottoposto a tensioni nominali di elevata entità.

1.3 LIMITE DI FATICA E RESISTENZA A FATICA.

1.3.1 DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA A FATICA E LIMITE DI FATICA.

La resistenza dinamica, è una caratteristica intrinseca al materiale, ed abbraccia simultaneamente i campi del limite di fatica e della resistenza a fatica.

- *Limite di fatica*: per numeri elevati di cicli, oltre 10^7 , si tiene conto di un limite di fatica costante, cioè un valore di tensione al di sotto del quale la rottura a fatica non si presenta, teoricamente.
- *Resistenza a fatica*, cioè il carico sopportabile con durata limitata: in questo caso la resistenza è più elevata del limite di fatica. Il valore limite della sollecitazione dipende dal numero di cicli, cioè dalla durata.

Dal punto di vista pratico, per determinare la resistenza a fatica, si fa ricorso ad una serie di prove sperimentali, sottoponendo un provino liscio e cilindrico ad una sollecitazione variabile nel tempo. Questa tipologia di prova richiede molto tempo e mira a determinare il numero di cicli N fino a rottura per fatica. La prova, per motivi statistici, va ripetuta su altri provini, con lo stesso carico e poi con carichi diversi, così da determinare la resistenza del materiale in funzione del numero di cicli.

Nonostante in letteratura esista una grande quantità di dati sui risultati dei test a flessione rotante e a trazione statica, alle volte, per una progettazione preliminare è necessario avere un metodo veloce per la stima del limite di fatica. A seguito dell'analisi di numerosi dati, ricavati da diverse fonti, si è arrivato a stimare che, il limite di fatica si assesta circa attorno al **40-60%** della resistenza a trazione, per acciai con resistenza a trazione fino a **1450MPa**. È di fondamentale importanza tener conto che, i dati provenienti dai test di laboratorio possono differire notevolmente dai risultati reali, rendendo necessari, in fase di progettazione, degli accorgimenti riguardanti il coefficiente di sicurezza. Quindi riepilogando:

$$S'_e = \begin{cases} 0.5S_{ut} & S_{ut} \leq 1400MPa \\ 700MPa & S_{ut} > 1400MPa \end{cases}$$

Dove S_{ut} è la resistenza a trazione garantita ed S'_e è il limite di fatica di un provino sottoposto a flessione rotante.

1.3.2 CURVA DEL WÖLER E CURVA DI FRENCH.

Riportando i valori della resistenza a fatica in funzione del numero di cicli, si ottiene una curva discendente, che diventa una linea orizzontale una volta raggiunto il limite di fatica. Il punto di transizione tra le due curve non è determinabile con precisione, ma a seguito di numerosi esperimenti si è notato che: per gli acciai la transizione avviene a circa $2 \cdot 10^6$ cicli, ovviamente il valore è crescente con il carico di rottura e la sezione del provino; per quanto riguarda le leghe leggere la transizione si manifesta da 10^7 a 10^8 cicli. Al di sotto dei 10^3 cicli vi è una zona particolare, nella quale i valori di resistenza statica possono essere assunti come valori limite. La curva che otteniamo è definita come curva di durata o curva di Wöhler.

A seguito della variazione di qualità dei materiali nelle prove, la resistenza a fatica e il limite di fatica sono soggetti a fenomeni di dispersione. Perciò le curve di Wöhler vengono tracciate per valori di probabilità di sopravvivenza definita, generalmente del **50%**.

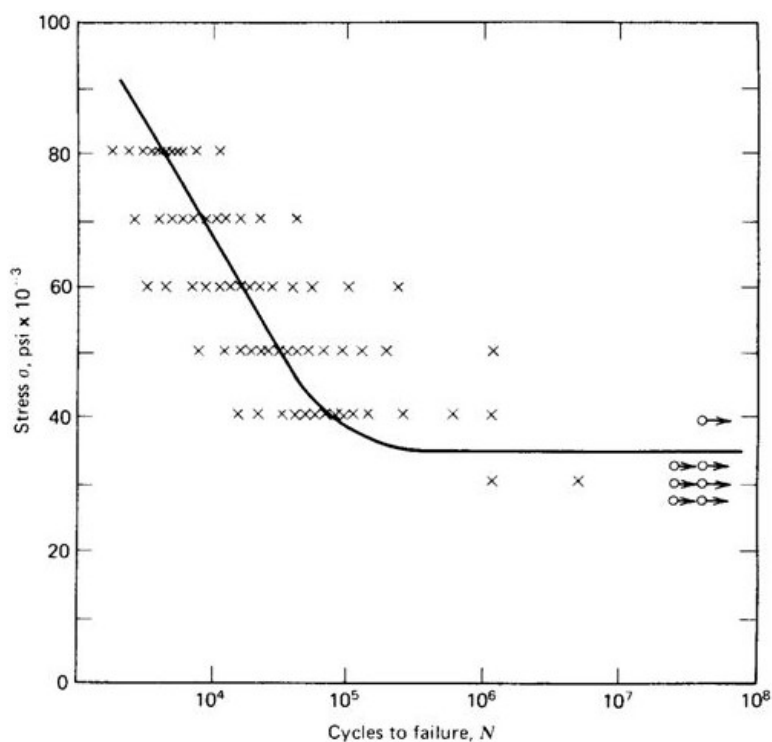


Fig. 1.16 curva di danno ottenuta a valori di tensione media imposto. È possibile notare anche la dispersione dei dati ottenuti dalle prove sperimentali.

Per quanto riguarda provini intagliati, il limite di fatica risulta più basso, ma la resistenza a rottura rimane quasi invariata, cosicché le relative curve di Wöhler hanno un andamento più ripido rispetto a quella del provino liscio.

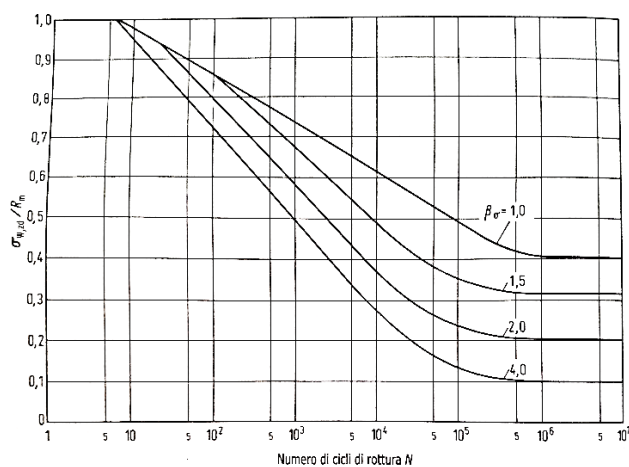


Fig. 1.17 curva di Wöhler normalizzata per il limite di fatica alterna simmetrica a trazione-compressione di provini intagliati.

Per quanto riguarda la curva di French, è anche chiamata curva di danno ed è ottenuta nel modo seguente: si applica il carico sui provini in modo da generare uno sforzo nella zona di resistenza a fatica, fino a raggiungere i numeri di cicli $n_i < N_i$ numero di cicli di rottura della curva di Wöhler, successivamente il provino viene sottoposto ad uno sforzo pari al limite di fatica. Se in tal caso il provino sopporta $N > 5 \cdot 10^6$ cicli senza rompersi, esso è considerato non danneggiato. Proseguendo in questo modo, l'obiettivo è quello di trovare l' n_i maggiore a seguito dei quali non si produce alcuna rottura per livelli di tensione pari al limite di fatica, ovvero il numero di cicli dopo i quali non si manifesta un abbassamento del limite di fatica. Trovato il numero di cicli n_i è stato determinato anche un punto della curva di danno.

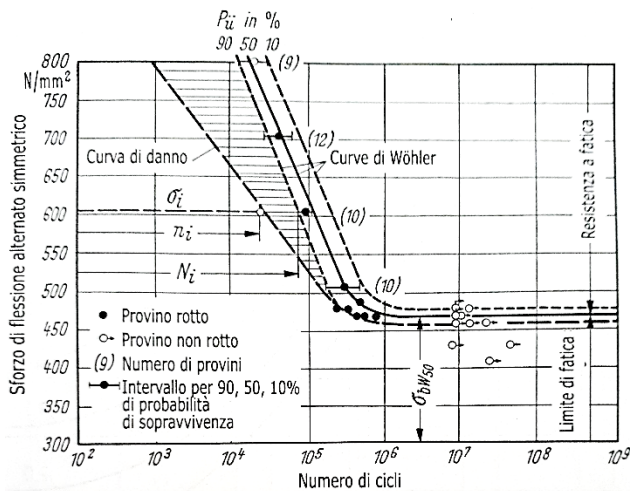


Fig. 1.18 le curve di Wöler per probabilità di sopravvivenza del 90%, 50% e 10% con l'impiego di 9...12 provini per prova e curva di danno. Acciaio 34 CrMo 4 bonificato e lucidato elettroliticamente con $R=1000\text{MPa}$. Nel campo tratteggiato è possibile prevedere un danno, ma non ancora una rottura.

1.3.3 DIAGRAMMI DELLA RESISTENZA A FATICA.

I valori di resistenza a fatica, determinati con le metodologie espone nel paragrafo precedente (per trazione-compressione, flessione e torsione), come le ampiezze dello sforzo per diversi valori di sollecitazione media, possono essere rappresentati sotto forma di diagrammi. Di seguito verranno esposti i concetti fondamentali:

- 1) **Diagramma di Smith:** in questo caso sull'ordinata si trovano i valori σ_0 e σ_u relativi ad una determinata sollecitazione media σ_m , per l'ampiezza corrispondente σ_a . Per $\sigma_m = 0$ è possibile ricavare dal diagramma il limite di fatica alternata simmetrica σ_w , per $\sigma_u = 0$ il limite di fatica a ciclo dalle zero è $\sigma_{Sch} = 2\sigma_a$. Tracciando il limite di snervamento R_p e la resistenza a trazione R_m , si ottiene il campo di resistenza statica.

Dal punto di vista pratico, il diagramma di Smith costituisce la forma di rappresentazione preferita in meccanica, inoltre è il più adatto per la rappresentazione dei casi di sovraccarico.

- 2) **Diagramma di Haigh:** in questo caso, l'ampiezza dello sforzo σ_a è riportata in funzione della sollecitazione media σ_m . Il diagramma corrisponde quindi, al diagramma di Smith dimezzato, se lo si ruota di 45° sull'orizzontale.

Dal punto di vista pratico, il diagramma di Haigh costituisce la forma di rappresentazione più chiara per la lettura diretta dell'ampiezza del limite di fatica.

- 3) **Diagramma di Goodman:** in questo caso, vengono rappresentati lo sforzo minimo σ_u , lo sforzo massimo σ_0 e l'ampiezza che ne risulta $\sigma_H = \sigma_0 - \sigma_u$, in alternativa i valori di τ corrispondenti. Il diagramma di Goodman è disponibile per la rappresentazione sia del limite di fatica, sia della resistenza a fatica.

Dal punto di vista pratico, il diagramma di Goodman si presta bene ogni qual volta si stia trattando con molle soggette a carico pulsante dallo zero, di trazione o di compressione.

- 4) **Diagramma di Kommers-Jasper:** in questo caso, è rappresentata la dipendenza dai singoli valori di resistenza (limite di fatica, resistenza statica) dal tipo di carico a trazione (rapporto di sollecitazione $R_\sigma = \frac{\sigma_u}{\sigma_0}$).

Dal punto di vista pratico, il diagramma di Kommers-Jasper si presta molto bene all'analisi degli sforzi di giunti saldati.

Note: dato che le prove sui materiali per realizzare i diagrammi di resistenza a fatica nel modo sopra descritto risultano parecchio dispendiose, a causa del numero elevato di provini, di tempo e di dati necessari alla loro stesura. Per questo motivo, in linea di massima, i diagrammi vengono costruiti con una procedura approssimata.

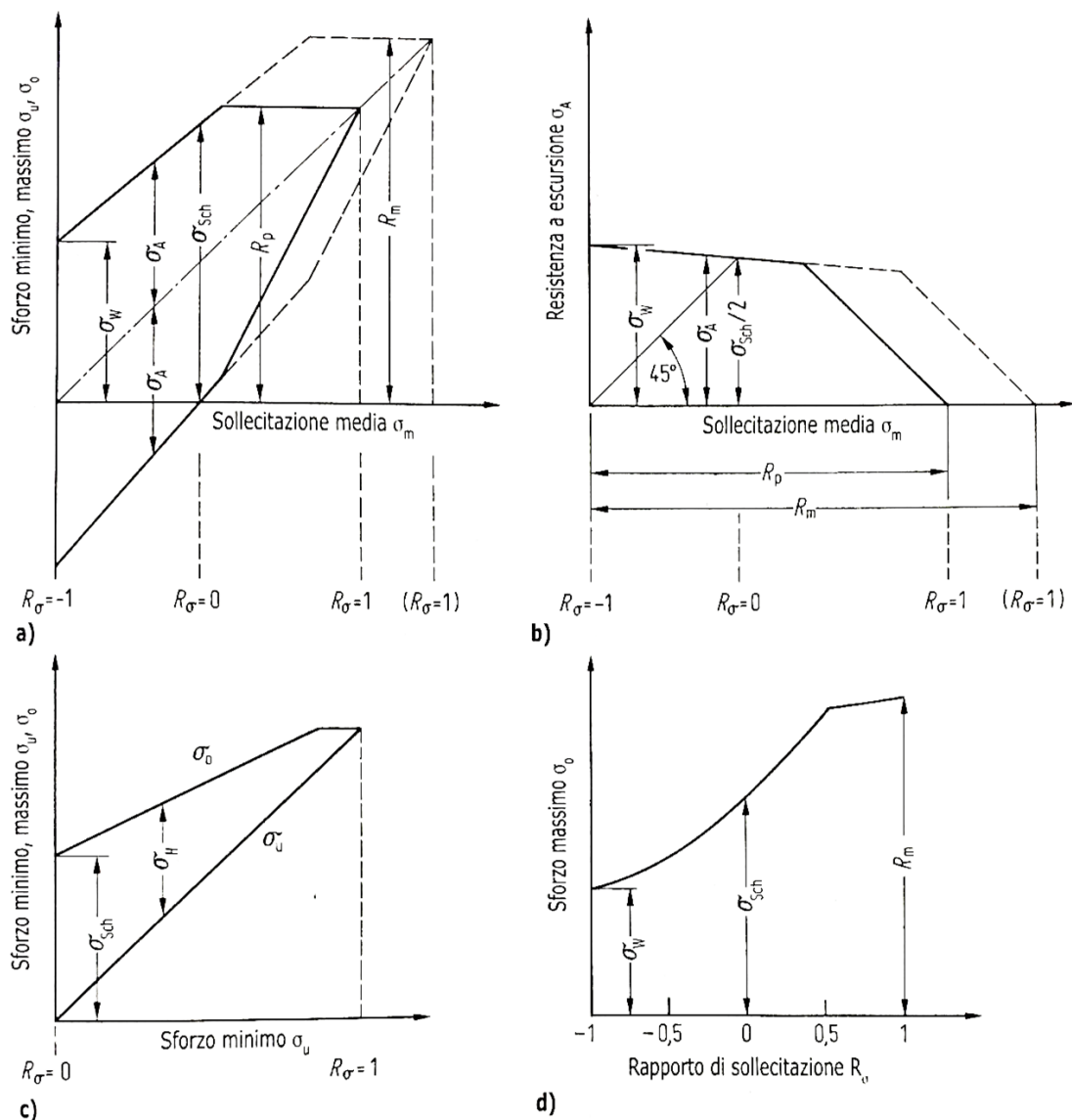


Fig. 1.19 Diagrammi dell'effetto dello sforzo medio: a) secondo Smith; b) secondo Goodman; c) secondo Haigh; d) secondo Kominers-Jasper.

1.4 FATTORI CHE INFLUENZANO LA VITA A FATICA.

1.4.1 I COEFFICIENTI.

Nei paragrafi precedenti si è provveduto alla descrizione di base del fenomeno della fatica all'interno del componente ideale, quindi di seguito andremo a completare le nozioni già disponibili affinché possano essere applicate allo studio del componente reale. Come è facile intuire, in condizioni reali il comportamento di un componente di macchina si discosta molto da quello del provino. Questo avviene poiché nel caso reale il componente

è influenzato da un numero elevato di fattori in gioco, che agiscono abbassando il limite di fatica (tali fattori possono dipendere dalla qualità della materia prima, dalle lavorazioni subite, dalla geometria, dalla finitura superficiale, dalla temperatura, dalla presenza di impurità, dalla temperatura, dalle condizioni di utilizzo, ecc.).

Il primo ad aver identificato i fattori che quantificano gli effetti dei vari fattori fu Joseph Marin, il quale individuò i fattori più importanti eseguendo un'ampia analisi per capirne i vari effetti. Al culmine del suo lavoro Marin capì che le variabili influivano sul limite di fatica, necessitando di correzioni per moltiplicazione, ed in concomitanza arrivò alla stesura dell'omonima equazione

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$$

dove:

- k_a = fattore di modifica per la condizione superficiale.
- k_b = fattore di modifica per la dimensione.
- k_c = fattore di modifica per il tipo di carico.
- k_d = fattore di modifica per la temperatura.
- k_e = coefficiente di sicurezza.
- k_f = fattore di modifica per gli effetti delle eterogeneità.
- S'_e = limite di fatica a flessione rotante del provino.
- S_e = limite di fatica nel punto critico di un organo di macchina nella condizione d'impiego.

Ogni qualvolta non è possibile effettuare delle prove sperimentali per la determinazione dei limiti di fatica, possono essere eseguite delle stime ricorrendo ai fattori di correzione di Marin al limite di fatica a flessione rotante del provino.

Fattore di superficie k_a : in condizioni di laboratorio, la superficie del provino risulta ben lucidata, non è possibile dire lo stesso per il generico componente di macchina preso in analisi. A questo punto è fondamentale trovare un'espressione generale che ci permetta di quantificare gli effetti delle usuali finiture superficiali (rettifica, tornitura, trafilatura a caldo, trafilatura a freddo, laminazione o forgiatura). I risultati ottenuti dall'analisi delle varie finiture superficiali, sono stati raggruppati ed analizzati da Lipson e Noll, arrivando a formulare la seguente equazione:

$$k_a = a S_{ut}^b$$

Dove S_{ut} è la resistenza a trazione garantita, mentre a e b sono valori tabellati dipendenti dal tipo di finitura.

Fattore di dimensione k_b : essenzialmente, questo fattore viene introdotto per prevedere l'aumento di probabilità di avere imperfezioni nel metallo, legata all'aumento delle dimensioni dei componenti di macchina. I risultati per flessione e torsione vengono espressi come

$$k_b = \left\{ \begin{array}{ll} \left(\frac{d}{7.62} \right)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51mm \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254mm \end{array} \right\}$$

In presenza di sforzo assiale l'effetto della dimensione non influenza il processo e quindi assume valore unitario.

In presenza di sezioni non circolari e/o barre in flessione, ma non in rotazione, è necessario ricorrere al calcolo del diametro equivalente, ottenuta eguagliando l'area interessata da una tensione maggiore al 95% della tensione massima (nel caso in esame), con la medesima area che interessa un provino sottoposto a flessione rotante.

Fattore di carico k_c : il suo utilizzo è fondamentale ogni qual volta le prove di fatica non vengano effettuate a flessione rotante, ma a sforzo assiale o a torsione. Ricorrendo al fattore di carico è possibile riportare i differenti stati tensionali all'una o all'altra tipologia di carico.

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flessione} \\ 0.85 & \text{assiale} \\ 0.59 & \text{torsione} \end{cases}$$

Fattore di temperatura k_d : quando la temperatura di esercizio è inferiore alla temperatura ambiente, le probabilità di avere frattura fragile aumentano, quindi risulta necessario tener conto di questo aspetto in fase di progettazione. Quando la temperatura di esercizio supera la temperatura ambiente, ad aumentare è la probabilità di avere un abbassamento del carico di snervamento, con conseguente riduzione del limite di fatica. Anche in questo caso è necessario adottare delle contromisure in fase di progettazione.

Inoltre, è importante dire che materiali operanti ad elevate temperature non manifestano un limite di fatica, ed a causa della ridotta resistenza a fatica, la rottura dipende solo dal

tempo. Per ottenere una stima veloce del limite di fatica dei vari materiali alle alte temperature, si ricorre all'espressione polinomiale del quarto ordine che interpola i dati ottenuti sperimentalmente. Se il limite di fatica a flessione rotante a temperatura ambiente è noto, il fattore è calcolabile come

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}}$$

potendo ricorrere anche a valori tabellati. In alternativa, ricorrendo all'equazione polinomiale del quarto ordine

$$k_d = 0.975 + 0.432(10^{-3}) \left(\frac{9}{5}\right) (T_c + 32) - 0.115(10^{-5}) \left[\left(\frac{9}{5}\right) (T_c + 32)\right]^2 + 0.104(10^{-8}) \left[\left(\frac{9}{5}\right) (T_c + 32)\right]^3 - 0.595(10^{-12}) \left[\left(\frac{9}{5}\right) (T_c + 32)\right]^4$$

dove $21^\circ\text{C} \leq T_c \leq 538^\circ\text{C}$.

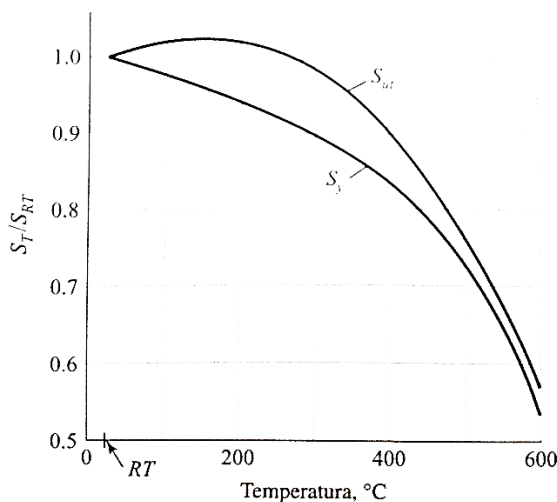


Fig. 1.20 Andamento del rapporto $\frac{S_T}{S_{RT}}$ in funzione della temperatura. Dati ottenuti dai risultati di 145 test eseguiti su 21 tipi di acciai legati.

Fattore che tiene conti di altri effetti k_f : sebbene il fattore k_f debba tener conto della riduzione del limite di fatica, dovuto a tutte le altre variabili fin qui non menzionate, esso è da interpretare come una valutazione globale di questi effetti, di cui non sono a disposizione valori sperimentali. Le variabili più importanti che ne fanno parte sono:

- *Tensioni residue.*
- *Anisotropia.*
- *Corrosione.*

- *Placcatura elettrolitica.*
- *Metallizzazione.*
- *Frequenza del ciclo di tensione.*
- *Usura da contatto.*

Nessuno dei fattori precedentemente elencati deve essere trascurato, in quanto anche uno solo di questi fattori può causare riduzioni del limite di fatica attorno al 50%, portando ad un inevitabile danneggiamento del componente in esercizio se non vengono attuate delle opportune correzioni.

1.4.2 CONCENTRAZIONE DEGLI SFORZI E SENSIBILITA' ALL'INTAGLIO.

Nella pratica comune, non è raro osservare rotture, riguardanti componenti correttamente dimensionati, innescatesi in prossimità di fori, gole o intagli. L'esistenza di queste rotture, nonostante la corretta progettazione, fa presupporre l'esistenza di un qualche effetto legato alla variazione della geometria e rende necessaria l'introduzione di un fattore di intaglio. Tale fattore, agisce sulla tensione nominale, effettuando una correzione per moltiplicazione del valore di tensione, innalzandolo di una quantità dipendente dal tipo di materiale e dal tipo di discontinuità presente, cioè

$$k_f = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0}$$

dove σ_{max} è il valore di tensione massima nel provino intagliato e σ_0 è in valore di tensione nel provino non intagliato.

Un'altra quantità molto importante è la *sensibilità all'intaglio*, definita come

$$q = \frac{k_f - 1}{k_t - 1} \quad 0 \leq q \leq 1$$

dove k_t è il fattore di concentrazione geometrico delle tensioni normali e viene ricavato a seguito di prove statiche. L'utilità della sensibilità all'intaglio risiede nel fatto che, è una quantità calcolabile e dipendente dalla geometria; infatti dall'equazione di Neuber si ricava

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}}$$

con \sqrt{a} costante di Neuber dipendente dal materiale, ed \sqrt{r} quantità dipendente dal raggio d'intaglio. Dalla conoscenza del fattore di concentrazione geometrico delle tensioni normali e dalla conoscenza della sensibilità all'intaglio è possibile ricavare il valore del fattore di concentrazione degli sforzi.

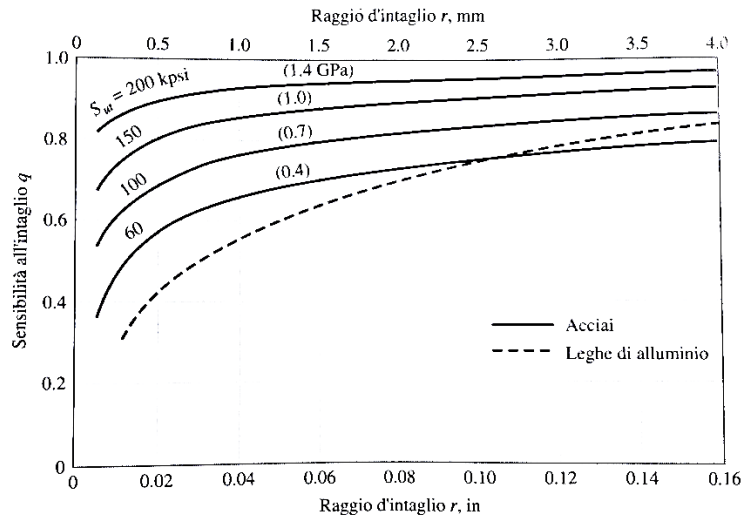


Fig. 1.21 sensibilità all'intaglio per acciai e per leghe di alluminio fucinate, soggette a carico assiale alterno o a flessione alternata.

1.5 METODI DI CALCOLO.

1.5.1 CRITERI DI DANNEGGIAMENTO.

Fino ad ora si è visto che, le prove di laboratorio per la valutazione della vita a fatica di un dato materiale, vengono effettuate in condizioni standard, di sollecitazione alterno simmetrica, con tensione media nulla e conseguente rapporto di tensione pari a meno uno ($\sigma_m = 0, R = -1$). Come è facile aspettarsi, le condizioni di laboratorio si discostano molto dalle condizioni reali. Difatti, in condizioni di lavoro, i componenti vengono sottoposti per la maggior parte del tempo a carichi ciclici, aventi media non nulla, di trazione e di compressione. Per questo motivo risulta importante avere a disposizione dei modelli, che partendo dal valore di sollecitazione media e di sollecitazione alterna, permettano di ottenere il corrispondente valore σ_N sul diagramma del Wöhler e conseguentemente, il corrispondente numero di cicli a rottura N . Tali modelli prendono il nome di “criteri di rottura”.

La base di partenza che porterà alla descrizione dei criteri di rottura, prende il nome di *diagramma di Haigh*. Questo diagramma è ottenuto riportando i dati relativi a varie prove, in ascissa vengono inseriti i diversi valori di tensione media σ_m e in ordinata i valori di

ampiezza σ_a relativi ad un numero di cicli N fissato. Come si desume dal diagramma, nel primo quadrante la σ_N decresce all'aumentare della sollecitazione media e al ridursi della σ_a , mentre nel secondo quadrante la σ_N rimane inizialmente costante al ridursi della sollecitazione media e a parità di σ_a , mentre successivamente diminuisce lievemente al ridursi di σ_m e σ_a .

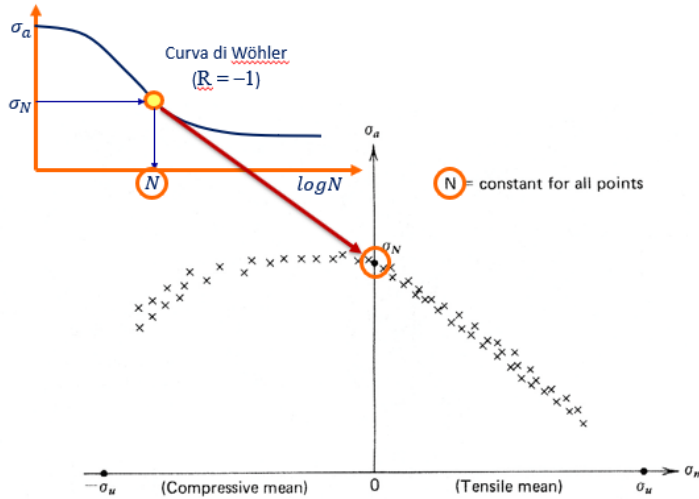


Fig. 1.22 Diagramma di Haigh (in basso) e relativo collegamento con il diagramma del Wöhler (in alto a sinistra).

I diversi modelli matematici più importanti in grado di approssimare al meglio i dati contenuti all'interno del diagramma di Haigh sono cinque: retta di Goodman modificata, retta di Soderberg, parabola di Gerber, ellissi ASME e criterio dello snervamento al primo ciclo di Langer.

1) Relazione lineare di Soderberg: questa relazione definisce una retta d'interpolazione dei risultati, nel campo della trazione ed è caratterizzata con equazione

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_N} + \frac{\sigma_m}{\sigma_R} = 1$$

2) Relazione lineare di Soderberg: la retta definita da Soderberg differisce da quella di Goodman poiché al posto della σ_R , si usa σ_S (tensione di snervamento)

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_N} + \frac{\sigma_m}{\sigma_S} = 1$$

3) Parabola di Gerber:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_N} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_R}\right)^2 = 1$$

4) Relazione ellittica ASME:

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_N}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_R}\right)^2 = 1$$

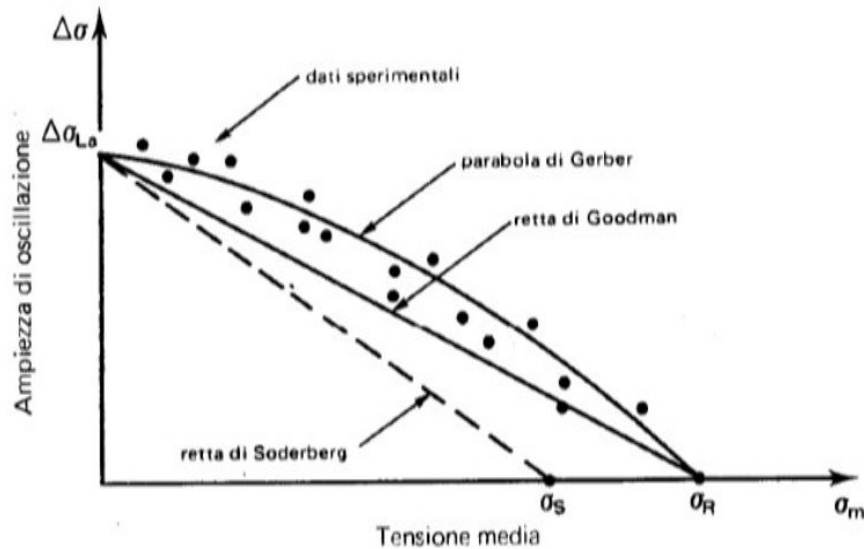


Fig. 1.23 Diagramma di fatica e relativi criteri di rottura. Per ogni criterio, i punti posti sulla rispettiva curva o al di sopra indicano la rottura del componente.

In particolare, si può affermare che, sia una parabola e sia un'ellissi hanno una capacità migliore di approssimare i valori medi dei dati, nel campo delle tensioni di trazione, consentendo una più adeguata determinazione delle probabilità di guasto. Inoltre, tutti i criteri fanno riferimento ai dati del campo di trazione, poiché le prove sperimentali confermano che la tensione media di compressione ha un effetto limitato sul limite di fatica.

Un altro sistema per rappresentare i risultati delle prove di fatica condotte sui materiali è il diagramma di Goodman modificato. Esso fornisce le tensioni σ_{max} e σ_{min} (in ordinata) per fissato numero di cicli di vita N , al variare della tensione media σ_m (in ascissa). Questo diagramma fornisce le stesse informazioni del diagramma di Haigh, ma è particolarmente usato, in quanto permette di individuare contemporaneamente tutte le componenti di tensione. Con ciò, il limite di fatica, il carico di fatica (o carico a vita infinita) è rappresentato in ordinata al di sopra e al di sotto dell'origine e la linea delle tensioni medie si presenta come una semiretta inclinata a 45° dall'origine. Per tracciare il diagramma vengono riportati sulle ordinate il carico di rottura statico R_m , il carico di

snervamento R_{eL} , il limite di resistenza a fatica pulsante dallo zero σ'_{Fa} ed il limite di resistenza a fatica alternata σ_{Fa} . Nell'asse delle ascisse si riportano i valori delle tensioni medie. Collegando i punti C, A, E, H, si ottiene la linea σ_{LFmax} delle tensioni limite massime, mentre congiungendo i punti D, B, F, K, G si ricava la linea σ_{LFmin} delle tensioni limite minime di fatica. Queste due linee sono limitate in altezza della tensione di snervamento.

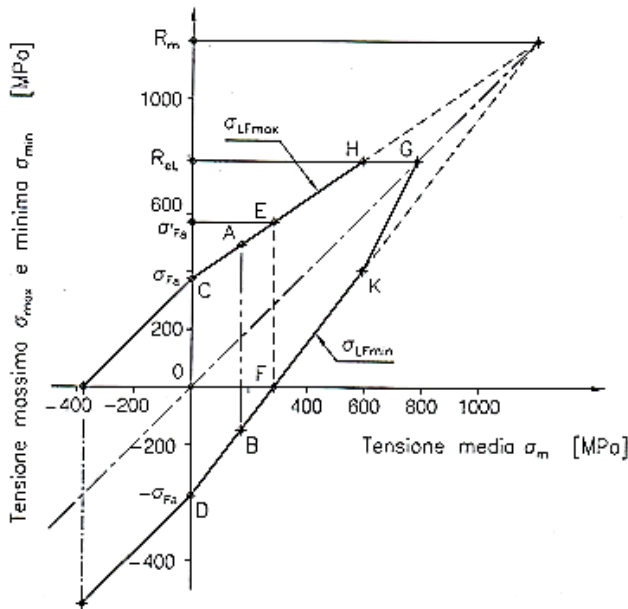


Fig. 1.24 Diagramma di Goodman modificato relativo ad un certo numero di cicli N . Per ogni valore della tensione media si evidenziano i carichi e i valori limite di ciascuna componente di tensione.

In figura si può notare che:

- Il segmento **AB** rappresenta un ciclo alterno asimmetrico;
- Il segmento **CD** rappresenta un ciclo alterno simmetrico;
- Il segmento **EF** rappresenta un ciclo pulsante dallo zero;
- Il segmento **HG** è la linea della deformazione plastica, corrispondente al raggiungimento della tensione di snervamento R_{eL} .

Si può anche evidenziare che, il diagramma di Goodman-Smith non è simmetrico rispetto all'origine degli assi, risulta infatti favorevole alla resistenza nella zona in cui la compressione prevale sulla trazione. Questa caratteristica riguarda soprattutto la ghisa, poiché l'acciaio presentando uguali valori per i carichi di rottura a compressione e a trazione ha un diagramma simmetrico. I diagrammi di Goodman-Smith per cicli di fatica

a flessione e a torsione hanno forma simile a quello per i cicli di trazione-compressione così come mostrato nella figura seguente.

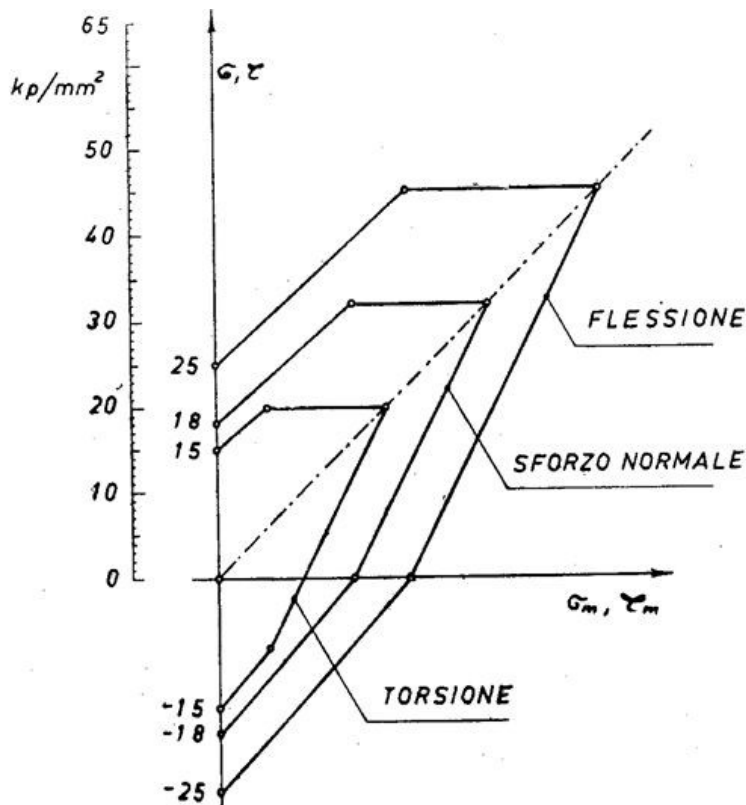


Fig. 1.25 Diagrammi di Goodman per flessione, trazione-compressione e torsione.

Una terza rappresentazione è definita dai cosiddetti *diagrammi Master*, ideati per la prima volta da Weyranch e Kommerell. Così come il diagramma di Goodman e il diagramma di Haigh, Weyranch e Kommerell riportano i risultati delle prove di fatica sui provini normalizzati, a diversi valori della tensione media. Da tali diagrammi vengono ricavati contemporaneamente i valori di tutte le componenti di tensione ed i valori dei rapporti A ed R . Inoltre, si possono individuare le “curve a vita costante”, che vanno dalla retta dei valori di tensione alternata σ_a all’asse delle tensioni medie σ_m , per variazioni di R comprese tra -1 e $+1$. Tra queste, troviamo la curva corrispondente al limite di fatica, che inizia da σ_N , sull’asse delle σ_a , e termina al valore di σ_R sull’asse delle σ_m . Ogni stato tensionale può essere descritto dalle componenti minima e massima, oppure da quella media e alternata di tensione. Se il punto caratterizzante lo stato tensionale si trova al di sotto della curva a vita costante per N cicli, è garantita la sopravvivenza.

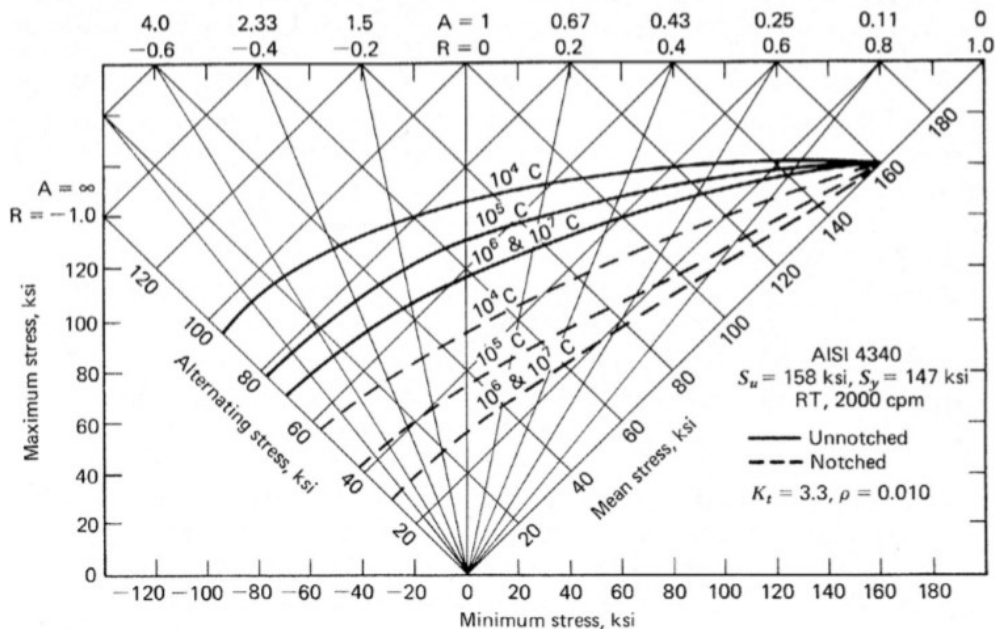


Fig. 1.26 Diagramma di fatica generalizzato (Master) di un acciaio AISI 4340.

1.5.2 COEFFICIENTE DI SICUREZZA A FATICA.

All'interno del paragrafo 1.4.1 è stata omessa la trattazione del coefficiente di sicurezza, per riservarne la descrizione in un contesto che meglio si presta al suo utilizzo. Il contesto più idoneo alla descrizione di tale parametro è per l'appunto quello riservato alle metodologie di calcolo.

Il coefficiente di sicurezza k_e o X , è definito come una quantità, sempre maggiore di uno, che ha lo scopo di aumentare “virtualmente” le tensioni a cui un organo di macchina è sottoposto, al fine di costringere il progettista d'adottare sezioni resistenti maggiori e garantire così, un margine di sicurezza al componente. L'uso del coefficiente di sicurezza è motivato dalla disomogeneità delle proprietà caratteristiche del materiale, nonché dalla variabilità del carico reale a cui il componente è sollecitato. Il tutto permette di scongiurare possibili danneggiamenti pericolosi generatesi da sovraccarichi inaspettati.

Dal punto di vista applicativo, il coefficiente di sicurezza agisce per moltiplicazione sulle componenti di tensione alterna σ_a e tensione media σ_m , di fatto diminuendo la zona di durata a fatica del componente.

Dal punto di vista progettuale, il coefficiente di sicurezza può essere usato in due modi:

- *Nel dimensionamento*, in questo caso il coefficiente è noto dalle specifiche di progetto, ed attraverso i vari modelli matematici si procede a ricavare σ_N e conseguentemente il numero di cicli N .
- *Nella verifica*, in questo caso il numero di cicli è noto, ed attraverso i vari modelli matematici si procede a ricavare σ_{LF} e conseguentemente il coefficiente di sicurezza reale, il quale dovrà risultare maggiore del coefficiente di progetto.

Caratteristiche di funzionamento del motore	Caratteristiche di funzionamento della macchina azionata		
	uniforme	sovraccarichi leggeri	sovraccarichi forti
	Valori orientativi di K_A *		
Uniforme	1,0	1,25	1,75
Sovraccarichi leggeri	1,25	1,5	2,0 o più
Sovraccarichi forti	1,5	1,75	2,25 o più

* I valori indicati non sono validi per ingranaggi funzionanti a velocità prossime alle velocità di risonanza.
 • Per ingranaggi moltiplicatori, moltiplicare i valori indicati per 1,1.

Fig. 1.27 Tabella contenente valori differenti di coefficienti di sicurezza, per trasmissioni ad ingranaggi, in funzione del tipo di carico e della loro entità.

2 IL MATERIALE

2.1 GENERALITÀ SULL'ALLUMINIO.

L'alluminio è il secondo metallo, in ordine di produzione, dopo le leghe ferrose ed il primo tra i cosiddetti metalli leggeri. Queste leghe, grazie alla loro bassa densità e l'alto rapporto tra resistenza meccanica e peso, consentono una riduzione notevole di massa, che si traduce, nel settore dei trasporti, in un minor consumo di combustibile fossile. Come leggerezza, è superato solo dal magnesio e dal berillio che, tuttavia, hanno ancora applicazioni limitate. L'impiego più diffuso dei metalli leggeri è nelle strutture aeronautiche, dove le leghe di alluminio in particolare, si sono affermate dopo la scoperta del trattamento termico d'indurimento per precipitazione. Ciò nonostante, negli ultimi decenni l'impiego massiccio di alluminio si è diffuso anche nel campo automobilistico e motociclistico.

La produzione industriale dell'alluminio, come metallo strutturale, è nata con lo sviluppo dell'elettrolisi, che permise a Hall e Heroult di brevettare, contemporaneamente negli Stati Uniti e in Francia, nel 1886, il primo processo, ancora oggi utilizzato per l'ottenimento del metallo puro da un bagno fuso di criolite. Fino alla Prima guerra mondiale, tuttavia, il metallo non ebbe applicazioni allo stato puro, bensì come elemento di svariate leghe di fonderia, contenenti spesso rame. Negli anni dopo la Seconda guerra mondiale, l'alluminio entrò in concorrenza, come conduttore, con il rame e da allora lo sviluppo di questo metallo ha avuto un crescendo impressionante, fino a fargli occupare il primo posto nei consumi di materiali metallici non ferrosi.

Le principali proprietà sono:

- Basso peso specifico.
- Buone caratteristiche meccaniche delle leghe, con rapporti resistenza meccanica/peso superiore a molti acciai.
- Elevata riflettività.
- Basso potere radiante.
- Elevata resistenza alla corrosione.
- Alta conducibilità elettrica e termica.
- Atossico e amagnetico.
- Elevata lavorabilità a caldo e a freddo.
- Elevata saldabilità a gas, all'arco elettrico e per resistenza.

Gli elementi di lega più comuni, introdotti nell'alluminio sono rame, silicio, magnesio, manganese e zinco e, occasionalmente, nichel e cromo. Il loro effetto principale è quello di accrescere il carico unitario di rottura e di snervamento e la durezza, per soluzione solida e per precipitazione, anche se con una riduzione di duttilità. L'uso di tali elementi, abbinati in alcuni tipi di lega a trattamenti d'incrudimento, può accrescere il carico unitario di rottura fino a circa **750 MPa** nelle leghe semi-lavorate e a **300 MPa** nelle leghe in getto.

Tra le aggiunte secondarie, il manganese e il cromo, in piccoli tenori, migliorano la resistenza alla corrosione; il nichel accresce la resistenza meccanica a caldo, ma abbassa la resistenza alla corrosione, così come il ferro ed il rame, aggiunti in leghe contenenti più del **3%** di silicio, per annullare la fragilità a caldo; il piombo ed il selenio, migliorano la lavorabilità alle macchine automatiche; il titanio, il niobio, lo zirconio tendono ad affinare il grano. Il litio è aggiunto in alcune leghe recenti per ridurre la densità e consentire maggiori risparmi in termini di peso, circa il **4%** per ogni percentuale di litio in più aggiunto.

	Densità kg/dm ³	Modulo di Young GPa	R _s MPa
Leghe di alluminio	2,71	70	30-750
Leghe di titanio	4,75	140	290-1520
Leghe di magnesio	1,74	45	21-140
Leghe di berillio	1,85	287	170-540
Acciaio	7,8	200	200-2400

Fig. 2.1 principali caratteristiche dei metalli leggeri e confronto con l'acciaio.

2.2 DESIGNAZIONE CONVENZIONALE.

La designazione europea dell'alluminio e delle leghe semilavorate (UNI EN 573) è basata sulla designazione internazionale, fissata fin dal 1954, dall'Aluminium Association. Prevede un sistema di classificazione a quattro cifre, precedute dal prefisso EN, seguito da uno spazio, da una lettera A che indica che si tratta di una lega di alluminio, da una lettera W a indicare un prodotto semilavorato e da un trattino dopo le quattro cifre che indicano la composizione chimica della lega, può essere aggiunta un'ulteriore lettera a rappresentare una particolare variazione della lega a carattere nazionale.

Alloy	Main alloying element
1xx.x	Pure aluminum, 99.00% max
2xx.x	Copper
3xx.x	Silicon, with added copper and/or magnesium
4xx.x	Silicon
5xx.x	Magnesium
7xx.x	Zinc
8xx.x	Tin
9xx.x	Other elements
6xx.x	Unused series

Fig. 2.2 Designazione convenzionale dell'alluminio e delle leghe di alluminio.

Alla designazione della lega, segue, separata da un trattino, quella dello stato metallurgico, costituita da una lettera, che individua lo stato base e, una o più cifre dello stato specifico. Queste cifre fanno riferimento alla sequenza specifica di trattamenti di base che influenzano le caratteristiche della lega. Con la lettera "F" si definisce il materiale uscente dal normale ciclo di produzione, grezzo di lavorazione, per il quale non sono garantite le proprietà meccaniche. Per le restanti lettere si trovano tutte le informazioni in Fig. 2.3.

Sigla	Stato metallurgico		
F	Grezzo di lavorazione		
O(z)	ricotto	O1	Ricotto ad alta temperatura e raffreddato lentamente
		O2	Sottoposto a trattamento termomeccanico
		O3	Omogeneizzato
Hxy(z)	incrudito	H1y(z)	Incrudito
		H2y(z)	Incrudito e parzialmente ricotto
		H3y(z)	Incrudito e stabilizzato
		H4y(z)	Incrudito e rivestito
		Hx9(z) extra-incrudito Hx8(z) massimo incrudimento Hx7(z) -- Hx6(z) 3/4 di incrudimento Hx5(z) -- Hx4(z) semi-incrudimento Hx3(z) -- Hx2(z) 1/4 di incrudimento Hx1(z) --	
(z)			
W(xxh)	Solubilizzato (temprato e invecchiato naturalmente esprimendo la durata xx in h)		
Tx(yy)	trattato termicamente	T1(yy)	Raffreddato dopo lavorazione plastica a caldo e invecchiato naturalmente
		T2(yy)	Raffreddato dopo lavorazione plastica a caldo, deformato plasticamente a freddo e invecchiato naturalmente
		T3(yy)	Solubilizzato, deformato plasticamente a freddo e invecchiato naturalmente
		T4(yy)	Solubilizzato e invecchiato naturalmente
		T5(yy)	Raffreddato dopo lavorazione plastica a caldo e invecchiato artificialmente
		T6(yy)	Solubilizzato e invecchiato artificialmente
		T7(yy)	Solubilizzato e sovrainvecchiato/stabilizzato
		T8(yy>	Solubilizzato, lavorato plasticamente a freddo e invecchiato artificialmente
		T9(yy)	Solubilizzato, invecchiato artificialmente e poi lavorato plasticamente a freddo
(yy)			
(z) Hx11 incruditi non qualificabili come ricotti o come Hx1 H112 deformati a caldo o con ridotta deformazione a freddo H116 per leghe della serie 5xxx con limiti nelle caratteristiche meccaniche e resistenza alla corrosione esfoliante Hxx4 lamiere e nastri laminati, bugnati o goffrati Hxx5 tubi ottenuti per saldatura (yy) una o più cifre per indicare particolari modificazioni del trattamento			

Fig. 2.3 sigla degli stati metallurgici dell'alluminio e delle leghe di alluminio (UNI EN 515).

2.2.1 LE LEGHE DI ALLUMINIO.

I. Alluminio commercialmente puro (Serie 1XXX)

L'alluminio è spesso utilizzato come lega commercialmente pura, con un titolo tra **99%** e **99,7%**. Una purezza maggiore è richiesta per applicazioni elettriche e per la realizzazione di riflettori. La scelta di leghe a minor purezza, con aggiunte di ferro e rame è conveniente per le applicazioni nelle quali è richiesta buona formabilità, eccellente resistenza alla corrosione, o entrambe, e dove non è necessaria alta resistenza meccanica. L'alluminio commercialmente puro è spesso impiegato in utensileria da cucina, in vari elementi architettonici, dove è

impiegato in virtù del fatto che si presta bene a finiture decorative, in apparecchiature di stoccaggio, di trattamento di sostanze alimentari e di prodotti chimici e in assemblaggi saldati.

II. Leghe alluminio-rame (Serie 2XXX)

Le leghe alluminio-rame, contenenti oltre **2,5%** circa di rame, sono tra le principali leghe indurenti per precipitazione, idonee quindi, al trattamento termico di solubilizzazione e invecchiamento. Oltre al rame, queste leghe contengono piccoli tenori di silicio, ferro, magnesio, manganese, cromo e zirconio. Un esempio è la lega AW-2014-T4, usata per forgiati di particolare importanza, raccorderia aeronautica e parti portanti di autocarri.

Le prime leghe binarie alluminio-rame in getto contenevano per lo più intorno al **8%** di rame. Dopo trattamento termico, queste leghe, possedevano un'eccellente combinazione di resistenza e duttilità, per questo risultavano adatti per la fabbricazione di volani, contenitore dell'assale posteriore di automezzi, mozzi di autobus e di aeroplani e per carte motori. Successivamente si è ricorso a leghe con il **7%** di rame, ferro e silicio, quest'ultimo per aumentarne la colabilità e rendere possibile la realizzazione di pezzi a sezione sottile, come contenitori, coperchi, piatti e pistoni di freni idraulici.

III. Leghe alluminio-manganese (Serie 3XXX)

La porzione del diagramma di stato alluminio-manganese di riferimento per le leghe della serie **3XXX** è illustrata in Fig. 2.4. la solubilità del manganese nella fase α è massima, pari a **1,82%**, alla temperatura dell'eutettico **658°C** con la formazione della fase intermedia β costituita dal composto $MnAl_6$. Nonostante la solubilità decresca con la temperatura, le leghe di questa classe non sono indurenti per invecchiamento, poiché non avviene la precipitazione delle fasi intermedie coerenti e semicoerenti. Per la sua limitata solubilità, il manganese è aggiunto di solito in tenori non superiori a **1,5%** per evitare la precipitazione di composti intermetallici che riducono la duttilità. La più nota è la lega AW-3003 che ha buona formabilità e saldabilità, nonché una migliore resistenza alla corrosione rispetto alle leghe che contengono elementi quali rame, nichel, ferro, molto più nobili dell'alluminio. Tipiche applicazioni includono utensili e

contenitori di sostanze alimentari e chimiche, serbatoi, recipienti in pressione e tubazioni.

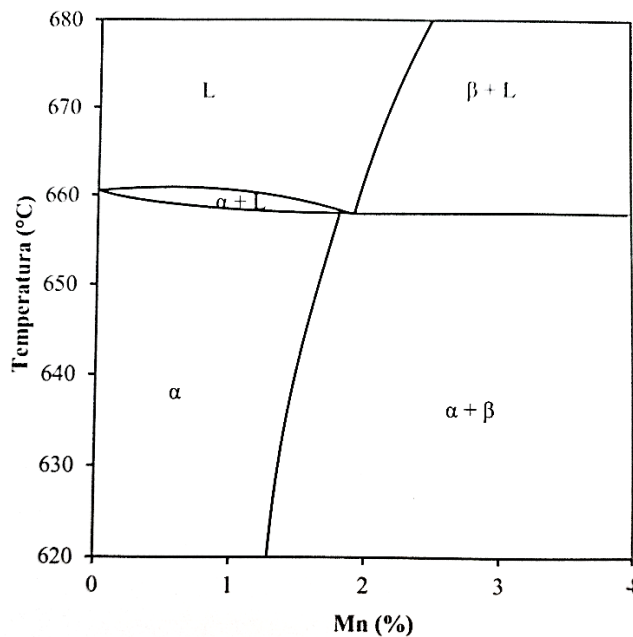


Fig. 2.4 Diagramma di stato Al-Mn.

IV. Leghe alluminio-silicio (Serie 4XXX)

Il diagramma di stato alluminio-silicio non mostra formazione di composti intermetallici ed è caratterizzato da un eutettico a **577°C**. Dalla soluzione solida sovrasatura, precipitano direttamente particelle dure di silicio. La solubilità è massima alla temperatura eutettica, pari a **1,65%**, e sebbene la linea di solvus mostri una solubilità decrescente con la temperatura, le leghe non sono trattabili termicamente, come per le leghe alluminio-manganese. Oltre al silicio, in queste leghe si aggiungono spesso elementi quali rame e magnesio.

La lega semilavorata AW-4032, contenete il **12,2%** di silicio ha buona forgiabilità e basso coefficiente di espansione termica; è usata per pistoni forgiati di automobile.

Le leghe in getto, hanno eccellente colabilità e resistenza alla corrosione; sono usate per getti di forma complessa a tenuta di pressione, come apparecchiature di manipolazione di sostanze alimentari, raccorderia marina e componenti di motori motociclistici. L'aggiunta di rame determina migliori proprietà di resistenza e di lavorabilità, rispetto alle leghe alluminio-silicio, mentre il silicio fornisce migliore colabilità e compattezza dei getti, rispetto alle leghe alluminio-

rame. La modulazione di questi due elementi è alla base di una serie di leghe in getto. Aggiunte di ferro e magnesio determinano, poi, un aumento della resistenza all'usura, richiesta ad esempio alle leghe per pistoni.

Le proprietà di talune leghe alluminio-silicio possono essere migliorate mediante inoculazione, con piccoli tenori di sodio metallico nel bagno, aggiunti poco prima della colata, per promuovere l'affinamento del grano e una struttura di conseguenza più tenace.

Tipiche applicazioni sono parti di macchine da scrivere, corpi di valvola, padelle, serbatoi.

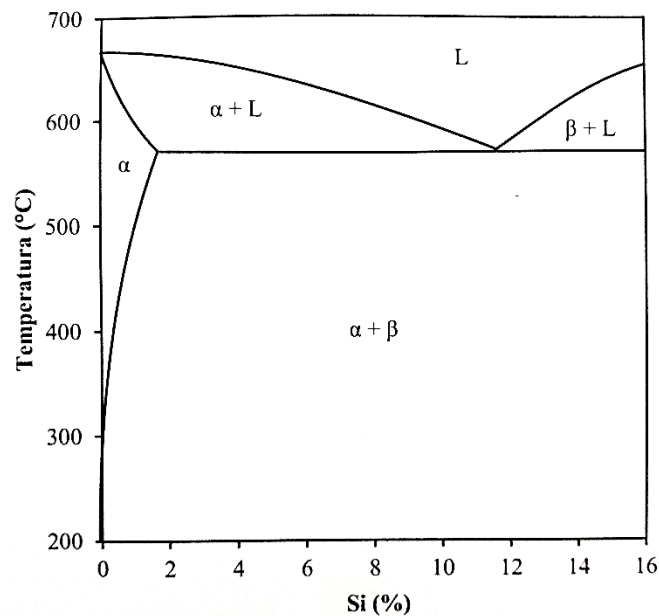


Fig. 2.5 Diagramma di stato Al-Si.

V. Leghe alluminio-magnesio (Serie 5XXX)

Il magnesio ha un ampio campo di solubilità nell'alluminio, fino a poco meno del 15% alla temperatura eutettica di 451°C. La solubilità si riduce moltissimo a temperatura ambiente ma, ciononostante, le leghe alluminio-magnesio, con meno del 7% di aggiunta, non possono essere rafforzate, in modo apprezzabile, per precipitazione. Il magnesio ha, quindi, un'azione essenzialmente di rafforzamento per soluzione solida e di incremento della capacità di incrudimento delle leghe sottoposte a deformazione plastica a freddo.

Il magnesio è presente in soluzione solida, ma può precipitare a bordo grano, nelle leghe con contenuti superiori al **3,5%**, durante trattamenti a bassa temperatura o a seguito di raffreddamenti lenti, sotto forma di **Mg_2Al_3** . La lega si sensibilizza e diventa suscettibile alla corrosione sotto sforzo e alla corrosione selettiva, pregiudicando la sua resistenza alla corrosione.

Per evitare la sensibilizzazione, le leghe ad alto contenuto di magnesio sono sottoposte ad un ciclo termico accurato, tale da rendere la precipitazione dispersa in particelle finissime all'interno del grano. Le leghe ad alto contenuto di magnesio e alta resistenza meccanica, quindi, sono impiegate allo stato metallurgico H3x, sviluppato in modo specifico per queste leghe.

Le leghe semilavorate sono caratterizzate da buona saldabilità e resistenza alla corrosione e moderata resistenza meccanica. La lega AW-5005 è usata a scopi architettonici come lega estrusa, la lega AW-5052 per tubature di olio combustibile e di gasolio, la lega AW-5083 per applicazioni marine e strutture saldate. Le leghe di alluminio-magnesio in getto hanno buona resistenza alla corrosione in acqua di mare tuttavia, la colabilità è scarsa e richiedono un'attenta esecuzione del getto in fonderia.

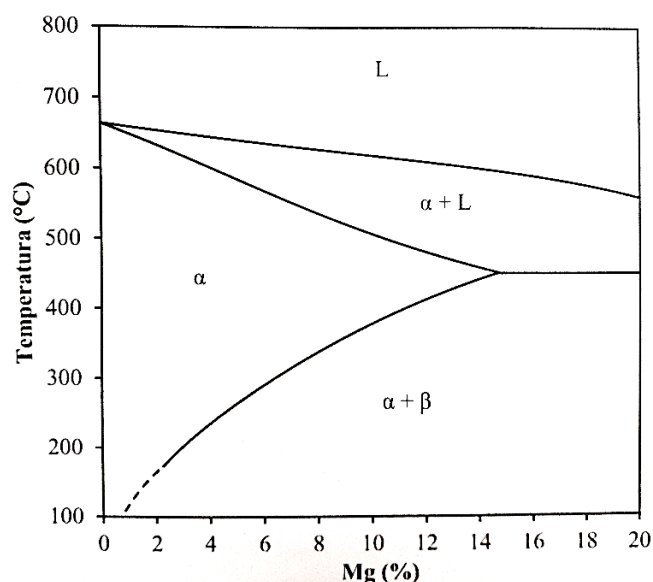


Fig. 2.6 Diagramma di stato Al-Mg.

VI. Leghe alluminio-silicio-magnesio (Serie 6XXX)

Il magnesio e il silicio si combinano a formare un composto, il siliciuro di magnesio **Mg_2Si** , che a sua volta forma un eutettico con l'alluminio. La

precipitazione del composto Mg_2Si , dopo invecchiamento, permette a queste leghe di assumere una migliore resistenza meccanica.

Queste leghe, se ben bilanciate nel rapporto Mg/Si , sono caratterizzate da eccellente resistenza alla corrosione e sono più lavorabili di altre leghe trattate termicamente. Tipiche applicazioni includono componenti di aereo, canoe, mobili, tubazioni per vuoto, parapetti di ponte ed elementi architettonici. Le leghe alluminio-silicio-magnesio hanno una combinazione ottimale di colabilità, compattezza, resistenza alle sollecitazioni e alla corrosione. Dopo trattamento termico assumono proprietà meccaniche molto vicine a quelle delle leghe alluminio-rame; sono diffuse in impieghi aeronautici, parti di macchine utensili e in getti di uso generale.

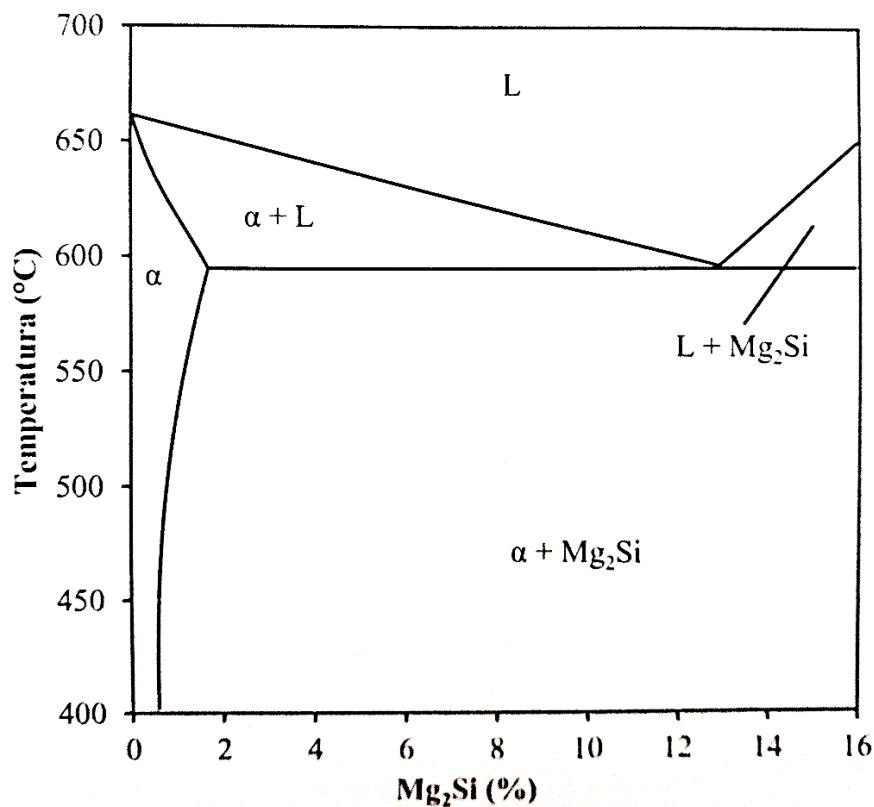


Fig. 2.7 Diagramma di stato Al-silicio di magnesio.

VII. Leghe alluminio-zinco (Serie 7XXX)

Le leghe semilavorate commerciali contengono zinco tra **1%** e **8%**, magnesio, rame e piccoli tenori di cromo. Le leghe con tenore medio-alto di zinco, tra **4%**

e **8%** e aggiunta di **1~3%** di magnesio possono essere indurite per precipitazione. In queste condizioni metallurgiche, con aggiunta di ulteriore di **1~2%** di rame, possono raggiungere le maggiori proprietà meccaniche tra le leghe di alluminio. Tipicamente, queste leghe sono utilizzate nelle strutture aeronautiche, per le parti soggette alle maggiori sollecitazioni.

Sia lo zinco sia il magnesio hanno un'alta solubilità nell'alluminio. La solubilità dello zinco è del **31,5%** a **275°C** e decresce a **5,6%** a **125°C**. A seguito di un ciclo di trattamento di solubilizzazione e di invecchiamento, dalla soluzione sovrasatura a temperatura ambiente possono formarsi dapprima delle zone GP che poi si trasformano durante l'invecchiamento inizialmente nella fase η' , a struttura monoclinica, e poi nella fase esagonale η , del composto intermetallico ***MgZn₂***.

Le condizioni di massimo indurimento sono associate a un'alta densità delle zone GP, ottenuta con un doppio invecchiamento a temperatura bassa seguito da un secondo invecchiamento a **120~150°C**.

La più elevata resistenza a trazione di tutte le leghe di alluminio è raggiunta dai tipi AW-7075, 7079 e 7178.

Rispetto a queste, le leghe AW-7004 e 7005, con zinco e magnesio senza rame, meno di **0,1%** hanno resistenze intermedie, ma possono essere facilmente saldate.

Le leghe a maggiore resistenza meccanica sono suscettibili di corrosione sotto sforzo se sollecitate a trazione in un ambiente corrosivo. Per ridurre la suscettibilità a questa forma di cedimento, si aggiunge cromo in piccoli tenori e si utilizza la lega in condizioni di sovra invecchiamento, allo stato metallurgico T73, caratterizzato da minore resistenza meccanica.

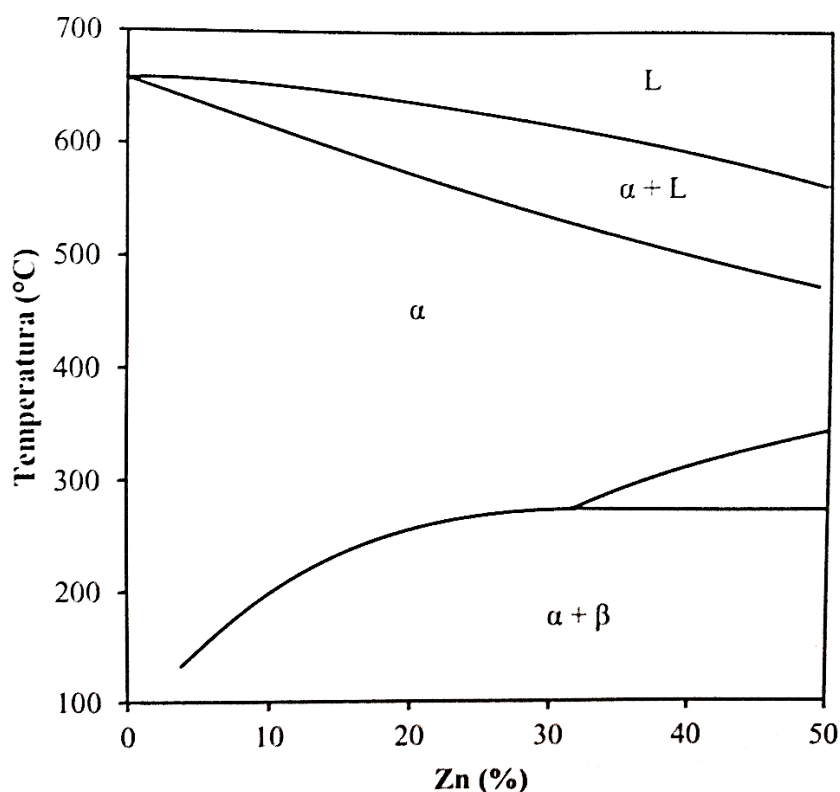


Fig. 2.8 Diagramma di stato Al-Zn.

2.3 ALLUMINIO 5754.

Esistono diverse leghe di alluminio e il nostro materiale si pone all'interno della 5xxx. Questa classe presenta un alto tenore di magnesio che conferisce doti di duttilità e lavorabilità oltre a una buona resistenza a corrosione e al calore. La particolarità di questo alluminio è la capacità di migliorare le sue proprietà tramite lavorazioni meccaniche: grazie alla presenza del magnesio il materiale riesce, a seguito di lavorazione a freddo, ad ottenere un effetto indurente senza perdere in duttilità. Il trattamento realizzato su questo tipo di alluminio è l'incrudimento, eseguito tramite deformazione plastica del materiale, solitamente, a seguito di trafilatura, laminazione o durante la messa in opera con piegatura, imbutitura o martellatura. Questa classe di allumini è solitamente impiegata per la realizzazione di laminati, in quanto, come visto precedentemente, a seguito di deformazioni plastiche, migliora le proprie caratteristiche meccaniche; è molto utilizzata nella produzione di serbatoi per carburante, rivetti esposti in ambienti aggressivi, stampi e componenti del settore navale.

	Al	Mg	Mn	Si	Fe	Cr	Zn	Ti	Cu
%present	93,6-97,3 %	2,6-3,6 %	0,5 %	0,4 %	0,4%	0,3 %	0,2 %	0,15 %	0,10 %

Fig. 2.9 Composizione chimica alluminio 5754.

2.4 TRATTAMENTO H22.

Gli allumini delle classi 1xxx, 3xxx, 4xxx e 5xxx sono quelli che non ricevono benefici, in termini di proprietà meccaniche, dai trattamenti termici, e che possono aumentare la propria resistenza solo a seguito di deformazioni plastiche a freddo.

Il 5754 testato, presentava, infatti, una lavorazione del tipo H22: ciò significa che questo materiale è stato per prima cosa incrudito tramite deformazione plastica, più precisamente attraverso la laminazione e questa informazione ci viene data dalla H all'interno della sigla, che identifica il trattamento.

L'azione di incrudire il materiale porta, però, a delle conseguenze come il calo drastico della duttilità e, quindi, l'impossibilità di deformarlo, perciò è stato necessario eseguire, in seguito, un processo di ricottura parziale per conferire nuovamente elasticità al materiale e limitare possibili tensioni residue. Nella Fig.2.10 viene spiegato il significato della sigla H22 e le altre combinazioni di trattamenti *post-incrudimento*.

	<ul style="list-style-type: none"> • Il primo carattere (H) identifica la laminazione a freddo. • Il secondo carattere identifica lo stato di fornitura.
H1X	Il materiale è solamente incrudito per laminazione.
H2X	Incrudito per laminazione e parzialmente ricotto: indica il grado di deformazione dopo la ricottura.
H3X	Incrudito per laminazione e stabilizzato in forno: indica il grado di deformazione dopo la stabilizzazione (=ricotto a bassa temperatura)
H4X	Il materiale ha subito una lavorazione ulteriore alla laminazione a freddo (verniciatura o goffratura), quindi le caratteristiche meccaniche possono essere leggermente alterate.
	<ul style="list-style-type: none"> • Il terzo carattere infine indica lo stato fisico dell'Alluminio.
H0	Ricotto
HX2	1/4 CRUDO
HX4	SEMI CRUDO
HX6	3/4 CRUDO
HX8	CRUDO
HX9	EXTRA CRUDO

Fig. 2.10 Riepilogo degli stati fisici di un alluminio incrudito tramite laminazione. (a cura di Origoni Zanoletti S.p.A.)

2.5 I LAMINATI.

Il materiale in esame, essendo un prodotto della laminazione, è caratterizzato, microscopicamente, da un'orientazione preferenziale dei grani. Come graficamente spiegato dalla Fig. 2.11 questa disposizione, inizialmente casuale, tende ad organizzarsi in fibre parallele al verso di estrusione; questa nuova disposizione dei grani creerà una direzione preferenziale, quella del verso di laminazione, lungo la quale il materiale avrà le massime proprietà meccaniche e sarà questa l'orientazione utilizzata preferenzialmente nella progettazione.

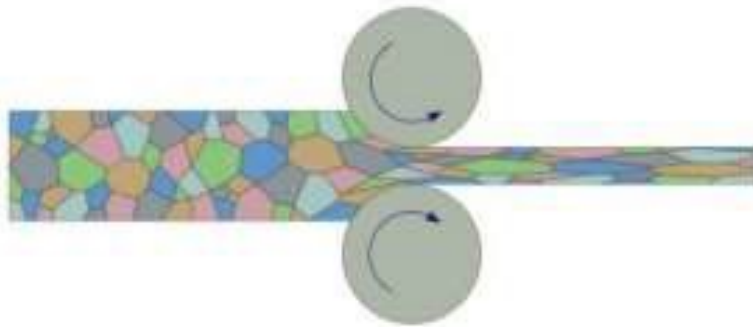


Fig. 2.11 Rappresentazione di come la laminazione induca una disposizione forzata dei grani parallela al verso di estrusione.

2.5.1 ANISOTROPIA PLANARE.

Quanto precedentemente introdotto a proposito dei laminati induce a pensare che, utilizzando il materiale con un'orientazione diversa dal verso preferenziale, questo debba avere un comportamento diverso, se non peggiore, dal punto di vista meccanico.

Tale calo prestazionale è da imputare all'anisotropia planare, ovvero alla diversa risposta a uguali sollecitazioni applicate lungo direzioni differenti. Si è voluto, quindi, indagare su questo aspetto, in quanto dalle lamiere erano stati ricavati sia provini longitudinali al verso d'estrusione, sia trasversali.

Questi provini, distinguibili ad occhio nudo per la diversa orientazione delle fibre come da Fig. 2.12, sono stati entrambi testati a trazione e poi sollecitati a stessi carichi di fatica per confrontare il loro comportamento.



Fig. 2.12 Particolare di due provini uno trasversale [destra] e l'altro longitudinale [sinistra], utilizzati per prove di fatica.

2.6 I PROVINI.

Sono stati ricavati da una lamiera spessa 4mm attraverso la tecnica del taglio ad acqua. Si è voluto usare questa tecnica in quanto è l'unica che permette un elevato livello di precisione senza alterare le proprietà del materiale. Per poter ridurre la probabilità di avere punti con possibili intensificazioni delle tensioni e cercare di non creare siti per la nucleazione di cricche, per i difetti visti nel capitolo precedente, si è deciso di realizzare dei provini come quelli in Fig. 2.13 Questa particolare forma cerca di minimizzare lo spessore dei provini e di non creare condizioni di intaglio troppo gravose.

Difatti il tratto utile della sezione misura 3,5mm x 4mm, che risulta essere una superficie abbastanza piccola per poter ritenere il fattore k_b pari ad uno, ma allo stesso tempo, consente al provino di avere una superficie tale da evitare possibili instabilità elastiche, in caso di leggere compressioni durante il ciclo di carico. Parlando, invece, dei possibili intagli sul materiale, ricordando che lì vi è un aumento della tensione locale che potrebbe provocare danni sul materiale, anche con tensioni minori di quella di snervamento o rottura, i punti critici sul tratto utile sono rappresentati dai due raccordi: questi sono stati effettuati con un raggio pari a 10 mm e di fatto non creano coefficienti di intaglio apprezzabili.

2.6.1 TAGLIO AD ACQUA.

Il taglio ad acqua è una tecnologia che sfrutta la pressione dell'acqua, fino ad un massimo di 7000 bar, per riuscire a tagliare svariati tipi di materiale. Questa tecnica utilizza un getto d'acqua con l'aggiunta di abrasivi e, consente di tagliare diverse tipologie di materiale con spessori fino a 250 mm; è di fatto una tecnica che consente una precisione del decimo di millimetro, garantendo una facilità di programmazione della produzione e costi contenuti.

Il materiale abrasivo utilizzato per queste applicazioni è il Garnet, una sabbia speciale di composizione almandina, e può essere raccolto già in forma sabbiosa o da materiale roccioso macinato nella granulometria richiesta.

L'utilizzo di questo materiale permette anche di scegliere la tipologia della superficie di taglio (Fig. 2.14) e quindi, tramite agenti abrasivi più o meno grossolani, ottenere finiture più o meno buone.

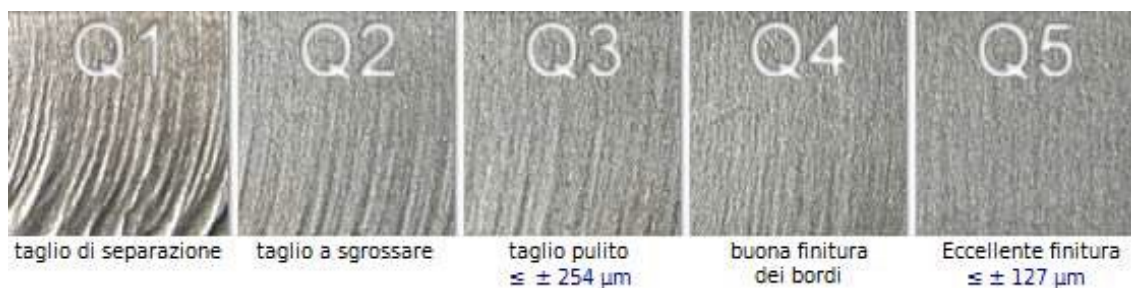


Fig. 2.14 Esempi di varie superfici a diversa finitura, ottenute tramite tecnica di taglio ad acqua.

Come precedentemente accennato, il taglio ad acqua è l'unica tecnica di taglio con la quale, a differenza del laser o della punzonatura, si evita di alterare le proprietà chimico

fisiche del materiale; difatti il taglio ad acqua è un taglio freddo e non genera ZTL, zone termicamente alterate, ciò non provoca addolcimenti del materiale o ricristallizzazioni o cali di proprietà meccaniche, inoltre non provoca danneggiamenti locali come incrudimenti, tensioni o intagli nelle superfici di taglio. Si è dunque scelto questo tipo di lavorazione meccanica per la realizzazione dei provini, per lasciare il più possibile invariate le caratteristiche del materiale e non produrre difetti superficiali.

2.6.2 DIFETTI DI LAVORAZIONE.

Il taglio ad acqua idealmente dovrebbe lasciare delle superfici pronte per essere testate e senza bisogno di ulteriori lavorazioni. I provini con i quali sono state effettuate le prove presentavano, al contrario delle aspettative, alcuni difetti significativi: il primo che subito poteva saltare all'occhio era la presenza di una bava nel punto di giunzione tra provino e lamiera (Fig.2.15), vicino al punto iniziale di taglio, evidenziato da un tratto maggiore rispetto al bordo del provino.

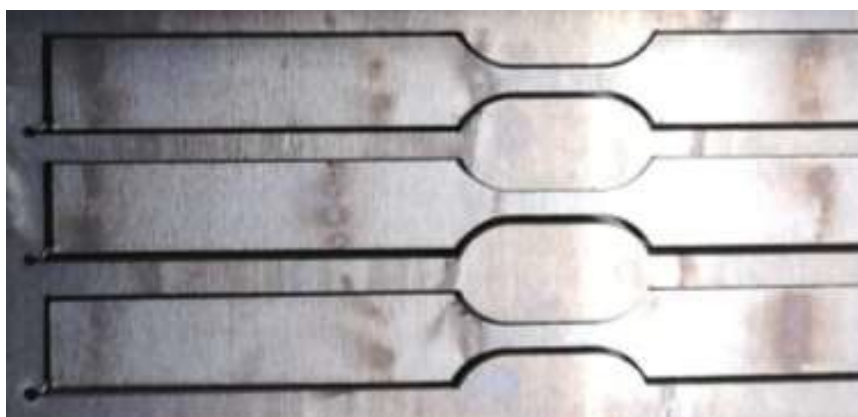


Fig. 2.15 Particolare dell'attaccatura dei provini alla lamiera. Vengono separati successivamente al taglio e ciò porta a formazione della bava.

Il taglio è stato volutamente interrotto prima di separare completamente i pezzi, così da trasportare l'intera lamina e non solo i singoli provini. Un altro difetto che non permetteva il montaggio dei provini sugli afferraggi era la larghezza dei provini; il taglio ad acqua era stato impostato per realizzare provini di questo genere (Fig. 2.16), di larghezza $14\text{mm} \pm 0,2\text{mm}$ da inserire negli afferraggi, nei quali, tramite uno scasso con leggero gioco, è possibile centrare il test. L'imprecisione del taglio, per quanto minima, ha fatto sì che i provini creassero interferenza con le piastre di fissaggio e, quindi, un'impossibilità di montare il blocco sulla macchina.

Per ovviare a questo problema si è ricorso all'ausilio di una mola da banco, con la quale sono stati smussati i bordi manualmente, al fine di riportarli nella zona di tolleranza; si è potuta effettuare una correzione così grossolana in quanto il provino viene bloccato agli afferraggi per attrito, tramite bullonatura e, di conseguenza, non sono state necessarie tolleranze strette, ma è bastato che non vi fosse interferenza tra i bordi e lo scasso sulle piastre.

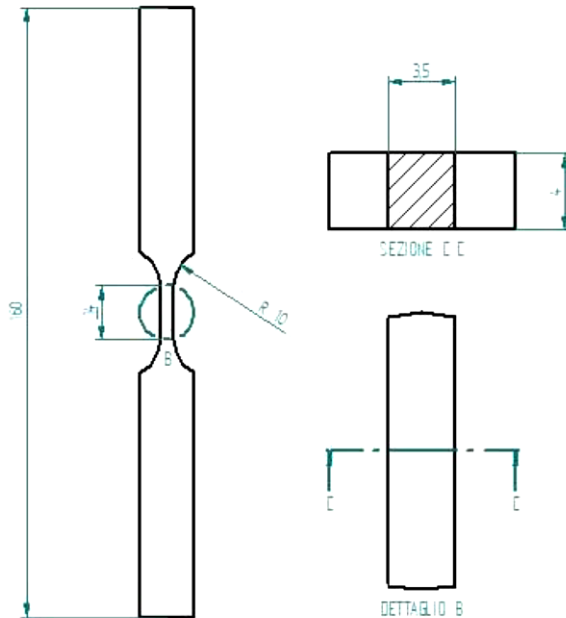


Fig. 2.16 Rappresentazione grafica di un provino tramite Solid Edge.

Il terzo e ultimo difetto era la finitura superficiale presente nel tratto utile del provino, questa è la parte che risente maggiormente del ciclo di carico in quanto presenta la sezione minore del profilo. Il taglio ad acqua utilizzato non ha lasciato una superficie abbastanza rifinita e, quindi, si è dovuto intervenire manualmente, tramite carte vetrata a diversa grana, a rifinire il tratto utile e far sì che la finitura fosse adeguata a minimizzare il più possibile il rischio di difetti superficiali o intagli. Nella Fig. 2.17 si può notare la differenza tra un provino lucidato e uno non: la porosità di quest'ultimo aumenta il fattore di intaglio generando macro-difetti e incentivando la nucleazione di cricche.



Fig. 2.17 Particolare del tratto utile di due provini, uno non lucidato, usato per la prova di trazione (sinistra) e uno lucidato, rotto per fatica (destra).

2.7 CARATTERISTICHE DEL MATERIALE.

Una volta individuate le caratteristiche e i trattamenti del materiale, si procede con la verifica delle proprietà meccaniche tramite la prova di trazione quasi statica.

Tramite la macchina Zwick/Roell Z050, sono state effettuate prove a trazione col fine di ricavare il modulo elastico del materiale, la tensione di rottura e la tensione di snervamento al 2% della deformazione.

Il provino questa volta non viene né lucidato né molato in quanto i blocchi serrano il test per attrito, mentre la finitura superficiale del tratto utile non influenza l'esito della prova.

2.7.1 PROVA DI TRAZIONE.

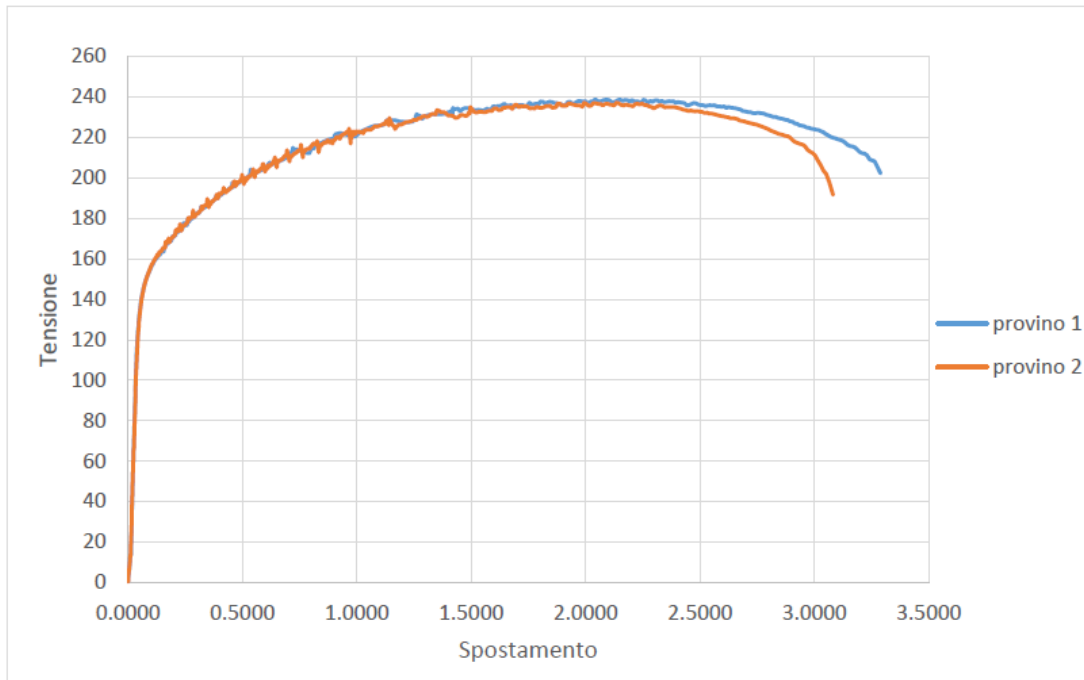
La prova di trazione prevede di montare il provino su due afferraggi e tirarlo fino al raggiungimento della tensione di rottura. Prima di posizionare il provino, questo deve essere misurato tramite un calibro, al fine di poter inserire al computer le dimensioni della sezione del tratto utile. Si può, quindi, scegliere la cella di carico con la quale registrare la forza: in questo caso si è scelto di adoperare quella da 30KN, invece che quella da 5KN, a discapito di sensibilità, per evitare di avvicinarsi troppo al limite di carico senza aver raggiunto la tensione di rottura.

Dopo aver montato la cella di carico, gli afferraggi sottostanti e posizionato il provino, si inseriscono i valori dimensionali di quest'ultimo e si registra la posizione dell'estensimetro.

L'estensimetro viene utilizzato dalla macchina per calcolare la deformazione del provino e, quindi, poter stabilire a che tensione questo raggiunga il 2% dell'allungamento totale: questa è la tensione di snervamento.

Il test è stato ripetuto su più provini in modo da aver maggiore accuratezza nei risultati come testimoniato dal grafico in Fig. 2.18.

Dal grafico, ma anche dai report della macchina, è possibile ricavare la tensione di snervamento e quella di rottura: la prima si aggira sui 140MPa, mentre la seconda rimane poco sotto i 240MPa. In Fig.2.19 riporto il riepilogo di due prove e i valori della tensione massima, di quella al 2% della deformazione e il modulo di elasticità dei singoli provini che, essendo alluminio, oscilla intorno ai 60MPa.



Specimen number:	8	7
sigla provino:	5754H22-Longitudinal12	5754H22-Longitudinal11
Specimen thickness a0:	4 mm	4 mm
Specimen width b0:	3.57 mm	3.57 mm
E-Modulus:	53.8893 kN/mm²	59.1794 kN/mm²
Upper yield stress:	224.378 N/mm²	222.127 N/mm²
Force at proof stress x%:	148.994 N/mm²	148.847 N/mm²
Force maximum. 2:	3386.31 N	3409.96 N
Force maximum.:	237.136 N/mm²	238.793 N/mm²
strain at break:	21.2524 %	22.6793 %
Strain at Fmax:	14.7186 %	14.0766 %

Fig. 2.19 Estratti dei report ottenuti dalle prove di trazione su Al 5754 H22.

Per analizzare il comportamento dell'anisotropia planare, sono stati analizzati, tramite prova di trazione, anche provini trasversali; ne sono emersi risultati simili a quelli longitudinali, come riportato in Fig.2.18. In questo particolare caso, il 5754 H22 avendo conservato parte della sua duttilità, non presenta differenza di comportamento tra provini longitudinali e trasversali in condizioni statiche e, consci di questo, è possibile, quindi, ipotizzare che non vi saranno apprezzabili differenze anche nell'ambito delle prove a fatica.

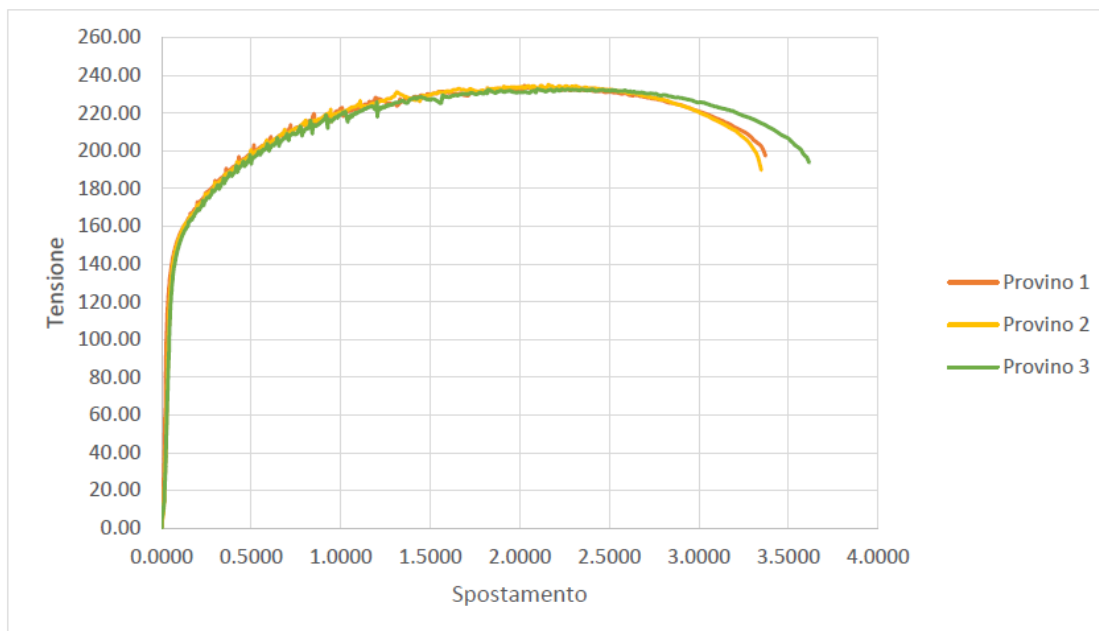


Fig. 2.20 Prove di trazione su provini trasversali di Al 5754 H22.

Di seguito si riporta anche il grafico complessivo delle prove di trazione (Fig. 2.21) a testimonianza del simile comportamento dei vari provini. I provini uno, due e tre sono tagliati trasversalmente al verso di estrusione della lamina, mentre i provini quattro e cinque sono quelli tagliati longitudinalmente.

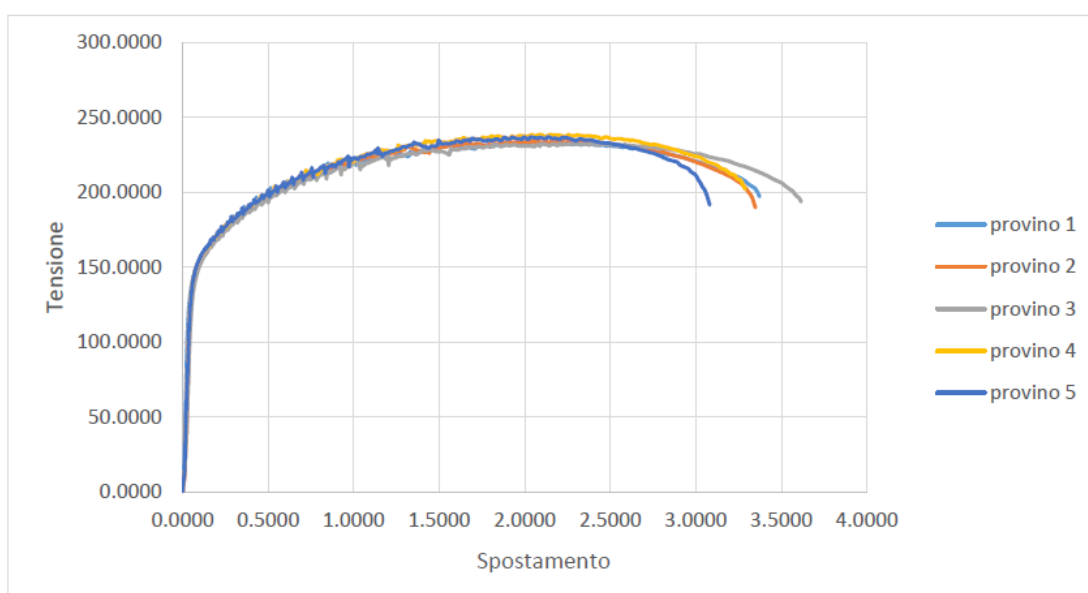


Fig. 2.21 Unione dei risultati delle cinque prove di trazione su Al 5754 H22.

Un'altra importante informazione che è possibile ricavare da questi test è il comportamento alla deformazione del materiale: essendo questo un alluminio parzialmente ricotto tenderà a conservare parte della sua duttilità, ma, tramite il trattamento di incrudimento, si sono conferite al materiale migliori proprietà meccaniche. La superficie di frattura non presenta di fatti la tipica deformazione a cono, bensì una rottura in diagonale, ma con deformazioni apprezzabili (Fig. 2.22). Questo testimonia la presenza di un materiale duttile al quale sono state migliorate le proprietà meccaniche.



Fig. 2.22 Particolare di frattura di un provino in alluminio 5754 H22 a seguito di una prova di trazione.

Questo studio funge da base di partenza per iniziare l'analisi a fatica del materiale, infatti, conoscendo i suoi limiti statici, si può ora indagare sui limiti dinamici ad alto numero di cicli.

3 IL SISTEMA DI ACQUISIZIONE E SUE MODIFICHE

3.1 LA PIATTAFORMA LABVIEW.

LabVIEW (abbreviazione di Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) è l'ambiente di sviluppo integrato per il linguaggio di programmazione visuale di National Instruments. Tale linguaggio grafico viene chiamato *Linguaggio G*.

Realizzato originariamente per Apple Macintosh nel 1986, LabVIEW viene principalmente utilizzato per programmi di acquisizione e analisi dati, controllo di processi, generazione di rapporti, o più generalmente per tutto ciò che concerne l'automazione industriale, su diverse piattaforme come Windows, Linux, Mac OS e controllori National Instruments.

Il linguaggio di programmazione usato in LabVIEW si distingue dai linguaggi tradizionali perché la sua sintassi non è scritta ma grafica, e per questa ragione viene chiamato G-Language (Graphic Language). Un programma o sottoprogramma G, denominato VI (Virtual Instrument), non esiste sotto forma di testo, ma può essere salvato solo come un file binario che può essere aperto e compilato solo da LabVIEW.

La definizione di strutture dati ed algoritmi, avviene con icone e altri oggetti grafici, ognuno dei quali incapsula funzioni diverse, uniti da linee di collegamento (*wire*), in modo da formare una sorta di diagramma di flusso. Questo tipo di linguaggio viene definito *dataflow* (flusso di dati) in quanto la sequenza di esecuzione è definita, e rappresentata dal flusso dei dati stessi attraverso i fili monodirezionali che collegano i blocchi funzionali. Poiché i dati possono anche scorrere in parallelo attraverso blocchi e fili non consecutivi, il linguaggio può realizzare spontaneamente il multithreading senza bisogno di esplicita gestione da parte del programmatore. Interessante è la modalità di realizzazione del software, che si limita spesso al semplice collegamento di blocchi già pronti, grazie alla vasta libreria di funzioni predefinite e driver per la gestione dell'hardware.

La possibilità di svincolarsi dalla pesante architettura basata sui linguaggi di testo è il punto di forza del programma, che garantisce visibilità e chiarezza nella comprensione dei processi, sia per l'utenza, sia per il programmatore.

Nonostante ciò, Labview è un programma dotato di numerose funzionalità, alcune di loro anche particolarmente complesse e tali da fornire oltre che librerie e driver di ogni genere, utili per interfacciarsi con le più comuni schede di acquisizione e controllo, anche numerose funzioni matematiche e statistiche per l'elaborazione dei dati acquisiti.

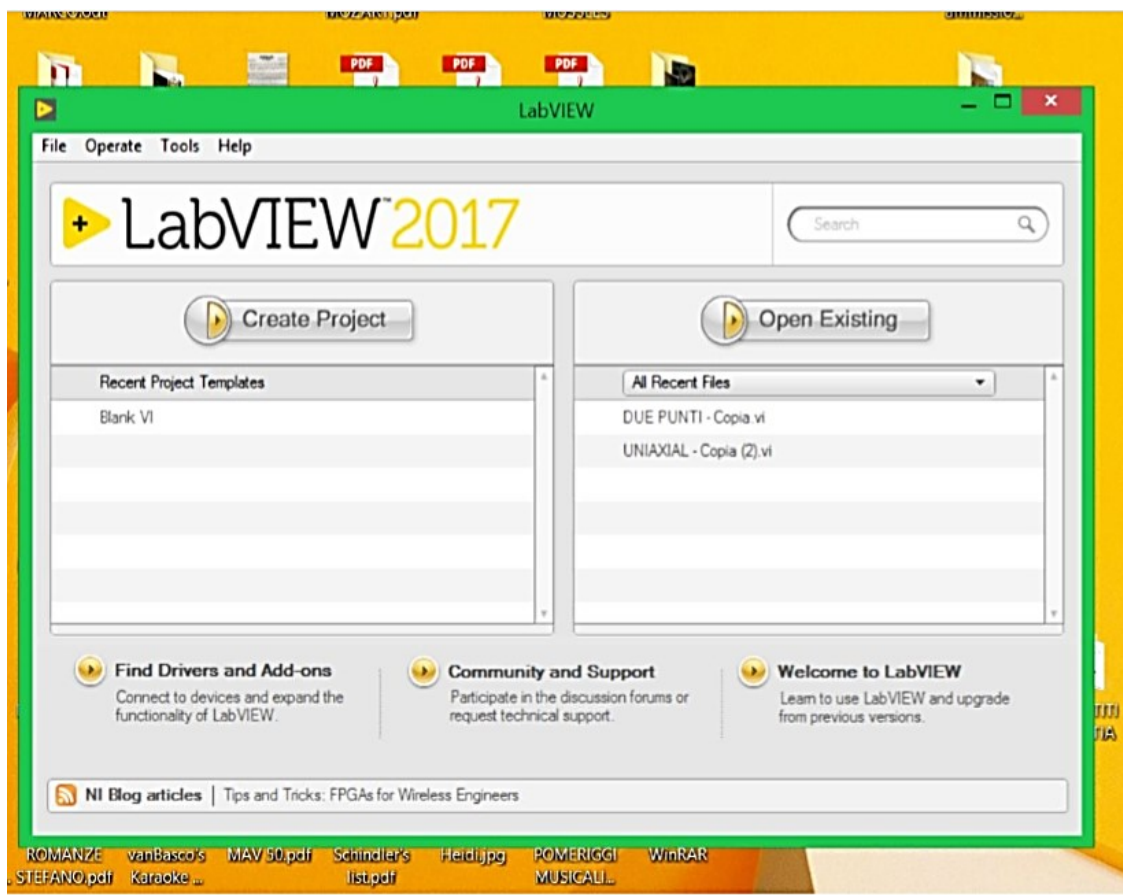


Fig. 3.1 Schermata di apertura di Labview 2017.

3.2 VIRTUAL INSTRUMENT.

L'ambiente di sviluppo Labview è stato concepito, come si è visto, per l'acquisizione di dati e segnali e per la gestione di processi. Tutto ciò, viene realizzato attraverso la costruzione di programmi chiamati "strumenti virtuali" (Virtual Instrument VI), dove il termine "strumenti", è dovuto al fatto che i VI presentano un'interfaccia analoga a quella di uno strumento di misura, mentre il termine "virtuali", indica che l'interazione avviene con un programma in esecuzione e non con un dispositivo fisico dedicato. Questo sistema permette all'operatore di effettuare misurazioni, di gestire e controllare processi, di modificare grandezze, interagendo con manopole, cursori, pulsanti, display di natura virtuale, utili ad impostare i parametri della misurazione in maniera analoga ad uno strumento di misura reale. In particolare, un VI è composto da tre parti fondamentali:

- Pannello frontale (Front Panel)
- Diagramma a blocchi funzionale (Block Diagram)
- Icona/Connettore (Icon/Connector)

3.2.1 PANNELLO FRONTALE.

Il Front Panel (Pannello Frontale) è la finestra che rappresenta l'interfaccia tra il programma e l'utilizzatore. Il nome deriva dal fatto che può ricordare com'è strutturato uno strumento reale, dotato di display, manopole, tasti ecc. Nel pannello frontale si trovano i controllori e gli indicatori del VI: i primi sono delle variabili d'ingresso che possono essere modificate agendo sul pannello frontale, gli altri sono invece delle variabili d'uscita il cui valore dipende dal programma e dai dati inseriti nei controllori, di conseguenza non dipendono dall'utente. I controllori e gli indicatori possono essere di vario genere, in questo paragrafo ci si limiterà a definire i principali che verranno usati nel sistema di acquisizione descritto nel capitolo successivo:

- Indicatori/controllori di tipo numerico: tra questi troviamo i Digital control/indicator, il Numeric knob, il Meter e il Vertical slider;

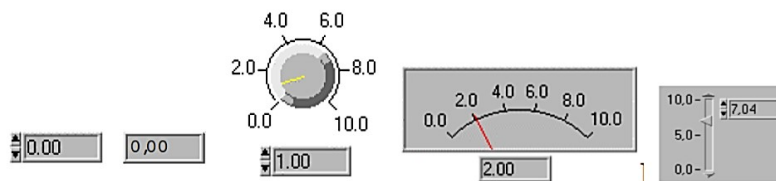


Fig. 3.2 Esempi di indicatori/controllori di tipo numerico.

- Indicatori/controllori di tipo booleano: essi possono assumere solo due stati logici indicati in Labview con i simboli TRUE e FALSE. Si presentano come pulsanti, interruttori, LED, atti a simboleggiare solo due condizioni.

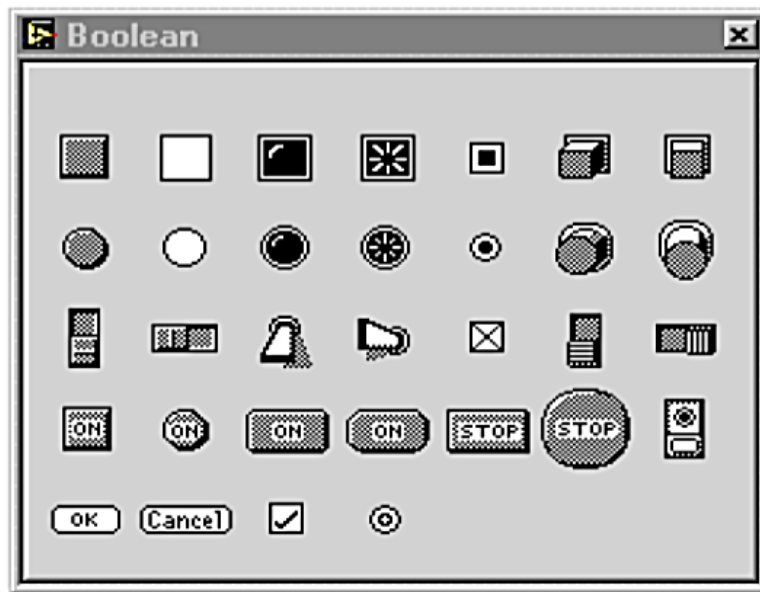


Fig. 3.3 Esempio di indicatori/controllori di tipo booleano.

- Controllori/indicatori di tipo stringa: consentono di inserire/visualizzare dati di tipo ASCII9. Quelli più comunemente utilizzati sono “String Control” e “String indicator”.



Fig. 3.4 Esempio di indicatori/controllori di tipo stringa.

Prima di fornire un semplice esempio di come è strutturato un Front Panel, si presentano in questo paragrafo altri due elementi di particolare importanza, essi sono gli elementi di tipo Array e Cluster. Gli Array possono essere intesi come collezioni di dimensione variabile di elementi dello stesso tipo; gli elementi di un Array sono individuati da un indice compreso tra 0 e n-1 e si può accedere ad essi specificando l'indice relativo all'elemento che si vuole leggere o sovrascrivere. I Cluster sono degli elementi che

consentono di raggruppare più dati anche di tipo diverso: il loro utilizzo permette di costruire dei VI più ordinati in quanto evitano di trasportare lungo il Block Diagram quantità elevate di fili.

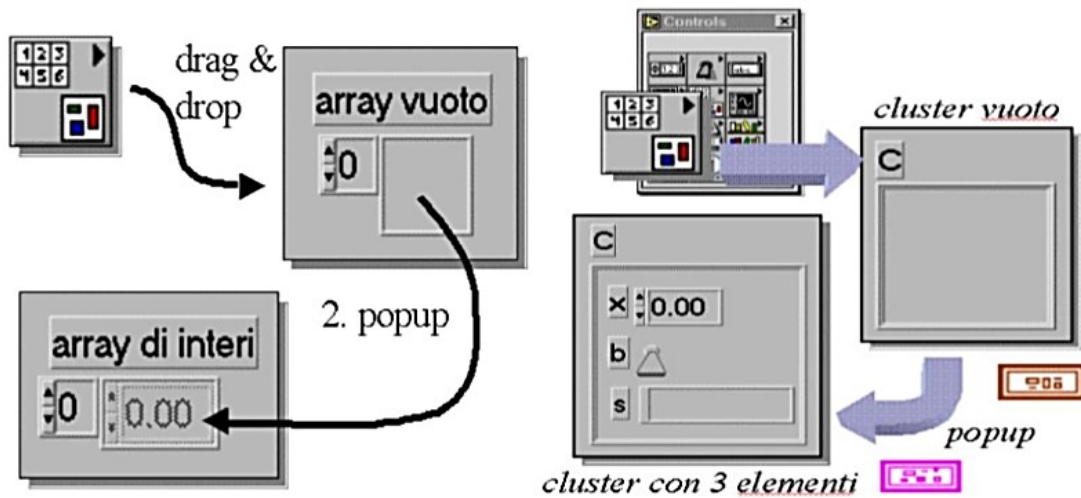


Fig. 3.5 Elementi di tipo Array e Cluster.

Relativamente ai Cluster, Labview fornisce due funzioni particolarmente utili alla loro gestione: esse sono bundle e unbundle.

- La funzione Bundle riunisce in un Cluster più collegamenti del Block Diagram;
- La funzione unbundle decompone un cluster nei singoli elementi che lo definiscono.

Tale funzione può essere utilizzata nel caso in cui sia necessario operare con un solo elemento appartenente al Cluster, come mostrato in Fig. 3.6.

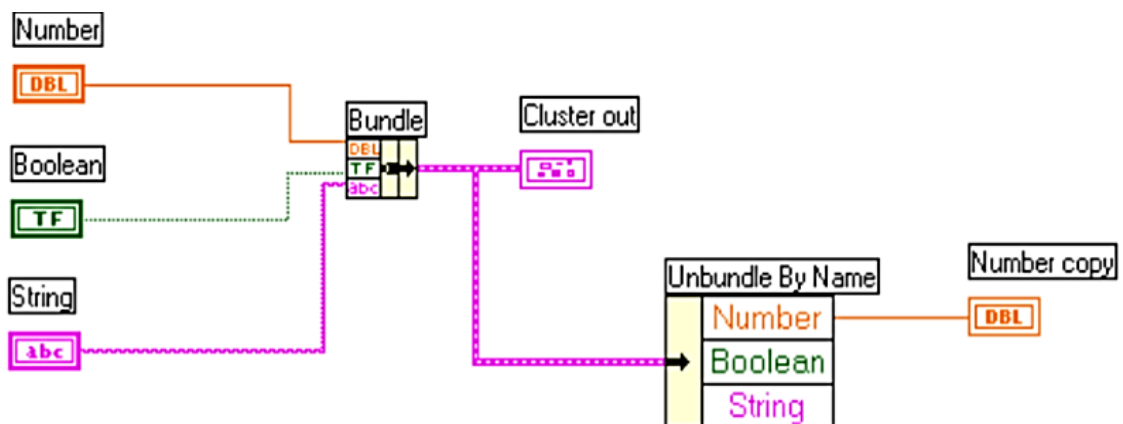


Fig. 3.6 Esempio di Bundle/Unbundle di un Cluster nel Block Diagram.

Un esempio di Front Panel è presentato in figura 3.7 che riporta l'interfaccia di un VI in grado di generare numeri casuali compresi tra due valori estremi.

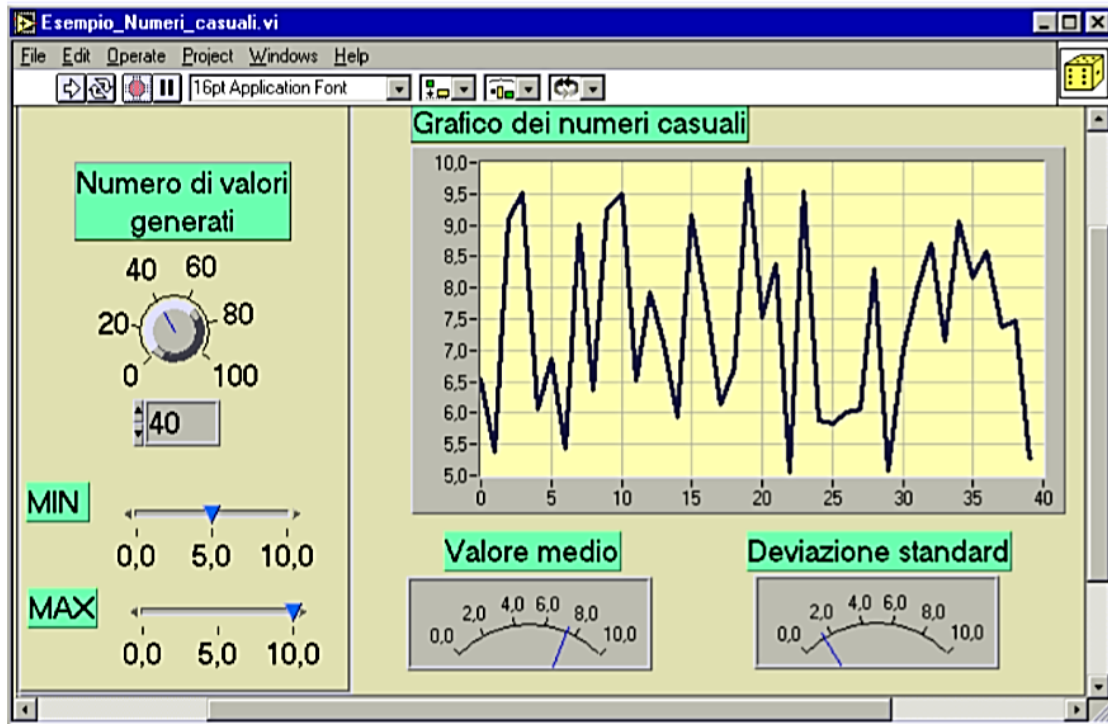


Fig. 3.7 Pannello frontale di un VI che genera una sequenza di numeri casuali.

In figura sono chiaramente evidenti i controllori, denominati “Numero di valori generati”, “Min”, e “Max”, che servono all’utenza per impostare gli ingressi, e gli indicatori, denominati “Valore medio”, “Deviazione standard”, e “Grafico dei numeri casuali”, dai quali si visualizzano le uscite. Una volta mandato in esecuzione il programma ed impostati i valori desiderati nei controllori, è possibile visualizzare istantaneamente i valori casuali generati in “Grafico dei numeri casuali”, ed i relativi “Valor Medio” e “Deviazione standard”, che vengono conseguentemente aggiornati.

3.2.2 DIAGRAMMA A BLOCCHI.

Il diagramma a blocchi rappresenta il vero e proprio corpo diagramma; è composto da nodi, terminali, collegamenti e vari sub-VI.

- I nodi consentono l'esecuzione del programma e sono analoghi alle sub-routine dei linguaggi di programmazione basati sul testo;
- I collegamenti uniscono i nodi e permettono lo scambio di informazioni.

Nel caso dell'esempio di paragrafo 3.2.1 un possibile Block Diagram è rappresentato in figura 3.8. In esso troviamo i nodi, che, una volta collegati a tutti i fili permettono di far eseguire il programma. Ad esempio, il nodo "x" vede in ingresso il generatore di numeri casuali, e il fattore di scala MAX-MIN: il risultato ottenuto viene riportato nel grafico dei numeri casuali. Le comunicazioni tra i nodi di un VI fissano un ordine nell'esecuzione delle operazioni; nel senso che se due nodi sono collegati fra loro quello che dei due fornisce dati in ingresso per l'altro viene eseguito per primo. Questo flusso di dati è definito Dataflow. Relativamente al Block Diagram è indispensabile discutere delle Structures (Strutture), che sono gli elementi base del programma presentato nel capitolo seguente. La loro funzione è quella di controllare il flusso dei dati della porzione di codice in esse contenuta. Tra quelle a disposizione troviamo il ciclo For Loop (Fig. 3.8), While Loop, il Case ed il Sequence, ognuna con opportune funzionalità.

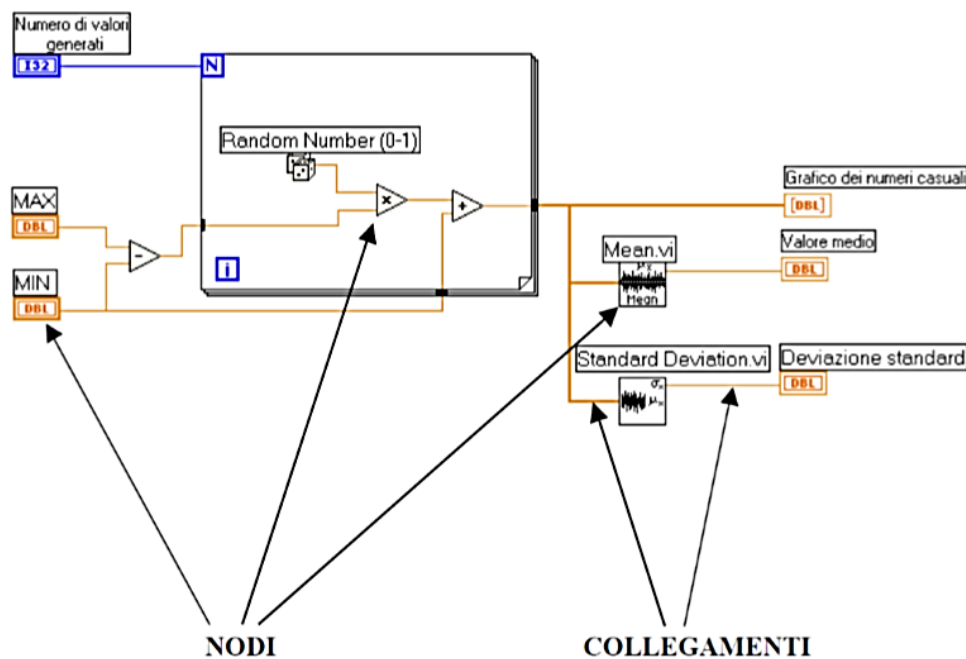


Fig. 3.8 Diagramma a blocchi corrispondente al Front Panel di Fig. 3.7.

3.2.3 ICONE E CONNETTORI.

La coppia Icon & Connector è il terzo elemento fondamentale di un VI. Un' icona è un simbolo grafico quadrato con la funzione di rappresentare il VI corrente, situata in alto a destra nella finestra del Front Panel e del Block Diagram. Le icone sono molto importanti quando il VI corrente viene impiegato in qualità di sub-VI nel Block Diagram di un altro programma. Il sub-VI può essere collegato agli altri nodi del Block Diagram. In tal caso il connettore fissa la corrispondenza tra un'area dell'icona nella quale viene eseguita la connessione ed uno degli elementi d'ingresso/uscita del pannello frontale associato al sub-VI. In figura 3.9 si possono osservare l'icona e il connettore associati al VI dell'esempio di paragrafo 3.2.1.

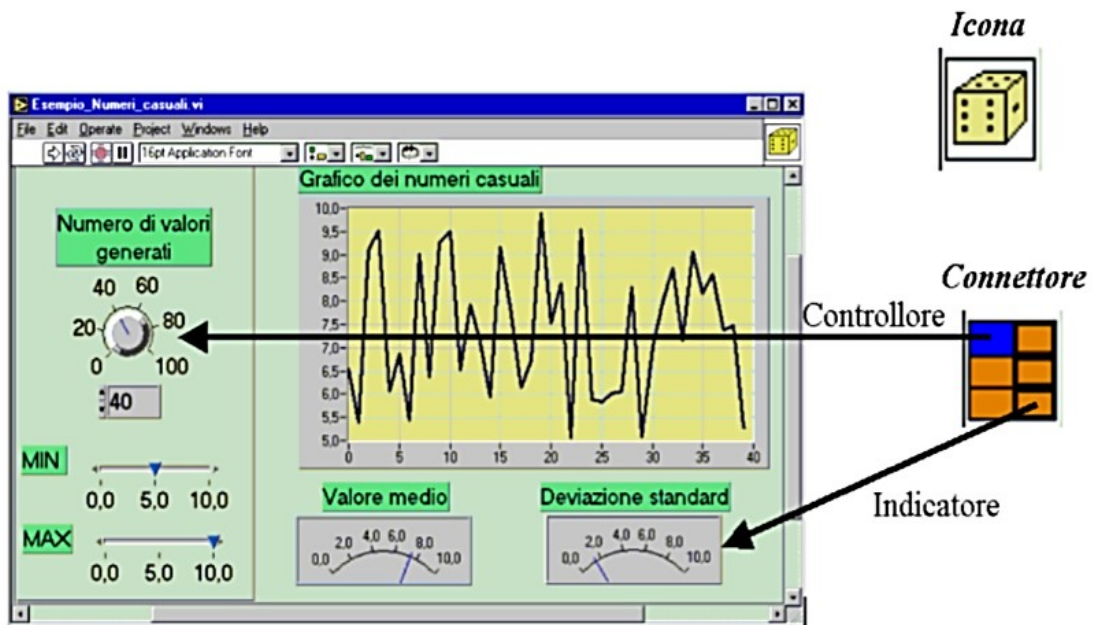


Fig. 3.9 Corrispondenza tra Front Panel, Icona e Connettore. Le frecce mostrano la corrispondenza tra le aree del connettore e le uscite/ingressi del pannello frontale.

Una volta impostata la corrispondenza, è possibile trasportare l'icona del VI all'interno del Block Diagram di un altro programma, in qualità di sub-VI. Questo è garantito dalla presenza di terminali d'ingresso e di uscita associati all'icona (Fig. 3.10), corrispondenti ai controllori/indicatori del Front Panel del VI rappresentato dall'icona stessa.

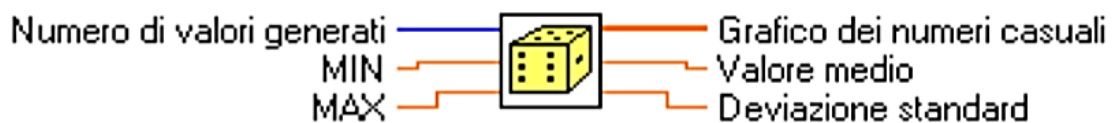


Fig. 3.10 Icona associata al VI che genera numeri casuali. A sinistra sono presenti i terminali d'ingresso associati ai controllori del pannello frontale del VI, a destra sono presenti i terminali

3.3 STRUTTURE DI CONTROLLO DEL FLUSSO DI ESECUZIONE.

Le Structures (strutture), sono elementi grafici in grado di controllare l'esecuzione del flusso di dati al loro interno, relativo alla porzione di diagramma in essi contenuta. Tra le strutture principali possiamo ricordare:

- For Loop: ripete l'esecuzione della porzione di codice in esso contenuta un determinato numero di volte;
- While Loop: ripete l'esecuzione della porzione di codice in esso contenuta fintanto che la variabile che lo controlla è True;
- Case Structure: contiene molteplici sotto-diagrammi, di cui solo uno viene eseguito in funzione del valore passato al terminale selettore;
- Flat Sequence Structure: esegue il codice nell'ordine della sequenza dei suoi sotto-diagrammi.

3.3.1 STRUTTURE FOR LOOP E WHILE LOOP.

Le strutture For Loop e While Loop vengono utilizzate per il controllo di operazioni ripetitive. La prima esegue in Block Diagram nel rettangolo che la delimita per $i = 0, 1, \dots, N - 1$ volte. Un esempio è riportato in figura 3.11.

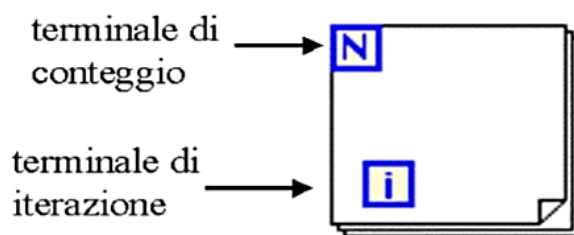


Fig. 3.11 Struttura For Loop.

La seconda (Fig. 3.12) esegue il codice nel rettangolo che la delimita fino a che al terminale di condizione non viene assegnato un valore booleano "False". Ad ogni ciclo si incrementa di 1 la variabile di conteggio che al primo ciclo vede $i = 0$.

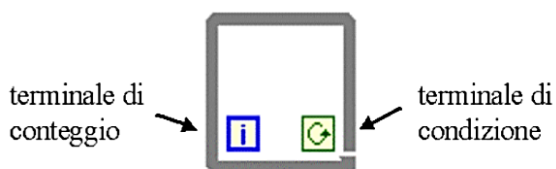


Fig. 3.12 Struttura While Loop.

Per controllare l'esecuzione dei cicli For e While, Labview mette a disposizione anche un altro elemento, denominato Shift Register. I registri a scorrimento non sono altro che delle variabili locali che trasferiscono il valore assunto da una variabile alla fine di un'iterazione all'iterazione successiva. Uno Shift Register è caratterizzato da due terminali posizionati sui bordi verticali della struttura. Il terminale di destra memorizza il valore assunto dalla variabile alla fine di un'iterazione, e lo invia al terminale di sinistra che lo trasmette all'iterazione successiva. Entrambe i terminali di uno Shift Register devono considerare lo stesso tipo di dato. L'inizializzazione dello Shift Register può essere fatta collegando una costante al terminale di sinistra (Fig. 3.13).

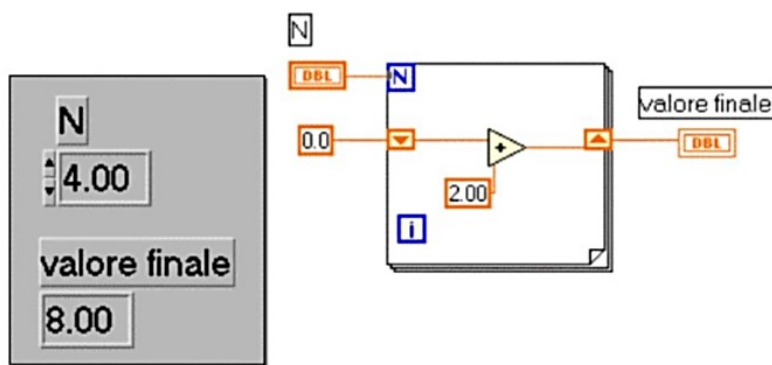


Fig. 3.13 Esempio di utilizzo dello Shift Register. Nell'esempio sono state assegnate quattro iterazioni al ciclo For. Il valore finale di ogni iterazione sommato alla costante per N=4 fornisce 8 come valore finale.

3.3.2 STRUTTURE CASE E FLAT SEQUENCE.

La struttura Case può essere caratterizzata da un numero indefinito di sotto-diagrammi, eseguibili uno alla volta in funzione del valore assunto da una variabile di controllo. Sul bordo superiore di queste strutture è visibile un identificatore atto ad indicare il diagramma che viene eseguito ad un certo istante. La variabile di controllo visualizzata nell'identificatore può essere di tipo booleano o numerico così come riportato nella figura 3.14.

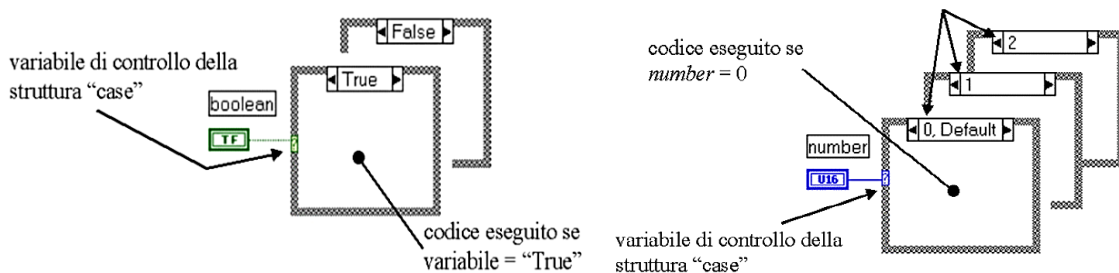


Fig. 3.14 Struttura Case con variabile di controllo booleana e numerica.

L'ultima struttura che si andrà a descrivere è la "Flat Sequence Structure", caratterizzata da uno o più sotto-diagrammi o frame che vengono eseguiti in sequenza. Il flusso dei dati per questo tipo di struttura avviene da sinistra verso destra, contrariamente a quanto accade nella struttura "Case". Ogni frame viene eseguito solo quando sono disponibili tutti i dati al suo ingresso, ciò significa che l'input di un fotogramma può dipendere soltanto dall'output del precedente.

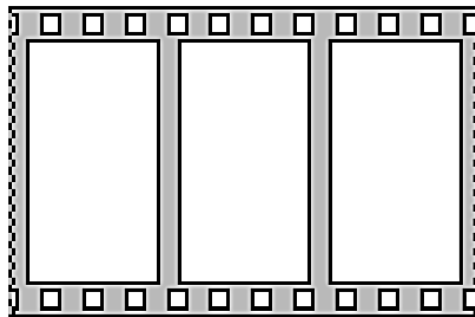


Fig. 3.15 Esempio di struttura Flat Sequence.

3.4 VISION AND MOTION SOFTWARE.

Labview è un software fornito su licenza dalla National Instrument ed è costituito da un programma base a cui è possibile aggiungere diversi pacchetti di funzioni, a seconda delle necessità dell'utente. Relativamente al sistema di acquisizione realizzato, è stata necessaria l'aggiunta del software "Vision and Motion". Questo pacchetto include un insieme di funzioni, raccolte nella Vision palette, utili all'elaborazione e all'acquisizione di dati, provenienti da immagini ottenute attraverso videocamere ad alta risoluzione. L'elemento fondamentale è il "Vision Assistant", attraverso il quale è possibile monitorare l'allungamento istantaneo dei provini attraverso l'ausilio della funzione "Pattern Matching", descritta in dettaglio nel capitolo seguente.

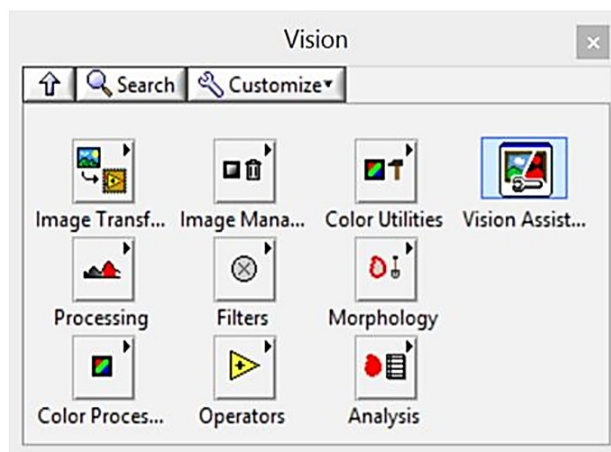


Fig. 3.16 Vision Palette.

3.5 INTRODUZIONE AL SISTEMA DI ACQUISIZIONE DI BASE.

L'idea base della sperimentazione, da cui nasce il sistema di analisi dell'avanzamento delle cricche, è stata quella di ricorrere a due sistemi di acquisizione, basati sull'utilizzo di Labview e delle annesse funzioni della libreria del "Vision and Motion". Entrambi sono stati realizzati con l'obiettivo di acquisire misure da immagini, ottenute mediante una coppia di telecamere Pixelink ad alta risoluzione.

Le immagini riportano la storia di carico di provini sollecitati da un carico assiale alterno, più comunemente detto "di fatica". Entrambe le telecamere sono state utilizzate con scopi differenti:

- La prima per acquisire le immagini da elaborare, ovvero le immagini da cui il programma può acquisire il valore della lunghezza/allungamento istantaneo del provino;
- La seconda come telecamera di riferimento, con la funzione di monitorare e controllare l'andamento della prova.

I due sistemi di acquisizione, seppur simili dal punto di vista del funzionamento, differiscono per la modalità con cui effettuano l'acquisizione delle misure dalle immagini:

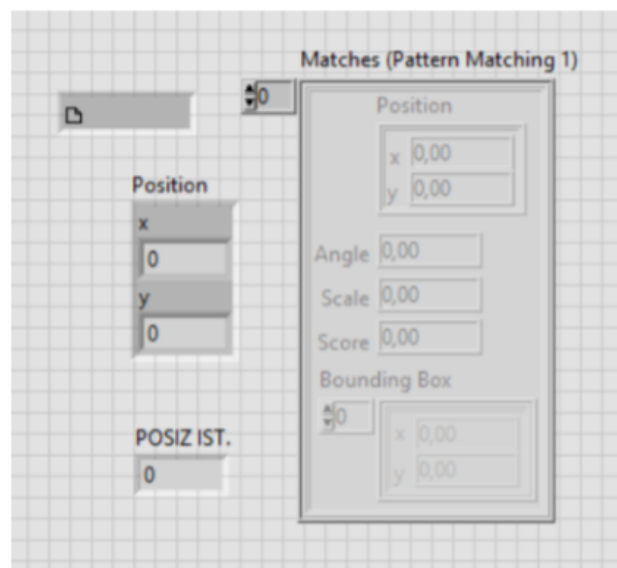
- Il primo, mediante la funzione "Pattern Matching", contenuta nella libreria di funzioni del "Vision and Motion", permette di rilevare la posizione istantanea di due punti focalizzati nell'immagine del provino. Di questi due punti viene calcolata una differenza di coordinate, al fine di rilevare la lunghezza istantanea del provino durante l'esecuzione della prova;
- Il secondo, sempre mediante l'utilizzo della funzione "Pattern Matching", permette invece di rilevare la posizione istantanea di un solo punto, e di calcolare l'allungamento del provino mediante una differenza di coordinate tra la posizione istantanea del punto e quella iniziale.

Nei prossimi paragrafi verranno esposti i due sistemi di acquisizione di base e soprattutto si cercherà di far comprendere, senza entrare troppo nello specifico, le logiche di funzionamento. Lo scopo che ci si prefigge, è quello di comprendere le criticità che caratterizzano i due sistemi una volta posti nella condizione di analizzare l'avanzamento della cricca all'interno del provino in esame. Successivamente, nell'ultimo paragrafo, si

studierà il sistema di acquisizione definitivo, sviluppato con l'obiettivo di acquisire al meglio le immagini derivanti dalla propagazione della cricca, presentando una panoramica circa il funzionamento degli strumenti utilizzati nel Front Panel e nel Block Diagram, nonché i processi di acquisizione e salvataggio delle immagini. Inoltre, verranno illustrati, passo dopo passo, le procedure con cui impostare i parametri di acquisizione affinché sia possibile portare a termine con successo le prove e l'acquisizione dati.

3.6 “DISTANZA UN PUNTO” E “DISTANZA DUE PUNTI”.

Entrambe i sistemi di acquisizione, si pongono l'obiettivo di rilevare lunghezza e allungamento istantaneo di provini sollecitati da carichi di fatica. Gli strumenti che permettono la rielaborazione delle immagini acquisite sono contenuti nei sub-VI “Distanza un punto” e “Distanza due punti”. Questi due VI, si avvalgono di importanti funzioni importate nel programma Labview mediante l'installazione del software “Vision and Motion”. La principale differenza tra i due sub-VI sta nel principio con cui effettuano le misurazioni. Il principio di acquisizione utilizzato nel sub-VI “Distanza un punto”, si ribadisce ora che è basato sulla focalizzazione di un punto nell'immagine del provino, la cui posizione è costantemente monitorata al fine di ricavare i valori dell'allungamento istantaneo, calcolato mediante una differenza di coordinate tra la posizione istantanea e la posizione iniziale. Il Front Panel e il Block Diagram sono riportati in figura 3.17.



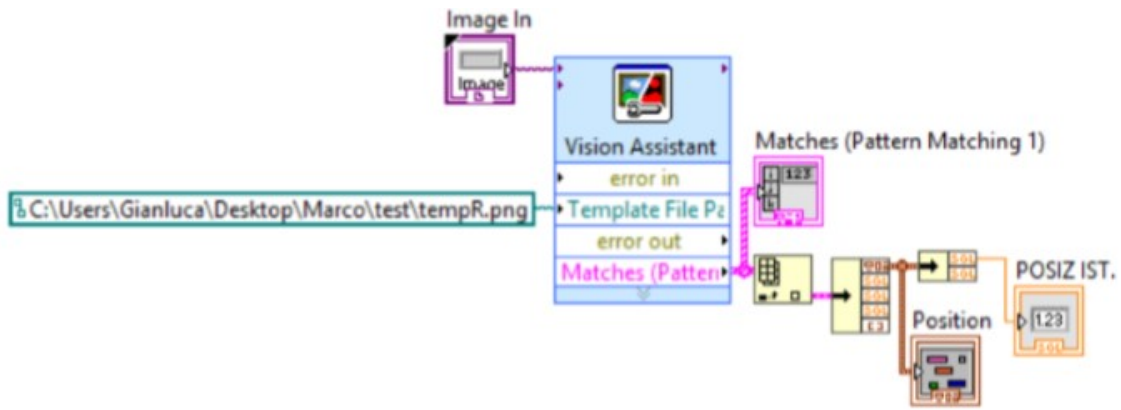


Fig.3.17 Front Panel e Block Diagram del sub-VI “Distanza un punto”.

Tra gli elementi del Front Panel è possibile notare l’indicatore “Position” e l’indicatore “POSIZIONE Istantanea”. Nel primo è riportata la posizione istantanea del punto in coordinate cartesiane, nel secondo si riporta solo la coordinata orientata lungo l’asse del provino. Il valore registrato nell’indicatore “POSIZIONE Istantanea”, ad ogni acquisizione viene utilizzato per calcolare il valore dell’allungamento istantaneo del provino. La focalizzazione del punto nell’immagine viene effettuata mediante la funzione “Pattern Matching”, disponibile nella libreria di funzioni “Machine Vision” del “Vision Assistant”, così come riportato in figura 3.18.

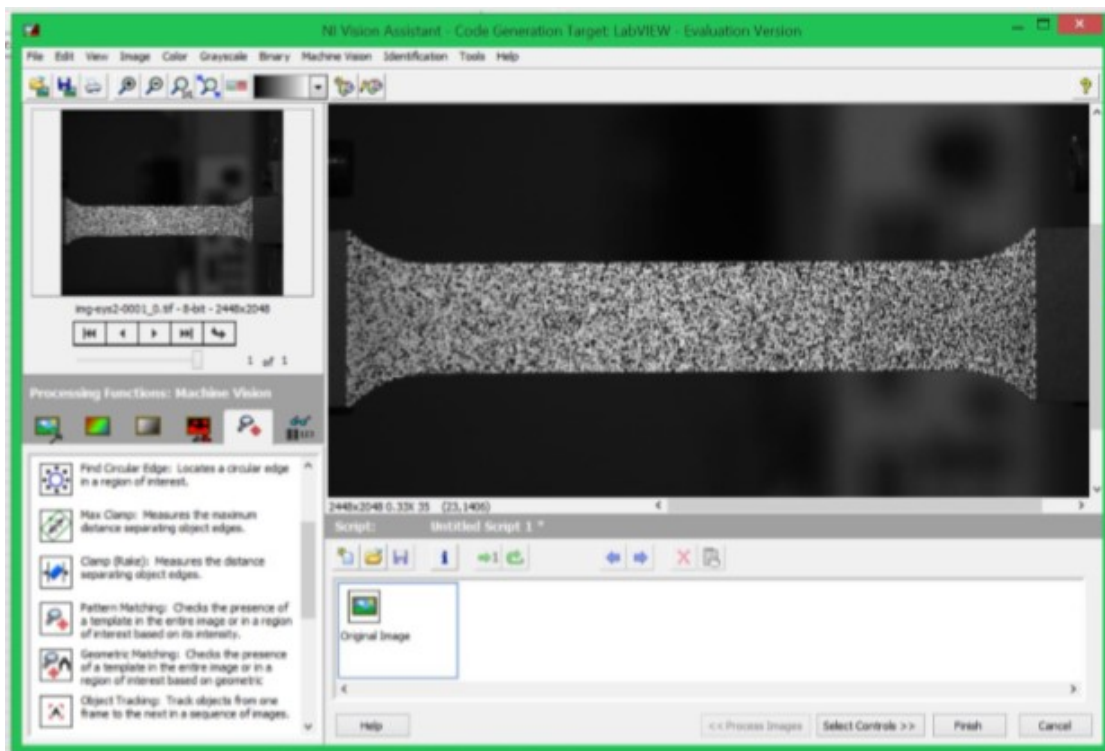


Fig.3.18 Libreria di funzioni “Machine Vision” contenuta nel “Vision Assistant”.

Selezionando la funzione “Pattern Matching” compare la schermata riportata in figura 3.19.

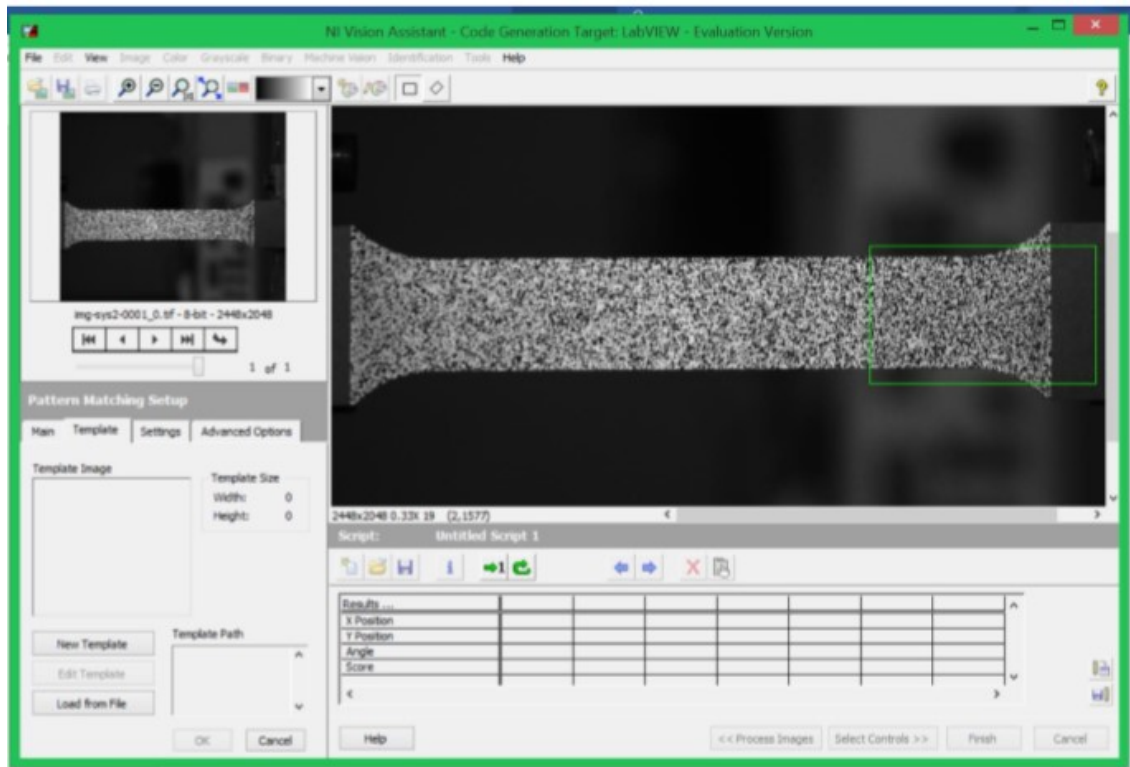


Fig. 3.19 Schermata di apertura della funzione Pattern Matching.

Com'è possibile notare dalla figura 3.19, la prima operazione che occorre effettuare è quella di definire l'area su cui è necessario che il sistema effettui la ricerca del punto. L'area rappresentata in verde infatti, impostata a piacere dall'operatore, consiste in quell'area su cui si ipotizza sia contenuta la traiettoria che il punto eseguirà durante il corso della prova. Non esistono effettivamente dei vincoli sul posizionamento di quest'area, ma se si vuole posizionarla al fine di ottenere la più alta precisione nella misura occorre tener conto di due aspetti:

- Se si restringe il campo di ricerca, si hanno meno probabilità che il sistema perda la focalizzazione del punto, poiché sicuramente il punto non verrà mai ricercato al di fuori dell'area definita. Di contro però, può accadere che durante la prova, avendo contornato un'area troppo ristretta, il punto si sposti al di fuori dell'area comportando l'impossibilità da parte del sistema di ritrovarlo; in tal caso il sistema non riuscirebbe ad acquisire misure;

- Se si allarga il campo di ricerca, si ha più certezza riguardo alla possibilità che il punto non fuoriesca dall'area, pertanto il sistema avrà sempre modo di trovarlo; ma di contro può accadere che il sistema perda, sempre all'interno del campo di ricerca, il punto focalizzato. Ciò può accadere in seguito alla presenza di tratti dell'immagine non perfettamente messi a fuoco o con contrasti di illuminazione.

Una volta eseguita questa operazione, si procede alla creazione del file "Template", ovvero si imposta, sempre all'interno del campo di ricerca, il punto di cui si vuole monitorare la posizione. Questa operazione viene effettuata cliccando su "new template". La schermata che si visualizza è quella riportata in figura 3.20.

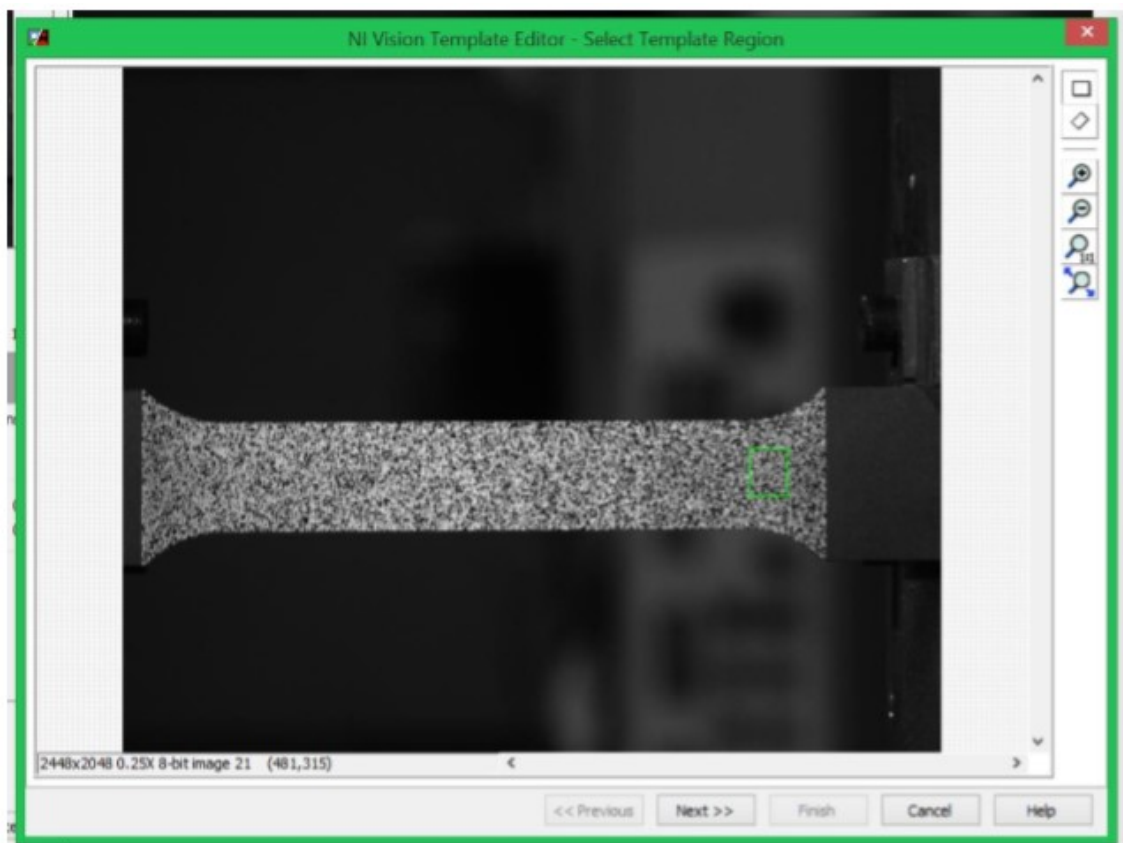


Fig.3.20 Posizionamento del punto con la creazione del file template.

Dalla figura 3.20 si nota come è stata definita l'area al centro della quale si trova il punto in esame. Effettuata questa operazione, cliccando su "Next", si giunge alla schermata di figura 3.21.

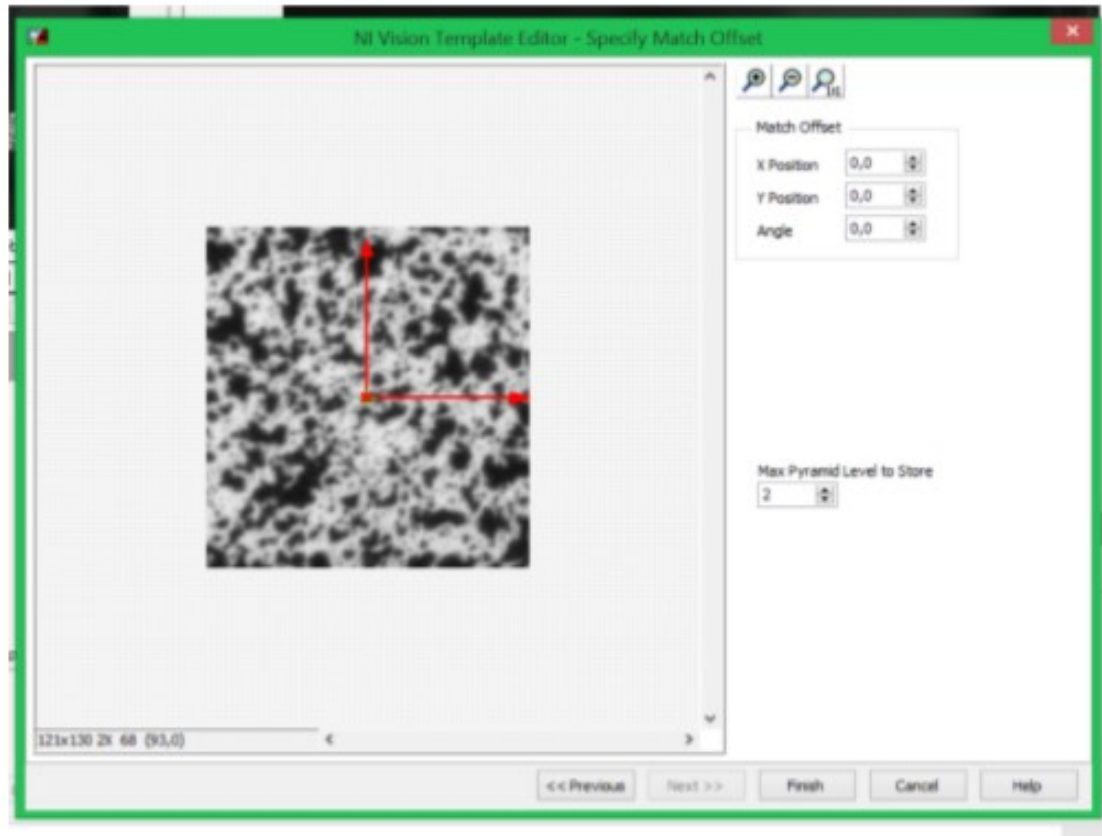


Fig.3.21 Sistema di riferimento solidale al punto di ricerca.

Come è possibile notare, in figura 3.21 è riportato il file template catturato nell'operazione precedente. Nella posizione centrale è riportato un sistema di riferimento, con la caratteristica di essere centrato nel punto di cui si vuole monitorare la posizione e di essere solidale ad esso durante il corso della prova.

Pertanto, durante la prova il sistema funzionerà monitorando costantemente la posizione di questo sistema di riferimento relativo. Cliccando su "Finish" compare la schermata in cui si definisce la cartella su cui salvare il file template catturato, in questo caso denominato "Template n 1". Una volta salvato il file realizzato, cliccando su "OK" compare la schermata riportata in figura 3.22.

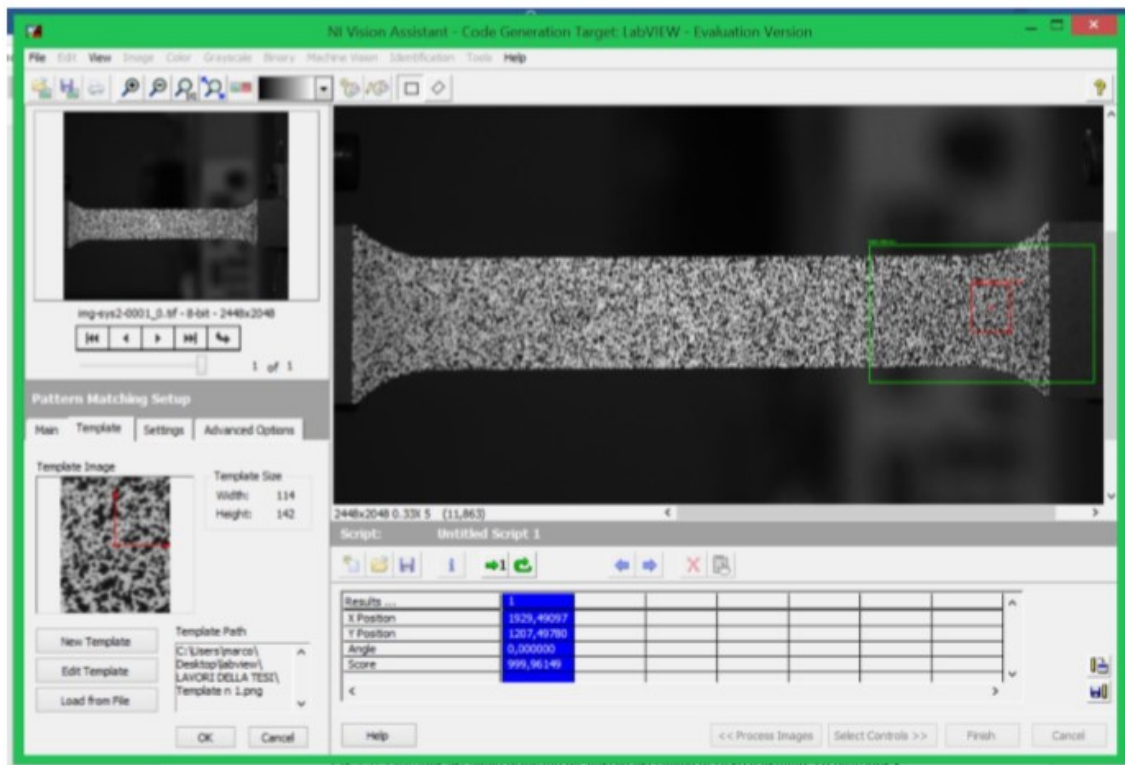


Fig.3.22 Posizione del punto acquisito all'interno del campo di ricerca definito. La posizione è definita in coordinate cartesiane nella zona evidenziata in blu.

Il punto catturato è all'interno dell'area di ricerca, pertanto il sistema è in grado di acquisirne la posizione. Avviando il test, il sub-VI "Distanza un punto" permetterà di registrare la posizione del punto istantanea, fintanto che il punto stesso rimarrà all'interno del campo di ricerca definito all'inizio della prova.

Il punto che viene catturato, nell'esecuzione dei test viene preso solitamente in corrispondenza del punto di applicazione della forza, così come riportato in figura 3.22. Questo perché l'allungamento più significativo si registra in corrispondenza delle fibre del materiale più vicine al punto di applicazione della forza, che essendo applicata solo all'estremità superiore e non omogeneamente in tutto il provino, impone che l'allungamento avvenga in maniera tanto più accentuata quanto più si è in prossimità del punto di applicazione della sollecitazione.

Si passa ora alla trattazione del sub-VI "Distanza due punti". Come si è detto nel paragrafo introduttivo, questo sistema di acquisizione si basa nella misurazione della lunghezza istantanea del provino, mediante la differenza tra le coordinate di due punti individuati alle estremità del provino stesso.

Il Front Panel e il Block Diagram sono riportati in figura 3.23. Dalla figura 3.23 si nota come anche in questo caso si è fatto utilizzo della funzione “Pattern Matching” per l’individuazione dei due punti. Dal Front Panel si notano gli indicatori “Position”, “Position2” e “DISTANZA”. Nei primi due sono riportate le posizioni istantanee dei due punti in coordinate cartesiane, nell’indicatore “DISTANZA” invece, è riportata la lunghezza del provino, il cui valore è calcolato dalla differenza delle coordinate dei due punti orientate nella direzione dell’asse del provino.

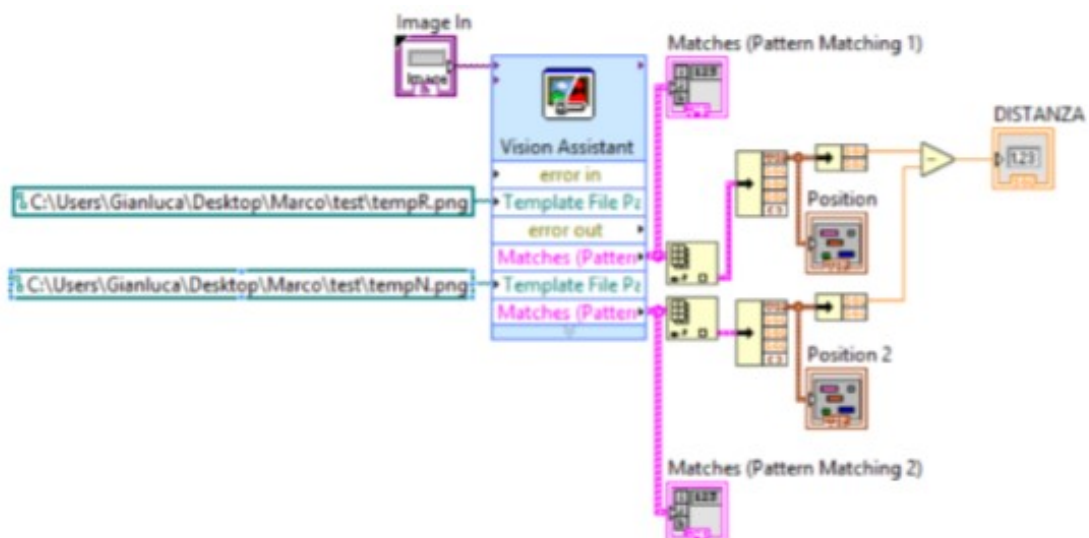
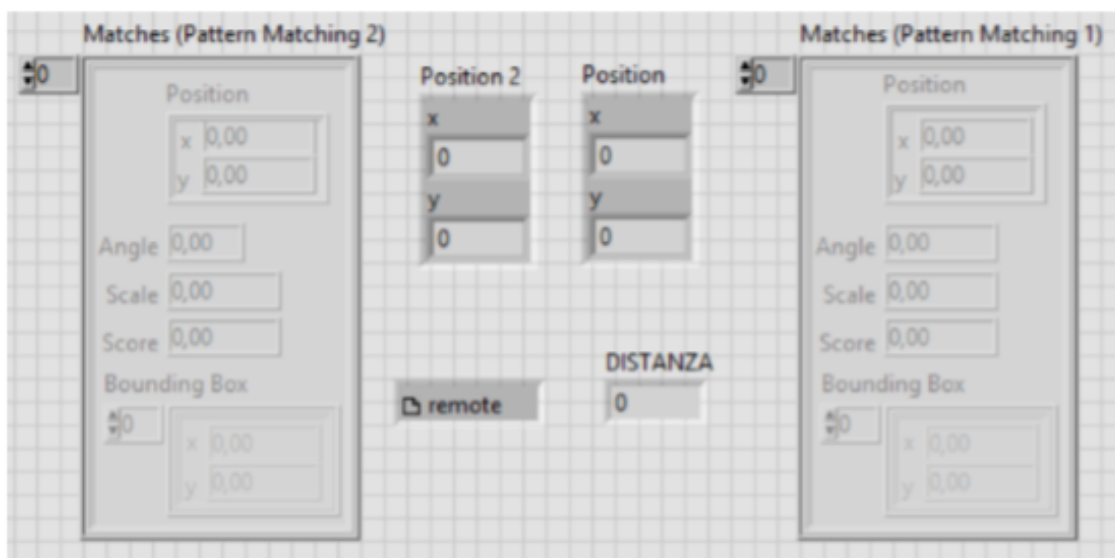


Fig.3.23 Front Panel e Block Diagram del sub-VI “Distanza due punti”.

I criteri utilizzati per la creazione dei due Pattern sono analoghi a quelli descritti per il sub-VI “Distanza un punto” pertanto si riporta nella figura 3.24 il principio con cui sono stati posizionati. Dalla figura 3.24 si evince che i punti individuati alle estremità del provino sono caratterizzati da campi di ricerca differenti. Il motivo per cui si è adottata questa soluzione è dovuto al principio con cui viene sollecitato il provino. Infatti, anche in questo caso il provino è sollecitato da un carico alterno applicato solo all'estremità superiore, poiché quella inferiore è fissa e vincolata al morsetto della macchina, pertanto l'allungamento sarà tanto più significativo quanto più si prendono in considerazione punti vicini all'estremità superiore.

Ciò spiega il motivo per cui ai due punti è stato assegnato un campo di ricerca diverso. Prendendo in considerazione ciascuno dei due punti si nota che:

- Il punto posizionato alla base del provino, essendo molto distante dal punto di applicazione della forza, subirà uno spostamento pressoché minimo. Pertanto, in questo caso, per i principi sopracitati, si assegna un'area di ricerca sufficientemente concentrata;
- Il punto posizionato alla testa del provino, essendo in prossimità del punto di applicazione della forza, subirà uno spostamento significativo. Pertanto, in questo caso, si assegna un'area di ricerca sufficientemente grande tale da garantire la focalizzazione del punto per tutta la durata della prova.

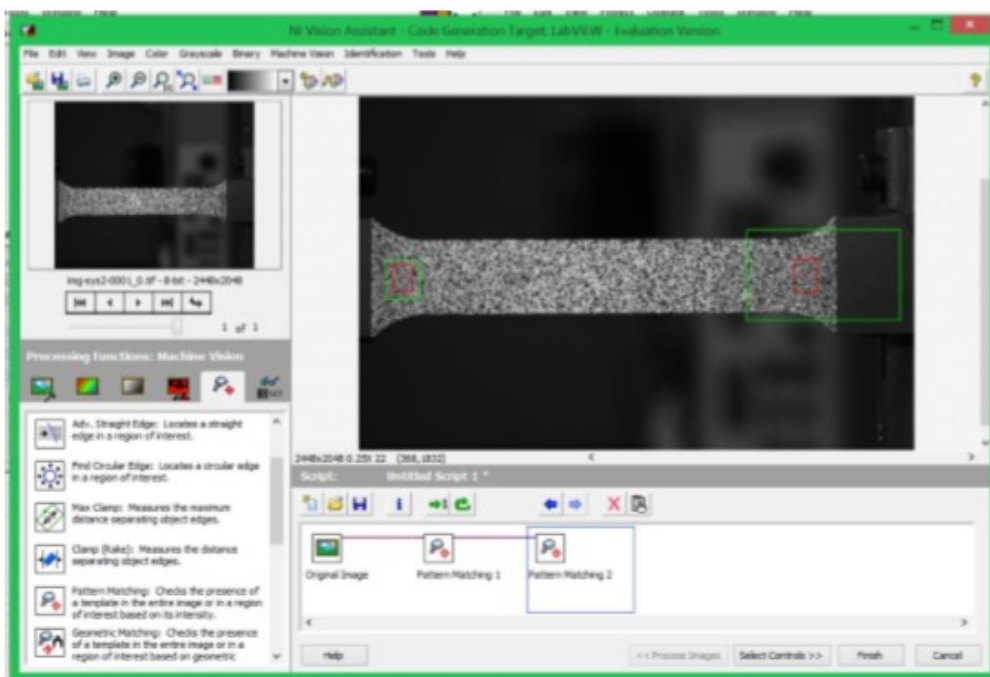


Fig.3.24 Posizionamento dei punti acquisiti all'interno dei rispettivi campi di ricerca.

3.7 CRITICITÀ DEI SISTEMI DI ACQUISIZIONE DI BASE.

Volendo analizzare più nel dettaglio le caratteristiche dei sistemi di acquisizione di partenza, tenendo conto del tipo di acquisizione cui sono chiamati ad effettuare, non è difficile individuare quasi immediatamente una serie di criticità. Le quali rendono i sistemi inadatti a svolgere l'acquisizione richiesta, ma comunque risultano essere una buona base che, opportunamente modificata porterà alla buona riuscita delle prove.

I principali punti deboli sono:

- Difficoltà nell'individuazione della cricca sulle superfici del provino.
- Difficoltà nell'acquisire un numero elevato di dati.
- Necessità di interrompere la prova dopo la rottura.

La prima difficoltà risiede nelle caratteristiche intrinseche al fenomeno fisico che si vuole monitorare; difatti il punto di innesco della cricca non è determinabile a priori e l'uso di una sola telecamera probabilmente non riuscirà a monitorare l'avanzamento della cricca all'interno del provino. È necessario quindi, adottare telecamere aggiuntive che ci permettano di aumentare le probabilità di riuscita della prova, tenendo conto che: una sola telecamera è in grado di monitorare una sola delle quattro superfici del provino ed ogni singolo test ha una durata variabile tra le **6** e le **24** ore.

Aumentando il numero di telecamere che effettuano le acquisizioni, andranno ad aumentare più che linearmente anche il numero di dati acquisiti, rendendo necessaria una capacità di immagazzinamento del dispositivo in uso molto elevata.

Infatti, un'intera prova è in grado di produrre una quantità di immagini ad alta risoluzione nell'ordine delle decine di migliaia di immagine per singola telecamera; è impensabile riuscire a gestire tutti questi dati, per lo più inutili dato che l'obiettivo è quello di monitorare l'avanzamento della sola cricca e non l'intera prova di fatica. Per ovviare a questo problema il programma è dotato di un'apposita funzione all'interno di Labview in grado di conservare in memoria un numero preimpostato di immagini, relativo alle ultime generate dal sistema.

L'ultimo ostacolo alla buona riuscita dei test risiede nel terzo punto dell'elenco, poiché nelle condizioni attuali non riusciremmo ad ottenere nessuna informazione dalle immagini ottenute, in quanto rappresenterebbero il semplice provino rotto. Infatti, in

mancanza di una funzione in grado di bloccare il processo di acquisizione post rottura non si riusciremmo ad ottenere immagini utili.

Di seguito verranno analizzate in dettaglio tutte le funzioni.

3.8 IL SISTEMA DI ACQUISIZIONE DEFINITIVO.

Il sistema di acquisizione definitivo, denominato “distanza due punti 3B” è stato ottenuto modificando opportunamente il sistema di base preesistente chiamato “distanza due punti”. Il sistema ottenuto è il risultato di svariate modifiche atte a migliorare il programma, con l’obiettivo di renderlo il più possibile efficace per il lavoro di monitoraggio della propagazione della cricca. Come suggerito nella denominazione, il programma sfrutta tre telecamere (3) e rappresenta il secondo aggiornamento (B) del sistema di base “distanza due punti”.

3.8.1 IL PANNELLO FRONTALE.

Il pannello frontale di uno strumento virtuale si è visto nel secondo capitolo che rappresenta l’interfaccia dello strumento di misura. Gli elementi principali che lo compongono sono i controllori e gli indicatori, utili ad impostare gli ingressi e a visualizzare le uscite del VI. In questo paragrafo si vedranno quali sono gli ingressi e le uscite che caratterizzano il pannello frontale nel sistema di acquisizione. Si forniranno le indicazioni necessarie all’utenza, sia per impostare i giusti parametri in ingresso nei controllori, sia per visualizzare correttamente i dati in uscita negli indicatori. Per la comprensione dei processi si farà riferimento al Block Diagram, che comunque verrà descritto in dettaglio nel paragrafo seguente. Nella figura 3.25 è riportato il pannello frontale del VI realizzato; molti degli elementi presenti sono comuni ai sistemi di base. Si inizia la descrizione del Front Panel partendo dalla definizione di cinque importanti controllori di tipo booleano, denominati:

- Grab [F1]
- Grab Continuous [F2]
- Click
- Save
- Stop

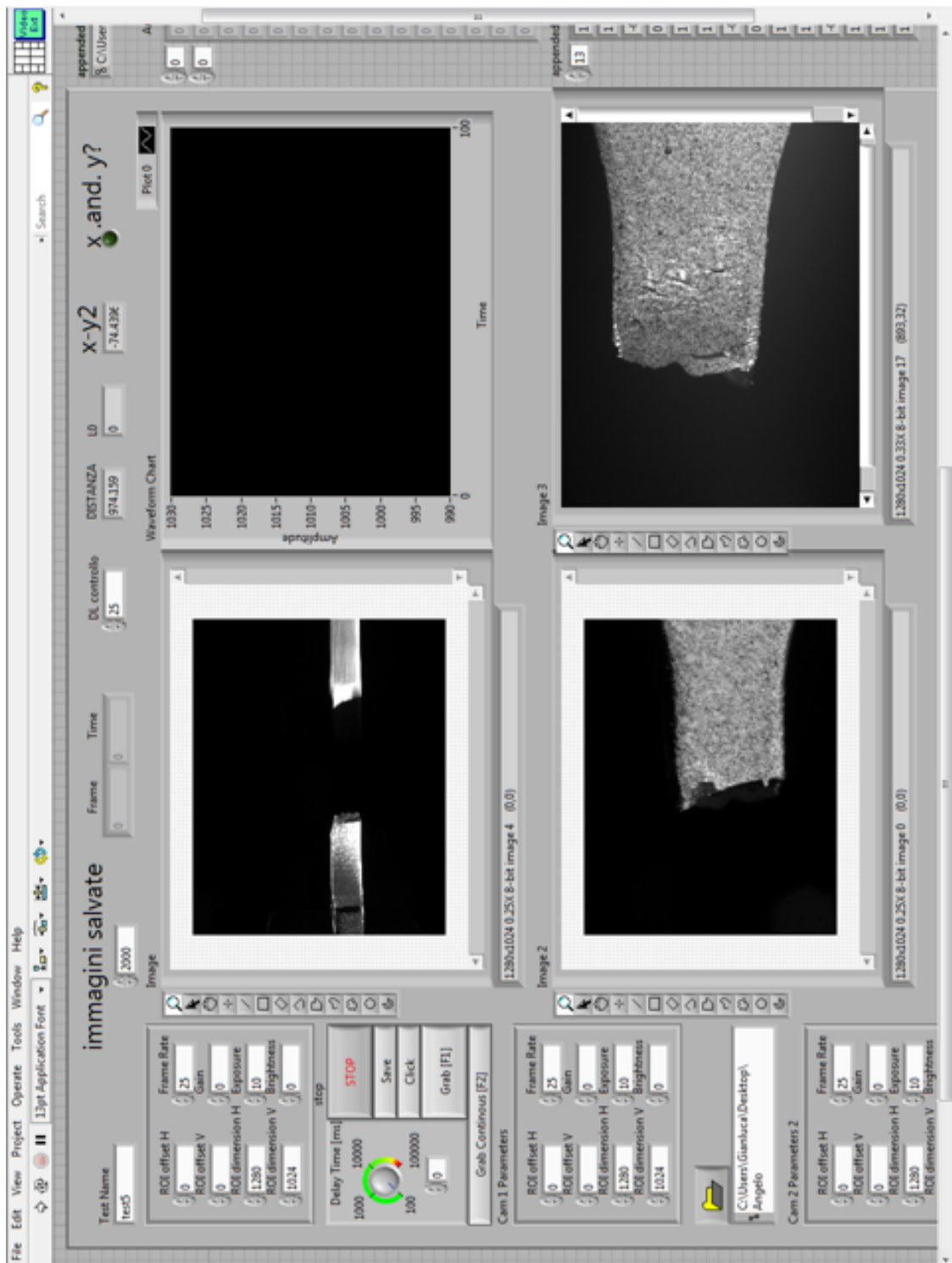


Fig. 3.25 Front Panel del sistema di acquisizione.

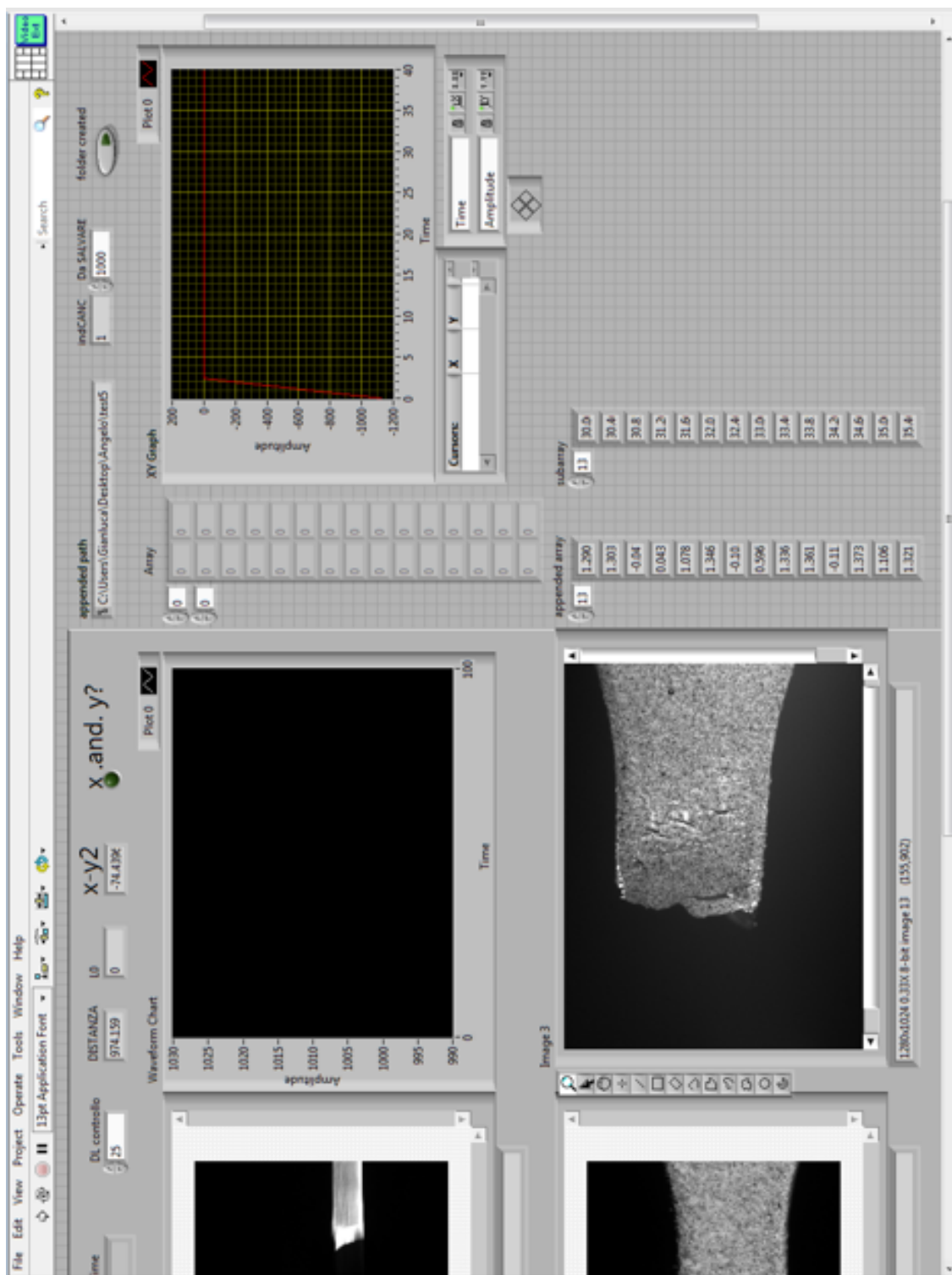


Fig. 3.26 Front Panel del sistema di acquisizione.

Premettendo che il loro funzionamento è subordinato alla messa in esecuzione del programma mediante il pulsante “Run” (Fig. 3.27), presente nella “Front Panel Toolbar” (Fig. 3.28), si può notare che il primo, “Grab”, permette all’utente di acquisire un frame ad ogni click del pulsante, mentre il secondo, “Grab Continuous”, permette di acquisire frame, o immagini, in maniera continuativa nel tempo, secondo una cadenza temporale di acquisizione che può essere impostata mediante il “Delay time”, che, attraverso la manopola, permette di decidere il valore, espresso in millisecondi, corrispondente al periodo compreso tra un frame e il successivo; si noti che è possibile impostare anche un valore preciso mediante il controllore numerico ad esso associato posizionato sotto la manopola.



Fig. 3.27 Run Button. Manda il VI in esecuzione.



Fig. 3.28 Front Panel Toolbar.

La possibilità di realizzare questa sospensione dell’esecuzione del programma è dovuta all’utilizzo di una funzione disponibile nel menu pop-up delle funzioni “Timing” (Fig. 3.29) della libreria “Function Palette” del Block Diagram, chiamata “Wait (ms)” (Fig. 3.30). Questa funzione permette di sospendere l’esecuzione dell’acquisizione per una durata pari al valore numerico specificato all’ingresso, in ms. Restituisce il valore dell’orologio di sistema espresso in ms.

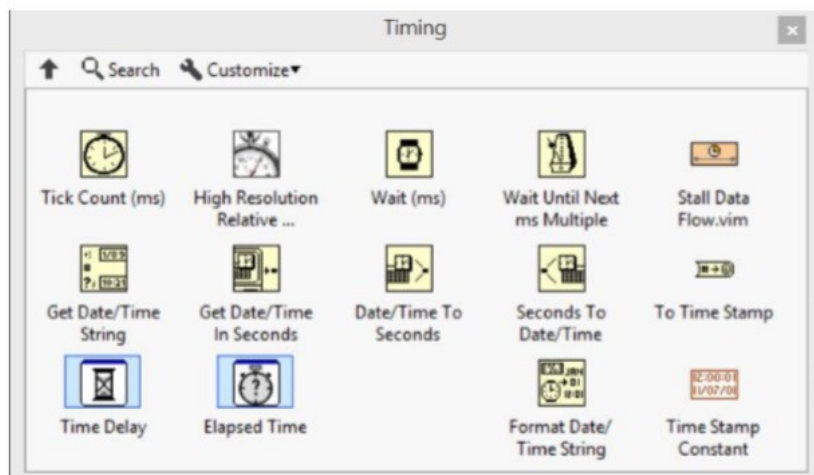


Fig. 3.29 Menù pop-up delle funzioni timing della function palette nel Block Diagram.



Fig. 3.30 Wait (ms) Function.

L'ingresso della funzione è collegato al controllore "Delay Time", così da permettere all'utente di specificare il valore temporale di sospensione dell'esecuzione del programma in ms. Nel sistema di acquisizione realizzato questa funzione è inserita all'interno di un "Case Structure", collegato mediante il selettore al "Grab Continous"; lo schema è rappresentato in maniera semplificata in figura 3.31; ciò implica che solo quando avviene l'acquisizione in maniera continuativa, ovvero quando è selezionato il "Grab Continous", si attiva il funzionamento del "Wait (ms)", secondo le modalità impostate dall'utente attraverso il controllore "Delay Time".

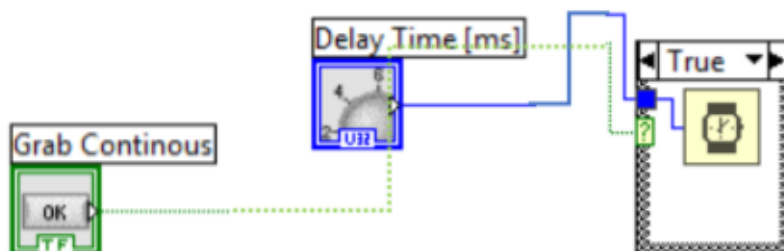


Fig. 3.31 Rappresentazione semplificata del sistema di sospensione dell'esecuzione del programma nel Block Diagram. In blu l'icona relativa al controllore numerico "Delay Time", in verde l'icona relativa al controllore booleano "Grab Continous".

Altro elemento interessante è il pulsante "Stop"; la sua funzione è quella di stoppare l'esecuzione delle porzioni di codice contenute nel ciclo While del Block Diagram, all'interno del quale sono compresi i processi di salvataggio e cancellazione delle immagini; la corrispondente icona è riportata in figura 3.32. Attenzione a non confonderlo con il pulsante "Abort Button" (Fig. 3.33) della Front Panel Toolbar, che ha la funzione di arrestare l'esecuzione del ciclo di livello più alto presente nel Block Diagram, nel quale sono comprese anche le funzioni per la messa in esecuzione delle telecamere.

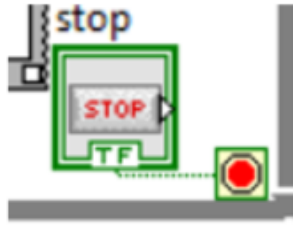


Fig. 3.32 Icona del pulsante “Stop” nel Block Diagram.



Fig. 3.33 Abort Button della “Front Panel Toolbar”.

Nell’elenco sopracitato ha particolare importanza il pulsante “Save”, con la funzione di abilitare/disabilitare l’operazione di salvataggio delle immagini. Infatti, a lato pratico, se si digitano “Grab” o “Grab Continuous”, senza contemporaneamente digitare il pulsante “Save” durante il “Run” del programma, le immagini ritraenti la storia di carico del provino non vengono salvate. Il processo di salvataggio a sua volta può essere eseguito se esistono le condizioni tali da garantire una destinazione ai frame acquisiti. Questo processo può essere attuato mediante l’utilizzo della funzione “Build Path Function” (Fig. 3.34), disponibile nella “Function Palette” del Block Diagram: è una funzione che permette all’operatore di definire in che area poter salvare i frame acquisiti.

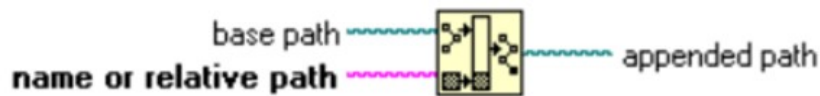


Fig. 3.34 Build Path Function.

Gli elementi che realizzano il processo di salvataggio nel Front Panel sono:

- Il “Saving Directory” che è un controllore nel quale l’utente può specificare il percorso base di salvataggio, tale da definire il luogo/cartella dove i frame devono essere salvati e la cui icona corrispondente è collegata al “base path” della “Build path function” nel Block Diagram;
- Il “Test Name” in cui si specifica il percorso relativo da aggiungere al percorso base; al suo interno viene riportato il nome della cartella all’interno della quale deve essere effettuato il salvataggio. La sua corrispondente icona è collegata al “name or relative path” della “Build path function” nel Block Diagram.

- L'”Appened Path”, che corrisponde al percorso risultante. Quanto detto verrà ripreso in dettaglio nella trattazione del Block Diagram, per ora si riportano in figura 3.35 gli elementi corrispondenti al “Saving Directory”, “Test Name” e “Appened Path”, presenti come indicatori e controllori nel Front Panel.

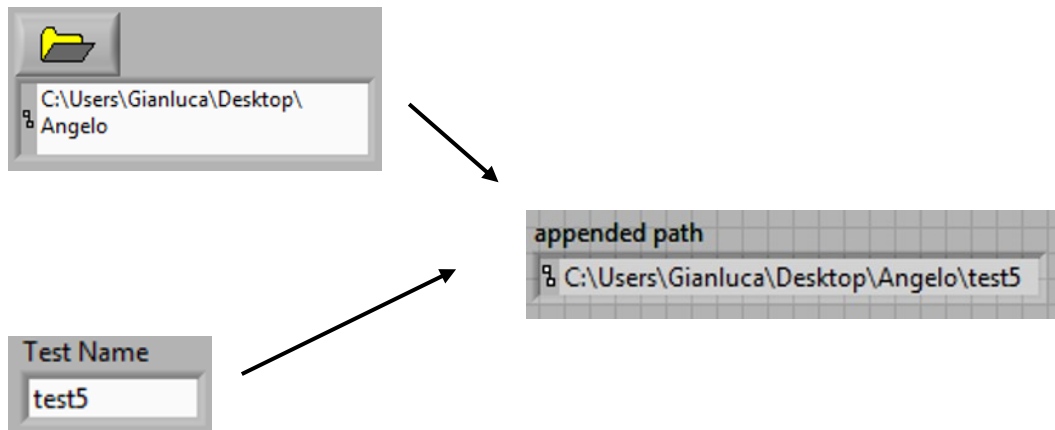


Fig. 3.35 Creazione percorso file per il salvataggio dei frame

Questo processo garantisce all’utente la possibilità di dedicare una cartella ad ogni prova che viene effettuata, permettendo così di raccogliere in cartelle diverse le immagini ritraenti la storia di carico di ciascun provino. Un altro controllore visibile nel Front Panel è il pulsante “Folder Created” (Fig. 3.36), attraverso il quale l’utente può abilitare/disabilitare l’esecuzione della porzione di codice dedicata alla creazione della cartella per il salvataggio dei frame relativi ad ogni singola prova.

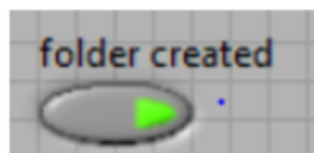


Fig. 3.36 Pulsante “Folder Created”, utile all’abilitazione del percorso di creazione della cartella per il salvataggio dei frame ad ogni singola prova.

Un altro elemento importante è l’indicatore “Frame Time”, riportato in figura 3.37; è un indicatore in cui è riportata ad ogni iterazione la relazione tra il numero dei frame e l’istante in cui ciascuno di essi viene acquisito. Tali valori vengono catalogati nell’indicatore bidimensionale “Array”, all’interno del quale ad ogni iterazione verrà sovrascritto l’elemento di posto “N+1”.

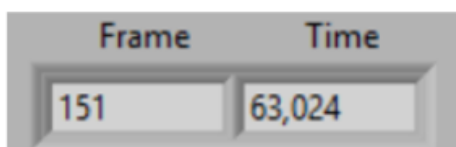


Fig.3.37 Indicatore “Frame Time”.

Si è detto che è possibile dedicare una cartella alle immagini relative a ciascuna prova. Quest’ operazione è facilmente eseguibile da parte dell’utente all’inizio di ciascun test cambiando il nome riportato nel “Test Name”, così da specificare un nuovo percorso di salvataggio. Ogni volta che viene effettuato questo processo, i valori riportati nell’indicatore “Frame Time” si re-inizializzano, garantendo quindi la re-inizializzazione dell’intero sistema all’inizio di ogni test. Tutto ciò è garantito dalla funzione “Initialize Array Function” contenuta nella “Function Palette” del Block Diagram, così come riportato in figura 3.38.

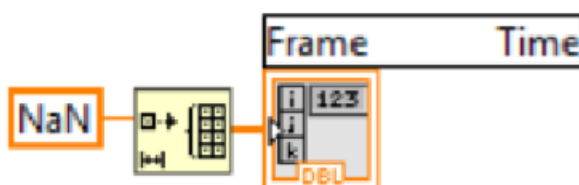


Fig. 3.38 Initialize Array Function.

Tra gli elementi presenti nel Front Panel è possibile notare tre monitor denominati “Image”, “Image2” e “Image3”. Essi riportano ciò che viene acquisito dalle telecamere. In particolare, “Image”, è il monitor che riporta l’immagine frontale del provino e le immagini in esso visualizzate sono quelle da cui il sistema effettua le acquisizioni di misura; “Image2” e “Image3”, invece, riportano le immagini derivanti dalle telecamere di riferimento, utilizzate per controllare l’andamento della prova, pertanto le immagini da essa riportate non vengono rielaborate ai fini dell’acquisizione, salvate per poi poter analizzare la propagazione della cricca a test concluso.

Nel VI “DUE PUNTI 3B” si hanno:

- L'indicatore “DISTANZA”, che riporta il valore della lunghezza istantanea del provino, calcolata come la differenza delle coordinate di due punti orientate lungo l'asse del provino. I due punti vengono posizionati alla base e alla testa del provino mediante la funzione “Pattern Matching”, e vengono mantenuti a fuoco durante tutta l'esecuzione della prova, così da poter monitorare la loro posizione istantanea; il primo mantiene la sua posizione invariata alla base del provino, il secondo, posizionato alla testa, si sposterà lungo l'asse del provino in seguito all'allungamento subito.
- L'indicatore “L0”, riporta il valore della lunghezza iniziale del provino, ovvero il valore riportato all'istante “zero” nell'indicatore “DISTANZA”. Esso rimane salvato durante tutto il corso della prova.
- L'indicatore “X-Y2”, che riporta il valore dell'allungamento istantaneo del provino, calcolato dalla differenza tra la lunghezza istantanea e la lunghezza iniziale.
- L'indicatore “da SALVARE”, riporta la cadenza con la quale il sistema deve salvare le immagini in cancellazione; ovvero durante la cancellazione il sistema “risparmia” una immagine ogni mille cancellate.
- L'indicatore “IMMAGINI SALVATE”, riporta il numero complessivo di immagini presenti all'interno della cartella di salvataggio, ovvero la somma delle immagini ottenute da tutte e tre le telecamere.
- L'indicatore “DL controllo”, riporta la distanza limite di controllo preimpostata dall'operatore, oltre la quale il sistema blocca il processo di acquisizione delle immagini. Questa distanza è intesa in pixel e viene confrontata dal sistema, istante per istante, con il valore “X-Y2” di allungamento istantaneo considerato in valore assoluto.

Per quanto riguarda il controllore “indCANC” e l'indicatore “X and Y”, si riferiscono al processo di cancellazione automatico delle immagini. Il primo è un controllore numerico che indica il numero di frame eliminati dal sistema di acquisizione dopo che il sistema ha rilevato un allungamento istantaneo superiore alla distanza limite di controllo; il secondo è un indicatore booleano che si posiziona nella condizione “Acceso” o “Vero”, se si verificano contemporaneamente due condizioni:

- La prima tale che il numero dei frame acquisiti è maggiore o uguale al valore impostato nell'indicatore "IMMAGINI SALVATE";
- La seconda tale che l'allungamento del provino è inferiore ad un certo valore impostato dall'utente.

Se sono "Vere" queste due condizioni, ovvero se si verificano contemporaneamente; "X and Y" sarà "Acceso". In particolare, se sono vere entrambe si attiva automaticamente il processo di cancellazione delle immagini, che prevede, alla fine della prova, di mantenere salvate solo le ultime "N" immagini del provino. Dove "N" è il valore impostato nel controllore "IMMAGINI SALVATE".

Altri due elementi importanti, che ci si limita solo ad enunciare, sono "Cam 0 parameters", "Cam 1 parameters" e "Cam 2 parameters". Sono tre elementi di tipo "Cluster" dedicati alle telecamere "Cam 0", "Cam 1" e "Cam 2", nei quali sono contenute funzioni e parametri utili al funzionamento delle telecamere associate al sistema.

Proseguendo con la trattazione, ci si sofferma ora su due importanti indicatori di tipo grafico, ovvero il Waveform Chart (Fig. 3.39) e l'XY Graph, entrambe contenute nel menù pop-up Graph della "Control Palette"11 (Fig. 3.40) del Front Panel. Essi sono dei diagrammi utili alla visualizzazione dei dati in uscita dal VI.

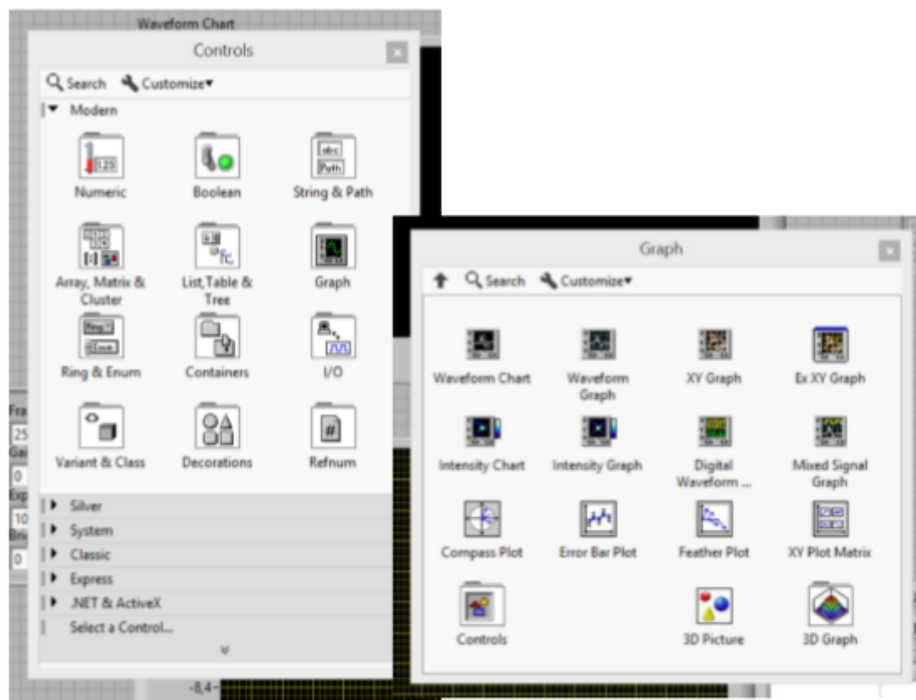


Fig. 3.39 Control Palette, con relativo menu pop-up Graph.

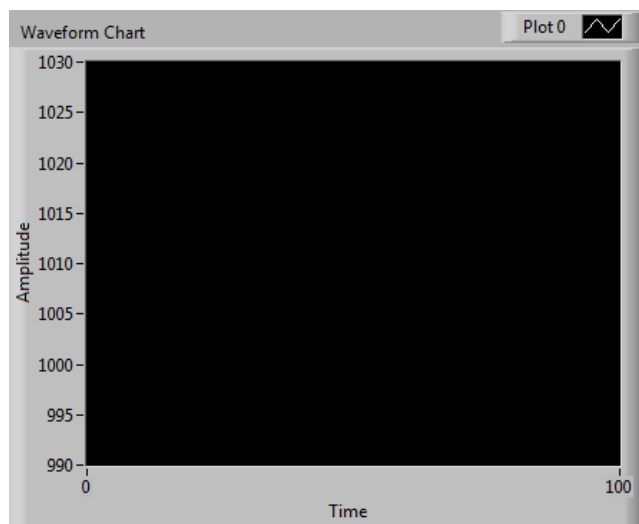


Fig. 3.40 Waveform Chart.

Il Waveform Chart, riportato nel pannello frontale, permette la visualizzazione del valore istantaneo della lunghezza del provino. Questo permette all'operatore di visualizzare anche l'andamento della velocità con cui avviene l'allungamento, che sarà tanto più elevata, quanto più ripida è la curva riportata nel grafico. Dal Block Diagram è possibile notare come l'icona corrispondente al Waveform Chart sia collegata all'uscita dei sub-VI "Distanza 2 punti", i cui valori in uscita, inviati in ingresso nel Waveform Chart, sono riportati negli indicatori numerici "DISTANZA" e "TIME", così come riportato in figura 3.41.

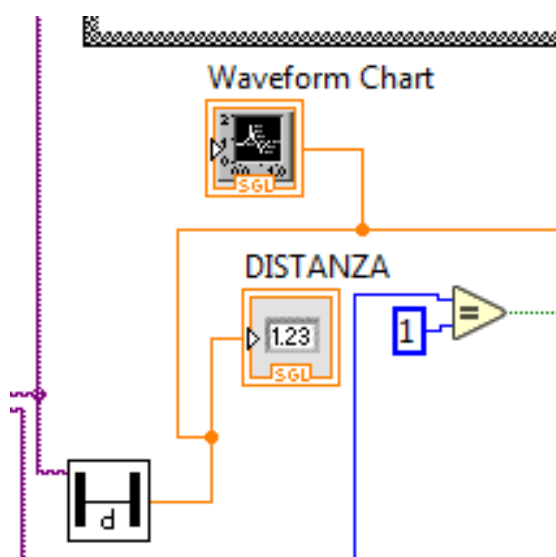


Fig.3.41 Collegamento dell'icona relativa al Waveform Chart all'uscita del sub-VI "Distanza 2 punti" nel Block Diagram.

Per quanto riguarda l'XY Graph (Fig. 3.42), è un grafico realizzato collegando al suo ingresso degli elementi di tipo array; la sua funzione è quella di riportare il valore dell'allungamento del provino nel tempo.

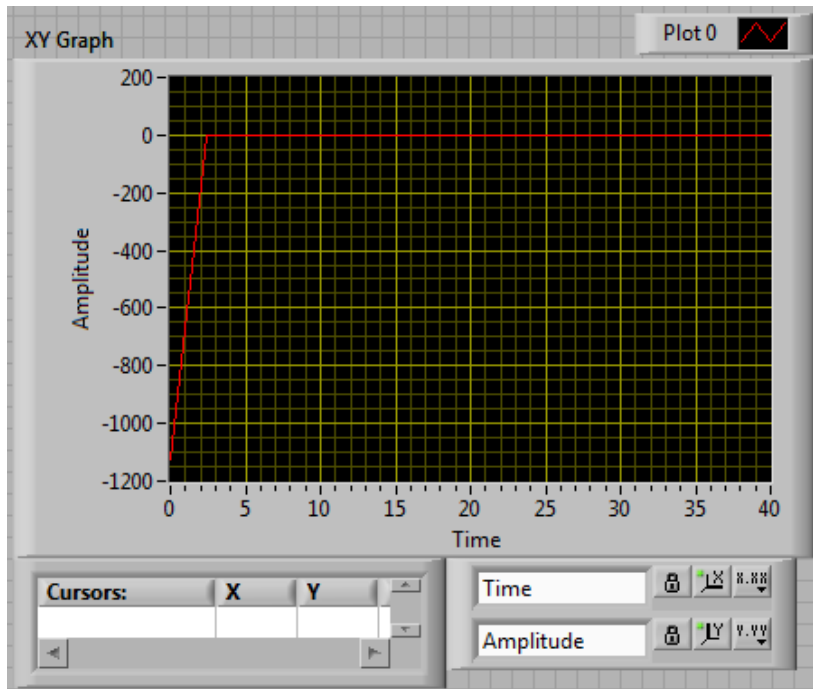


Fig. 3.42 Waveform Graph.

Il codice per l'invio dei dati nel diagramma è visualizzabile nel Block Diagram dei due sistemi di acquisizione, così come riportato in figura 3.43.

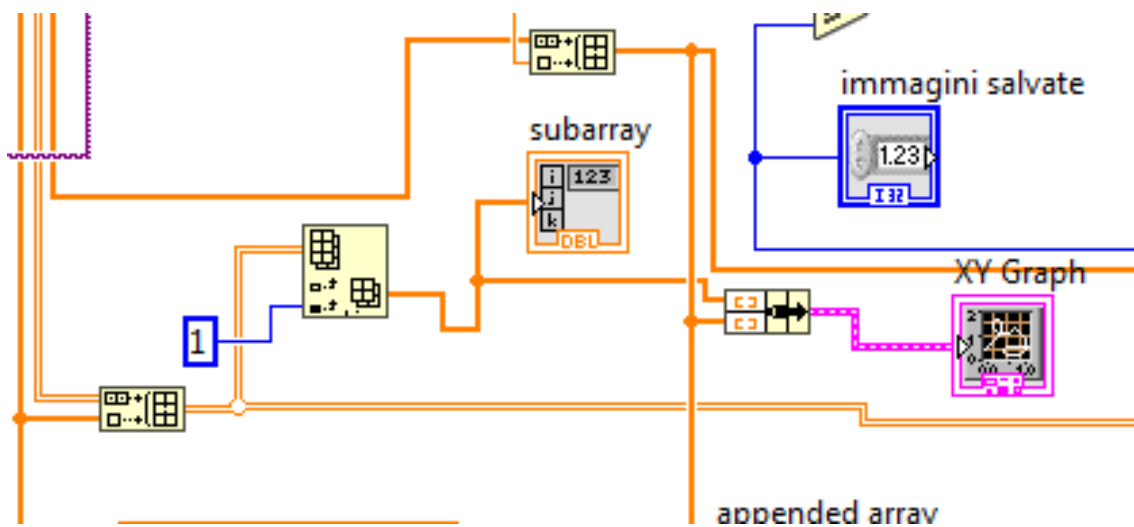


Fig. 3.43 Icona XY Graph.

Analizzando la figura 3.43, è possibile notare che gli elementi che giungono all'”XY Graph” sono:

- I valori riportati nell'indicatore “subarray”, inviati nell'asse delle ascisse.
- I valori riportati nell'indicatore “appened array”, inviati nell'asse delle ordinate.

Per quanto riguarda l'indicatore “Array”, riportato in figura 3.44, è una matrice a due dimensioni all'interno della quale vengono catalogati i valori riportati nell'indicatore “Frame Time” ad ogni iterazione. In particolare, nella prima colonna si registra il numero dei frame acquisiti (N Frame), mentre nella seconda, i corrispondenti istanti di acquisizione (Time).

0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0

Fig. 3.44 Indicatore “Array” nel Front Panel.

Si crea così un grafico ritraente il valore dell'allungamento in funzione dell'istante di acquisizione di ciascun frame; pertanto l'XY Graph non esegue altro che la visualizzazione di dati di un nuovo array bidimensionale, le cui componenti sono date dal valore “Time” riportato in ascissa, e il valore “X-Y2”, ovvero l'allungamento, in ordinata, concatenate nello stesso array attraverso la “Bundle function”. Per quanto riguarda la costruzione dell'XY Graph viene effettuata intervenendo nelle proprietà del grafico, così da impostare i parametri di scala corretti, utili alla visualizzazione dei dati.

3.8.2 DIAGRAMMA A BLOCCHI.

Lo schema a blocchi rappresenta il vero e proprio corpo diagramma, poiché contiene il codice sorgente grafico grazie al quale il VI può essere eseguito; in questo paragrafo verranno mostrati gli elementi del diagramma a blocchi del sistema di acquisizione, valutando le modalità con cui viene attuato il trasferimento dati. Al suo interno compaiono gli oggetti del pannello frontale come terminali sotto forma di icone, si ritrovano icone di sub-VI, e numerose funzioni utili a definire i principi di collegamento tra i vari oggetti. Il collegamento viene effettuato attraverso i fili, in inglese chiamati “wire”, attraverso i quali fluiscono i dati. In funzione della tipologia di dati che fluisce all’interno dei fili essi assumono differenti colorazioni:

- “Blu” e “Arancione”, se trasportano dati di tipo numerico; in particolare in quelli blu, numeri interi, e in quelli arancioni, numeri decimali;
- “Verde”, se trasportano dati di tipo booleano (valori binari, 0÷1; Vero o Falso); - “Rosa”, dati di tipo stringa, quindi lettere o frasi;
- “Marrone”, dati di vario genere, infatti spesso si trovano collegati ai Cluster.

Da notare che molto spesso i fili presentano differenti spessori; ciò sta ad indicare che quelli più spessi trasportano una quantità maggiore di dati.

Si parte ora con la descrizione delle principali porzioni di codice contenute nel Block Diagram, la cui esecuzione come si è visto nel secondo capitolo è gestita dalle strutture, ognuna delle quali con opportune funzionalità. La struttura più esterna, che racchiude tutti i processi inerenti alla messa in esecuzione delle telecamere e i processi di acquisizione, salvataggio e cancellazione delle immagini è un “Sequence Structure”, che come si è detto, esegue le porzioni di codice in sequenza, da quelle contenute nel sotto-diagramma di sinistra a quelle contenute nel sotto-diagramma di destra. I primi elementi che entrano in esecuzione una volta lanciato il programma sono le telecamere, che, attraverso le funzioni contenute nella libreria “Vision utilities” permettono l’ottenimento delle immagini visualizzabili dall’utente negli schermi “Image” e “Image1” e “Image2” del Front Panel. I processi per l’acquisizione e il salvataggio sono attivabili da parte dell’utente mediante l’utilizzo dei pulsanti “Grab”, “Grab Continuous” e “Save”. Le porzioni di codice contenute nel Block Diagram che permettono l’esecuzione di queste operazioni sono contenute all’interno di un ciclo “While Loop”, che permette di metterle in esecuzione ogni volta che viene acquisita una nuova immagine dalle telecamere. I processi di acquisizione possono essere eseguiti se vengono selezionati o il pulsante

“Grab” o il pulsante “Grab Continous”. Tale condizione è garantita da una funzione chiamata “OR” alla quale sono collegati i terminali dei due pulsanti.

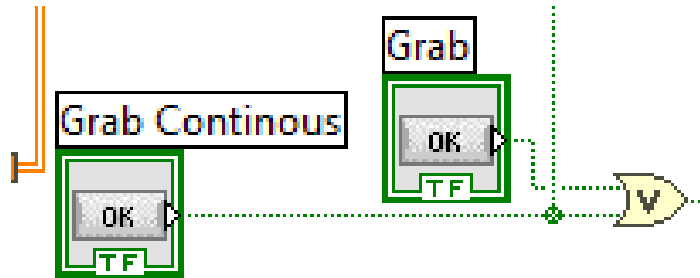


Fig. 3.45 Funzione “OR” associata all’esecuzione dei pulsanti “Grab” e “Grab Continous”.

Entrambe i controllori permettono di abilitare l’esecuzione delle stesse porzioni di codice, semplicemente con differenti modalità:

- Il primo abilita il processo di acquisizione solo nel momento della sua selezione.
- Il secondo abilita il processo di acquisizione in maniera continuativa, pertanto per arrestare il processo di acquisizione dei frame occorre stoppare il programma mediante l’utilizzo dello “STOP”.

L’unica funzione che viene messa in esecuzione solo dal “Grab Continous” è il “Wait(ms)”, di cui si è discusso nel paragrafo precedente, tale funzione non può entrare in esecuzione se il programma non acquisisce in maniera continuativa. Ciò posto, il primo processo che entra in esecuzione alla selezione di uno di questi due pulsanti è quello riportato in figura 3.46.

Dalla figura 3.46 si evince che abilitando l’acquisizione con uno dei due pulsanti, si abilita anche la porzione di codice per l’inserimento dei valori all’interno dell’array “Frame Time”, riportata in figura 3.47.

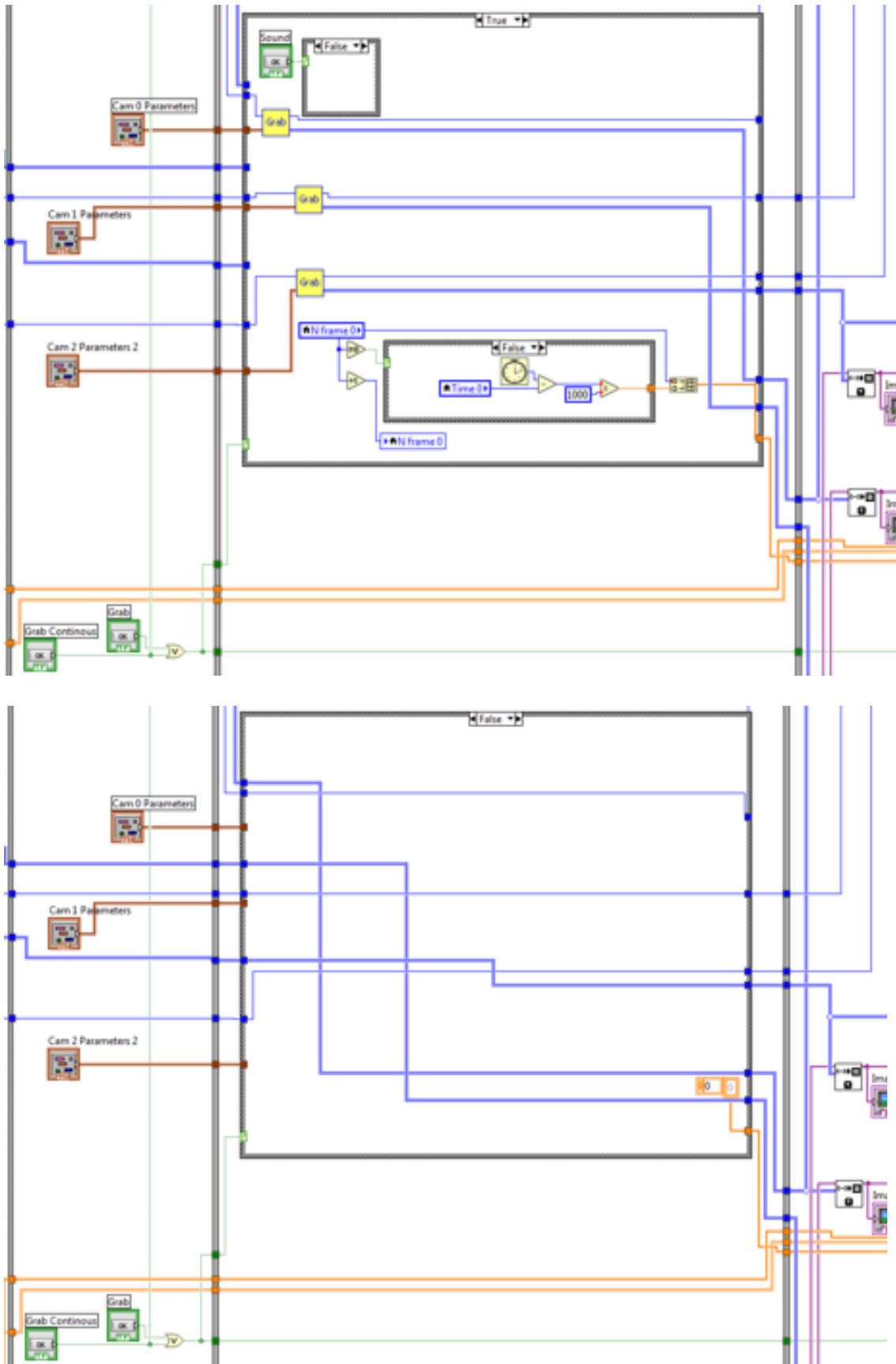


Fig. 3.46 "Case Structure" contenente le porzioni di codice per la creazione dell'array "Frame Time". Nel primo caso quando è vera la condizione a cui il selettore è collegato, nel secondo caso in cui è falsa.

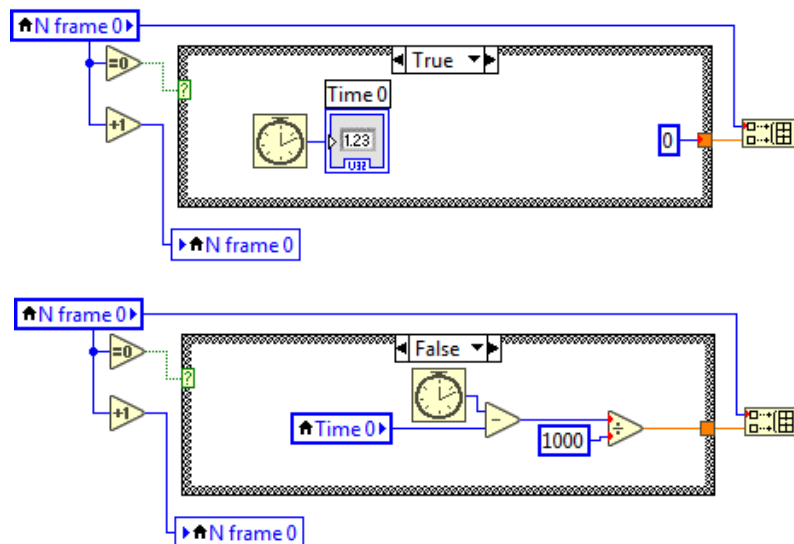


Fig. 3.47 “Case Structure” contenente le porzioni di codice per la creazione dell’array “Frame Time”.

Premettendo che la creazione dell’array “Frame Time” è stata ottenuta mediante l’utilizzo della funzione “Build Array Function”, che ha permesso di concatenare nello stesso indicatore array il numero dei frame e l’istante in cui ciascuno di essi viene acquisito, si evince dalla figura 3.47 che:

- Quando il numero dei frame è uguale a “zero”, l’orologio di sistema è a “zero”;
- Se la condizione sopracitata non è vera, ovvero se il numero dei frame è diverso da zero, all’ennesimo frame corrisponderà un istante di acquisizione diverso da “zero”, riportato all’interno dell’array “Frame Time” in secondi.

Se alla selezione di uno dei due controllori booleani “Grab” o “Grab Continous”, corrisponde la selezione del pulsante “Save”, si abilitano una serie di processi, anche essi eseguiti ad ogni iterazione del ciclo “While Loop”, tali da garantire il salvataggio e la cancellazione dei frame sotto determinate condizioni. La porzione di codice contenuta nel Block Diagram, tale da garantire il salvataggio delle immagini è riportata in figura 3.48. Il codice contenuto all’interno del “Case Structure” di figura 3.27 permette la realizzazione del percorso di salvataggio per le immagini acquisite. Ponendo lo sguardo al selettore del “Case Structure”, si può notare che è collegato al controllore booleano “Folder Created”, che se non viene attivato, non permette di eseguire la porzione di codice dedicata alla creazione della cartella di salvataggio;

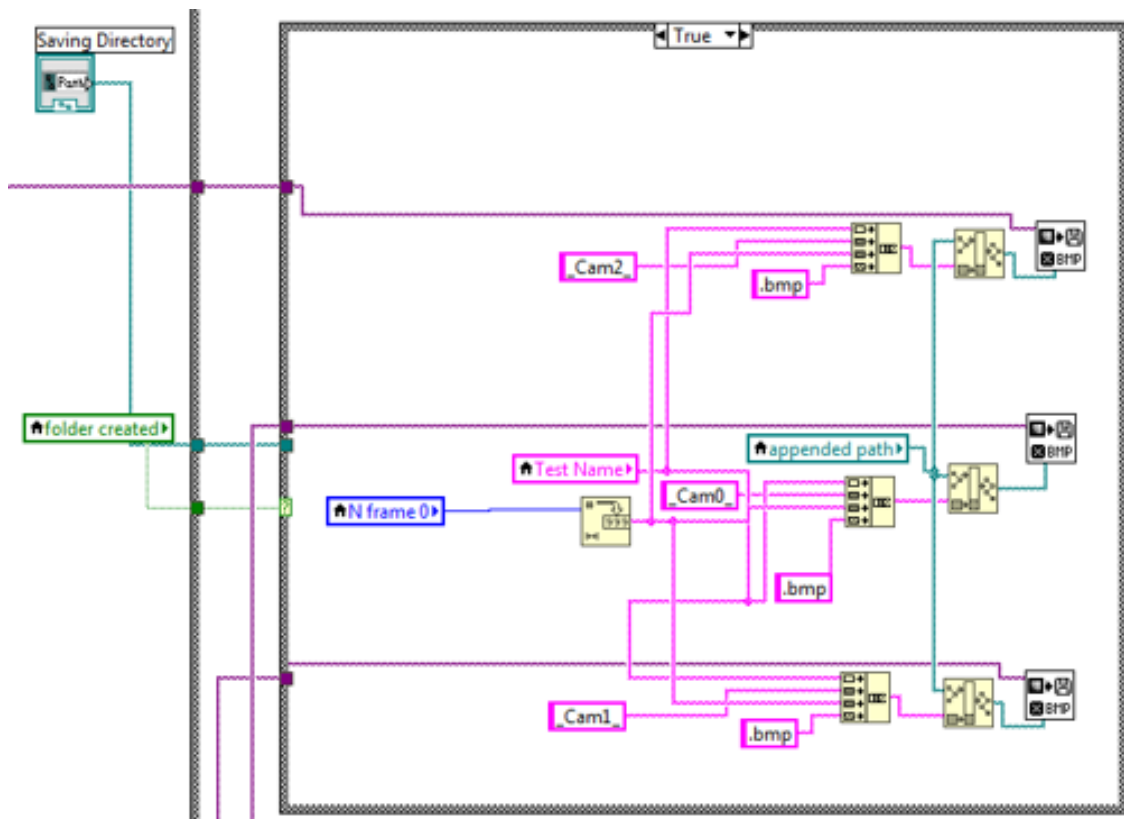
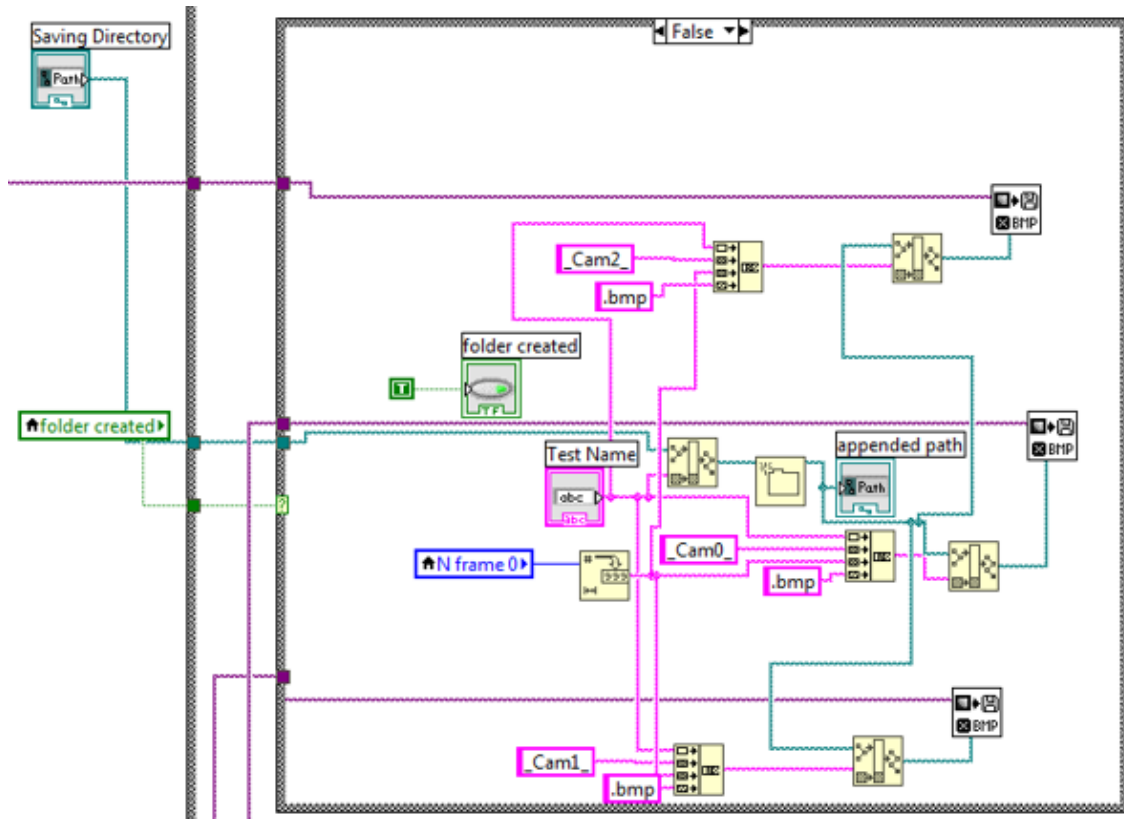
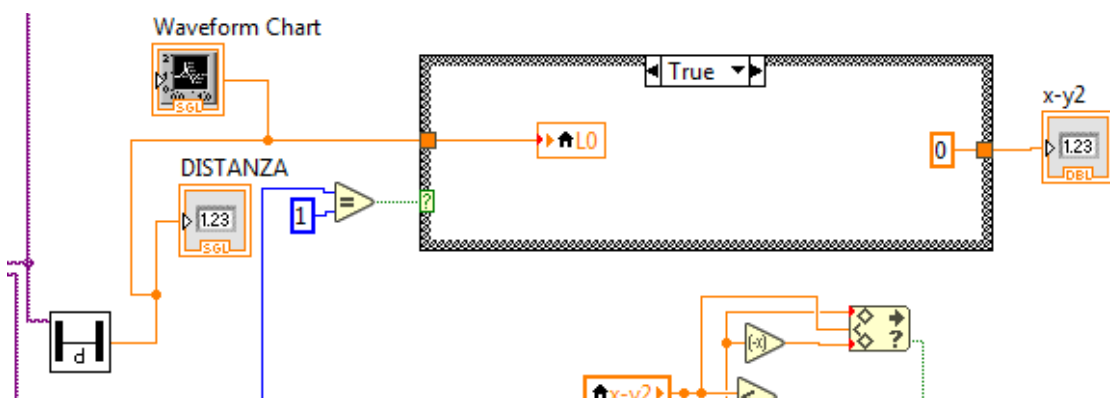


Fig. 3.48 Porzione di codice dedicata al processo di salvataggio dei frame.

Pertanto, in tal caso, non sarebbe possibile per l'operatore dedicare una cartella a ciascun test che viene effettuato. Ciò implica che l'utente debba operare selezionando il pulsante "Folder Created", e nel caso volesse cambiare il percorso di destinazione dei frame è sufficiente che modifichi il testo all'interno del "Test Name", al fine di abilitare un nuovo percorso di salvataggio. Tutto ciò permette di creare una nuova cartella all'interno della quale salvare i frame fino a quando non verrà specificato un nuovo percorso. Ritornando a quanto rappresentato in figura 3.48, è possibile notare la presenza di due condizioni:

- Supponendo attivato il booleano "Folder Created" all'inizio del processo di acquisizione, il "Case Structure" eseguirà la porzione di codice contenuta nel sotto-diagramma "False" soltanto alla prima iterazione del ciclo "While", così da creare automaticamente la cartella su cui salvare l'immagine corrente e i frame successivi;
- Dalla seconda iterazione in poi, fino a che l'operatore non specifica un diverso percorso di salvataggio, il sistema proseguirà a salvare le immagini nella cartella creata alla prima iterazione; con ciò non è più necessario creare la cartella di salvataggio, ma si salva in una cartella esistente. Pertanto, se il percorso di salvataggio specificato è relativo ad una cartella esistente, automaticamente il "Case Structure" eseguirà la porzione di codice contenuta nel sotto-diagramma "True".

Tra i processi che vengono eseguiti attivando contemporaneamente il processo di acquisizione e salvataggio, si trova quello riportato nella figura 3.49.



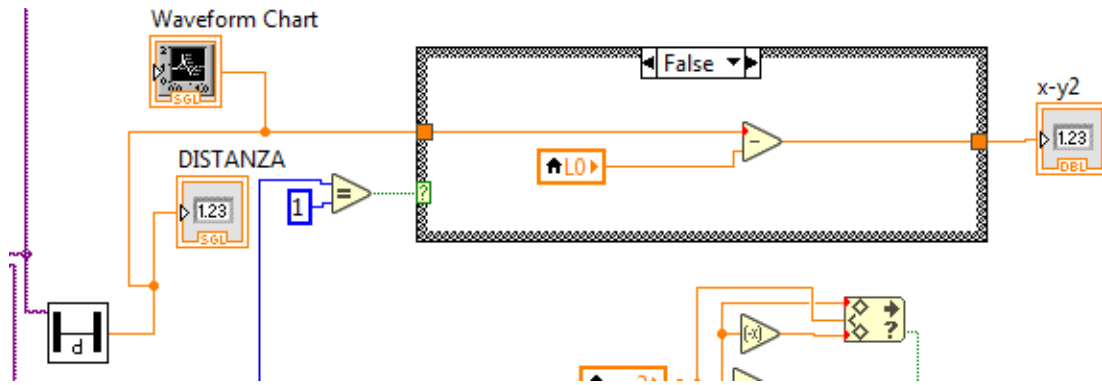


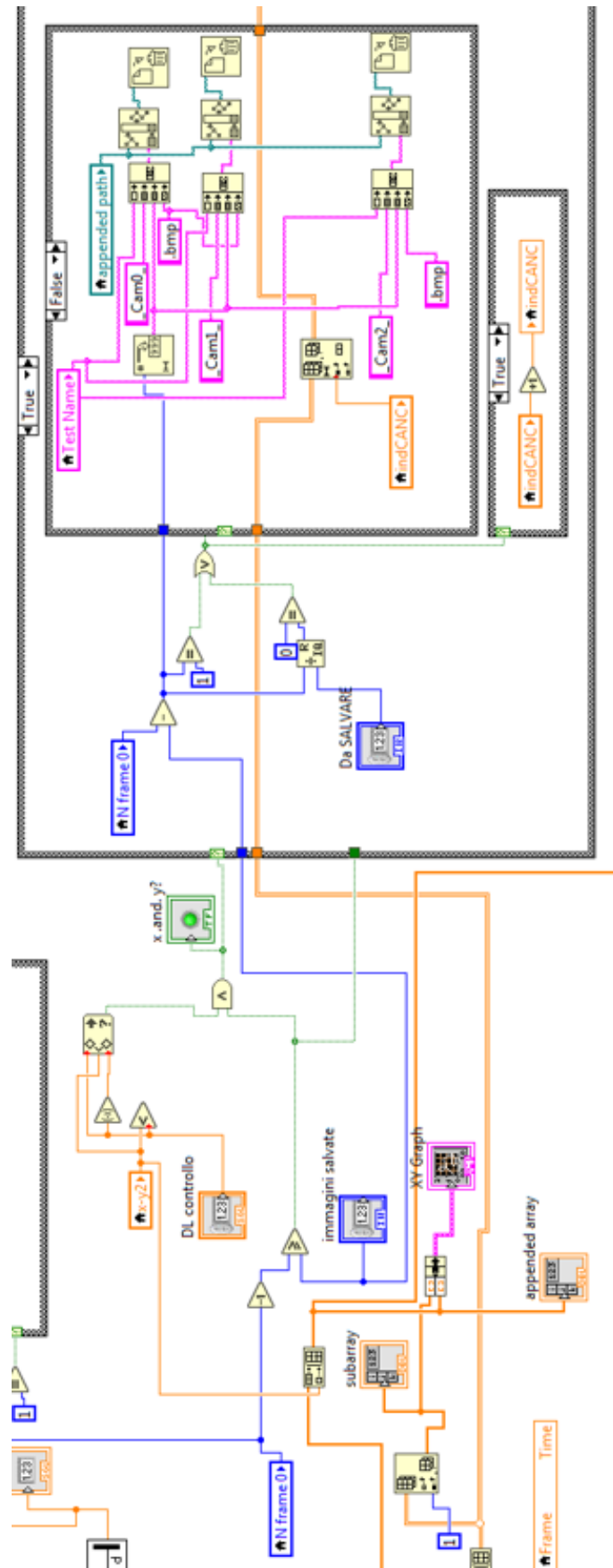
Fig. 3.49 Case Structure per la creazione del valore dell'allungamento nel VI "DUE PUNTI3B".

Nelle figure si riportano i sistemi di calcolo per ottenere l'allungamento del provino.

Attraverso l'utilizzo del "Case Structure", si impongono le seguenti condizioni:

- Se il numero dei frame è uguale a uno allora il "Case Structure" esegue la porzione di codice relativa al sotto-diagramma "True", in cui si impone che la lunghezza del provino è uguale a quella iniziale, pertanto sicuramente il valore dell'allungamento del provino riportato nell'indicatore "X-Y2" sarà nullo;
- Se la condizione sopracitata non è vera, ovvero il frame che si sta eseguendo non è il primo, allora il "Case Structure" eseguirà la porzione di codice contenuta nel sotto-diagramma "False", nel quale anche in questo caso viene calcolato l'allungamento mediante la differenza tra la lunghezza istantanea e la lunghezza iniziale del provino. Anche in questo caso, ciò non implica che il valore riportato nell'indicatore "X-Y2" sia obbligatoriamente diverso da "zero", poiché si può verificare il caso in cui si acquisiscono frame senza registrare allungamento del provino.

Contemporaneamente al processo di salvataggio delle immagini, che viene eseguito ad ogni iterazione del ciclo "While", possono presentarsi le condizioni per l'esecuzione del processo di cancellazione. Tale processo, durante l'acquisizione, permette all'utente di eliminare i frame non necessari in maniera automatica. Le condizioni a cui deve verificarsi tale processo possono essere impostate direttamente dall'utente. Il codice relativo alla cancellazione dei frame è riportato in figura 3.50.



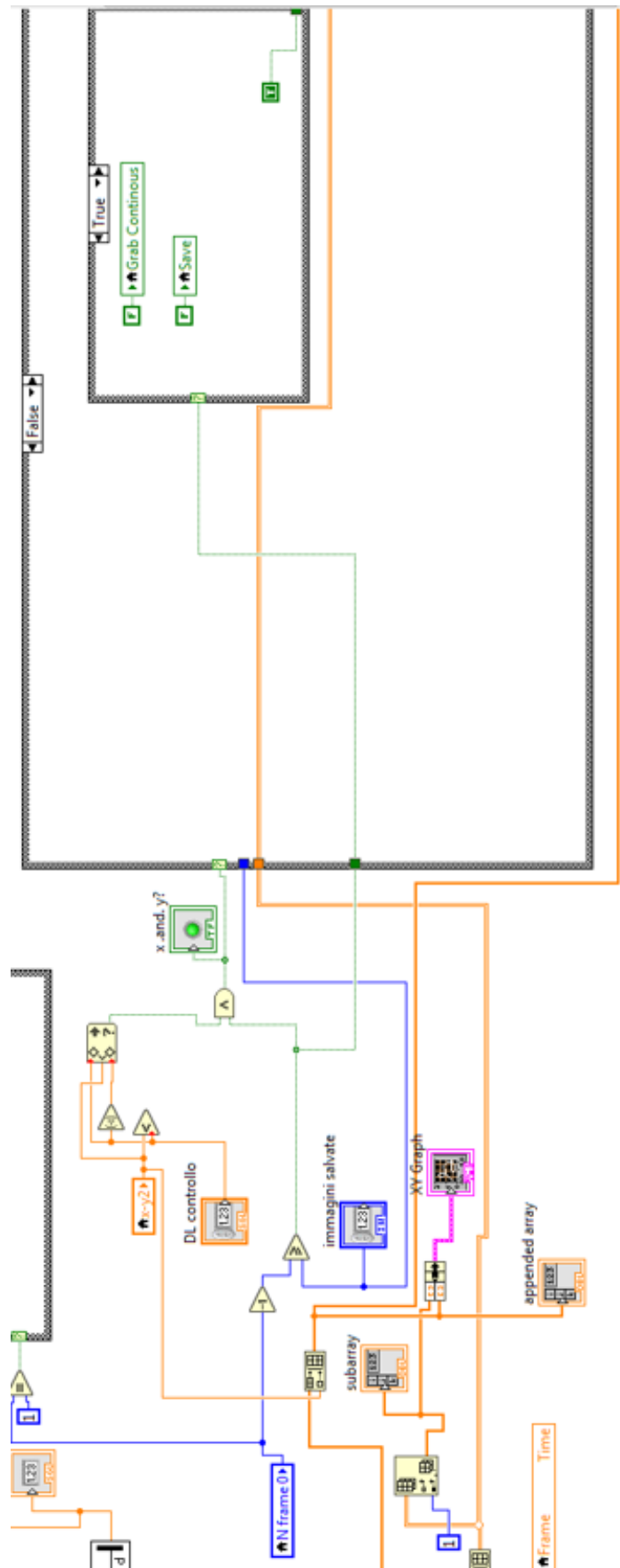


Fig. 3.50 Processo di cancellazione, comune ad entrambe i VI.

Dalla figura 3.50, è possibile notare il codice per la cancellazione dei frame, la cui esecuzione viene effettuata se si verificano contemporaneamente due condizioni:

- La prima tale che l'allungamento del provino sia un valore inferiore ad un certo "Allungamento Limite", il cui valore viene impostato dall'utente;
- La seconda tale che il numero dei frame acquisiti, a partire dal numero "zero", sia maggiore o uguale a un certo valore impostato nel controllore "indice".

Se queste due condizioni non sono vere entrambe, la cancellazione non viene effettuata. Se si verificano le condizioni tali da attivare il processo di cancellazione, ad ogni iterazione si cancelleranno automaticamente non solo le immagini che vengono salvate, ma anche i valori riportati nell'elemento di posto "zero" dell'indicatore "Array". Questa operazione è resa possibile attraverso l'utilizzo della funzione "Delete From Array Function", riportata in figura 3.50. Riassumendo, con questi processi si dà la possibilità all'utente di:

- Salvare le immagini ritraenti la storia di carico di ciascun provino in cartelle dedicate.
- Di mantenere salvate all'interno della cartella di ciascun test le ultime "N" immagini del provino prima della rottura, nel caso si siano verificate le condizioni di cancellazione impostate dall'operatore; "N" in particolare corrisponde al valore impostato nell'"indice".
- Di riportare in un file testo i valori catalogati nell'Array, che riportano i dati derivanti dall'indicatore "Frame Time" relativi alle sole immagini salvate; anche questo file testo si salva all'interno della stessa cartella su cui vengono salvate le immagini acquisite. Il percorso per eseguire questa operazione è riportato in figura 3.51.

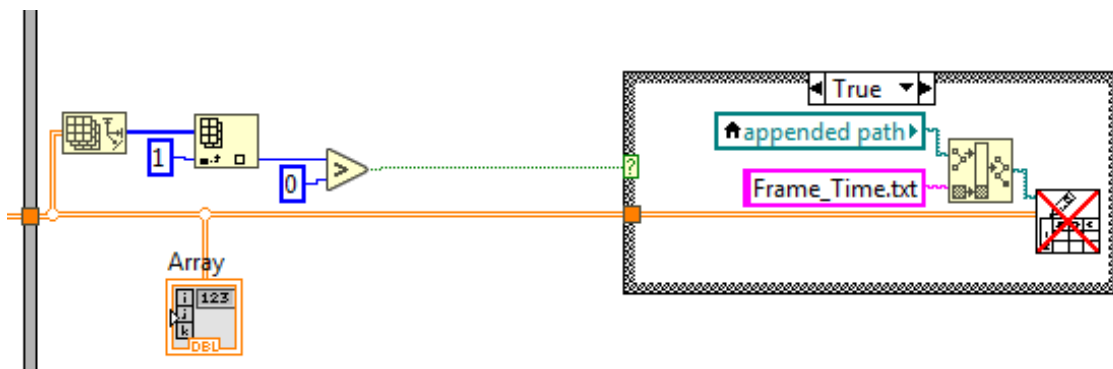


Fig. 3.51 Creazione del file testo contenente i dati riportati nell'indicatore "Array".

4 ESECUZIONE DELLA PROVA E RACCOLTA DATI

4.1 INTRODUZIONE.

Nei capitoli precedenti sono stati esposti nel modo più esaustivo possibile tutti gli aspetti teorici riguardanti l'esperienza svolta all'interno dei laboratori universitari, avendo cura di esporre i principi alla base del fenomeno studiato, del materiale e delle lavorazioni, nonché dello strumento virtuale usato per l'acquisizione. A questo punto, per rendere completo questo lavoro, non rimane che esporre gli aspetti pratici che caratterizzano questa tipologia di test.

Essenzialmente, il capitolo verrà suddiviso in tre parti:

- Preparazione del provino.
- Allestimento della macchina.
- Avviamento della prova.

Le quali corrispondono alle tre macro-operazioni necessarie per eseguire la prova di laboratorio in base a come è stata concepita durante lo sviluppo dei sistemi.⁴

4.2 PREPARAZIONE DEL PROVINO.

Nel paragrafo 2.6 sono state esposte le forme principali di difetti presenti sul provino a seguito della lavorazione di taglio:

- Presenza della bava nel punto di giunzione tra provino e lamiera.
- Mancanza di perpendicolarità sulle superfici laterali del provino.
- Difetti di finitura sul tratto utile del provino.

le prime due tipologie di difetto determinano l'impossibilità di montare il provino all'interno degli afferraggi e per questo, vengono preventivamente sottoposti a lavorazione di molatura, affinché si riesca a recuperare i pochi decimi di millimetro di errore e rendere possibile il montaggio del provino all'interno degli afferraggi.

La terza ed ultima tipologia di difetto risulta trascurabile considerato l'obiettivo che il test si pone, infatti lo scopo delle prove di laboratorio è quello di acquisire immagini riguardanti l'innesco e la propagazione della cricca, non di analizzare i parametri relativi alla resistenza a fatica del materiale in analisi.

Nella fase successiva, il provino viene posto all'interno degli afferraggi e serrando gli otto bulloni presenti si ottiene il bloccaggio per attrito dello stesso; in figura 4.1 è possibile constatare quanto detto precedentemente.



Fig. 4.1 Provino bloccato per attrito all'interno degli afferraggi tramite il serraggio degli otto bulloni.

Nella fase successiva si procede con la preparazione del provino per la successiva verniciatura; la fase di verniciatura è suddivisa in tre step:

- Preparazione del provino e afferraggi, eseguita con nastro adesivo da mascheratura, affinché si riesca a delimitare la zona di verniciatura nell'intorno del tratto utile del provino e contemporaneamente evitare sprechi di vernice e sporco diffuso.
- Verniciatura di fondo, eseguita con vernice bianca spray affinché la successiva verniciatura di colore nero venga messa in risalto. Dal punto di vista del processo di acquisizione, questo permette di ridurre il rischio di perdita del riferimento visivo sul provino, causato da perdite di messa a fuoco della telecamera e/o sfocature.
- Verniciatura "*speckle*", è una particolare tipologia di verniciatura necessaria per l'applicazione della tecnica "*DIC*" acronimo di "Digital Image Correlation", che consiste nel verniciare il tratto utile del provino da una distanza di circa **30/40 cm**, affinché sulle superfici del provino vadano a depositarsi un numero limitato di particelle di vernice di dimensioni ridotte; l'ordine di grandezza delle particelle è di circa un decimo di millimetro. A fine verniciatura si ottiene un provino a fondo bianco caratterizzato da innumerevoli particelle circolari di colore nero depositatesi in superficie. Quanto precedentemente affermato, può essere constatato in figura 4.2.



Fig. 4.2 Tratto utile del provino caratterizzato da verniciatura "speckle".

A questo punto, non rimane altro che attendere **5/10** minuti in modo da ottenere la completa essiccazione della vernice e poi procedere alla rimozione del nastro adesivo dal provino.

4.3 ALLESTIMENTO DELLA MACCHINA.

Una volta conclusa la fase di preparazione del provino non rimane altro che allestire la macchina ed avviare la prova; ma prima di far ciò è necessario effettuare alcune azioni di settaggio delle macchine. Per esattezza, si procede con l'avviare il computer ed i programmi di gestione della macchina "Si-plan", avendo cura di aver precedentemente aperto la valvola di mandata dell'aria proveniente dal compressore, senza la quale non è possibile avviare la macchina servo-pneumatica per le prove di fatica. Successivamente, tramite la finestra "Test control" presente in figura 4.3 la macchina viene impostata in "controllo di spostamento", in questo modo è possibile spostare il pistone pneumatico della macchina manualmente e nella posizione desiderata. Tutto ciò è necessario poiché gli afferraggi nei quali è stato precedentemente installato il provino vengono inseriti nella macchina tramite l'istallazione all'interno di guide rettangolari; quindi, per rendere possibile l'allineamento ed il successivo montaggio, si procede per tentativo fintanto che gli afferraggi non scorrono liberamente all'interno delle guide.

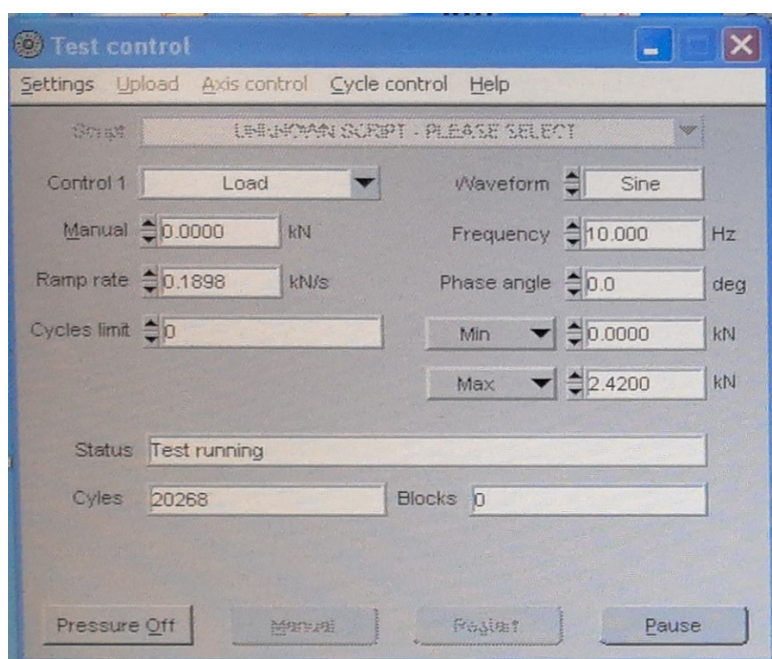


Fig. 4.3 Finestra di "test control" presente sul computer di gestione della macchina "Si-plan".

Successivamente, viene imposto un leggero precarico di trazione, circa **90 N**, così da poter serrare i quattro bulloni M6 presenti sulle guide, utili a garantire l'allineamento di provino e afferraggi durante lo svolgimento della prova, figura 4.4.

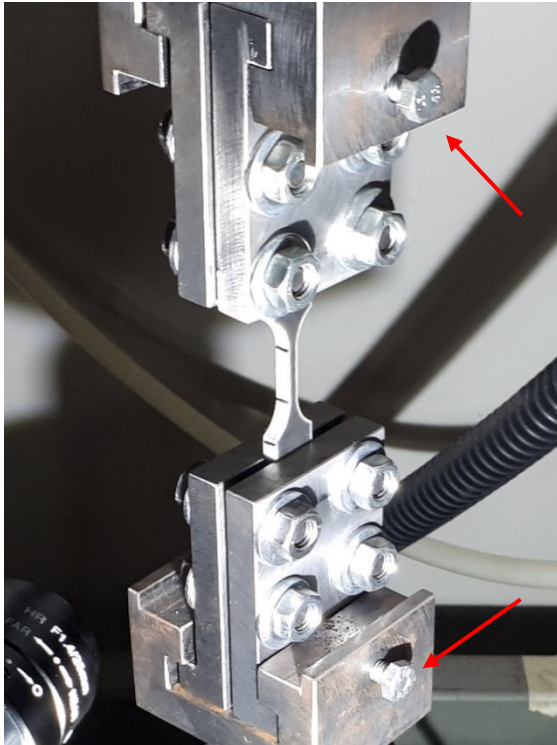


Fig. 4.4 Assieme provino, afferraggi e guide, dove sono presenti anche due dei quattro bulloni di sicurezza.

Terminata la fase di montaggio del provino, si passa al montaggio delle telecamere e del sistema di illuminazione; per far ciò si parte da due cavalletti treppiede per fotocamere, una servirà per posizionare la telecamera posteriore sinistra, mentre sul secondo, attraverso l'utilizzo di un profilato di alluminio, verranno installate le due telecamere anteriori ed il faro di illuminazione, figura 4.5. Il tutto deve essere montato secondo due esigenze: necessità di avere le fotocamere perpendicolari alle superfici del provino e necessità di posizionare i sistemi di illuminazione in modo da garantire una corretta messa a fuoco senza imbattere in riflessi fastidiosi sulle superfici del provino.

A seguire, viene aperto il programma di gestione delle telecamere “Pixelink Capture” ed effettuato in ordine cronologico:

- Messa a fuoco ed ingrandimento del tratto utile da monitorare.
- Regolazione del “Exposure Time”.
- Regolazione del “Frame Rate”.

In figura 4.6 è possibile visualizzare i comandi di gestione delle telecamere.

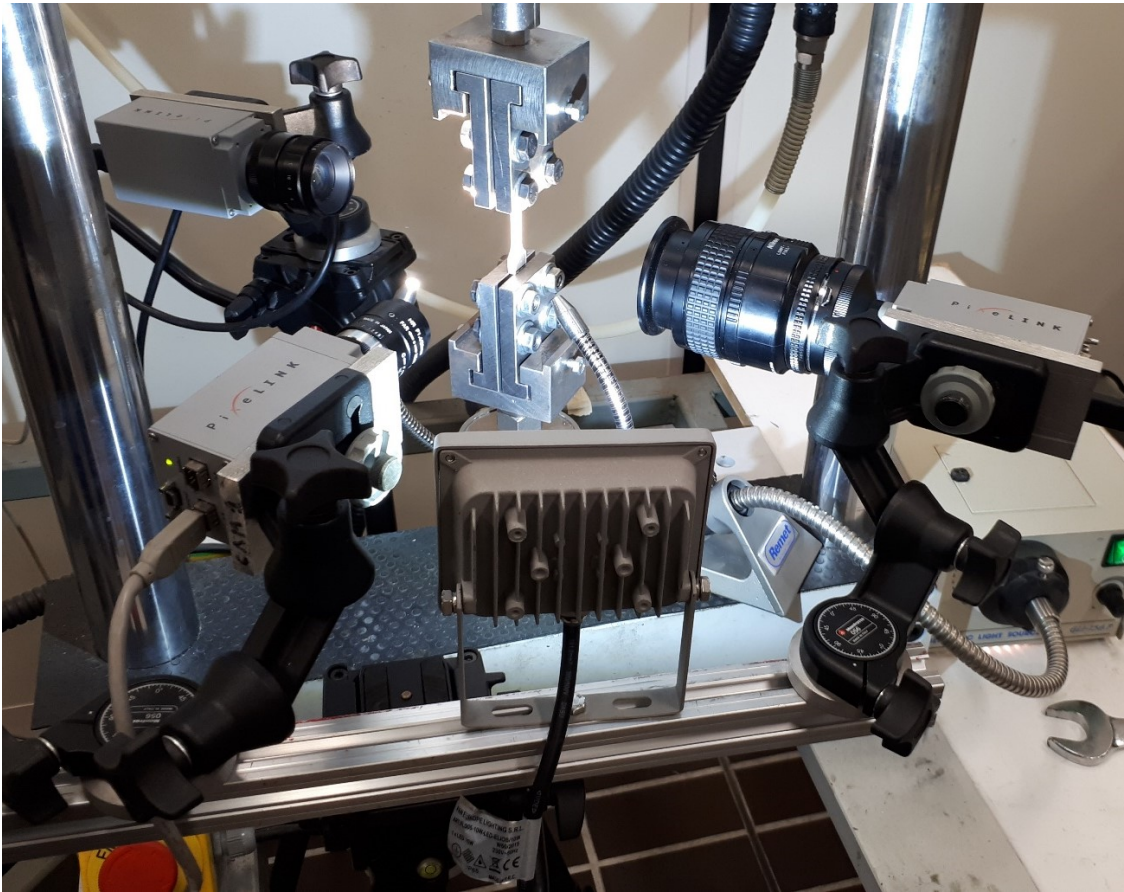


Fig. 4.5 Strumentazione pronta per essere utilizzata nel test.

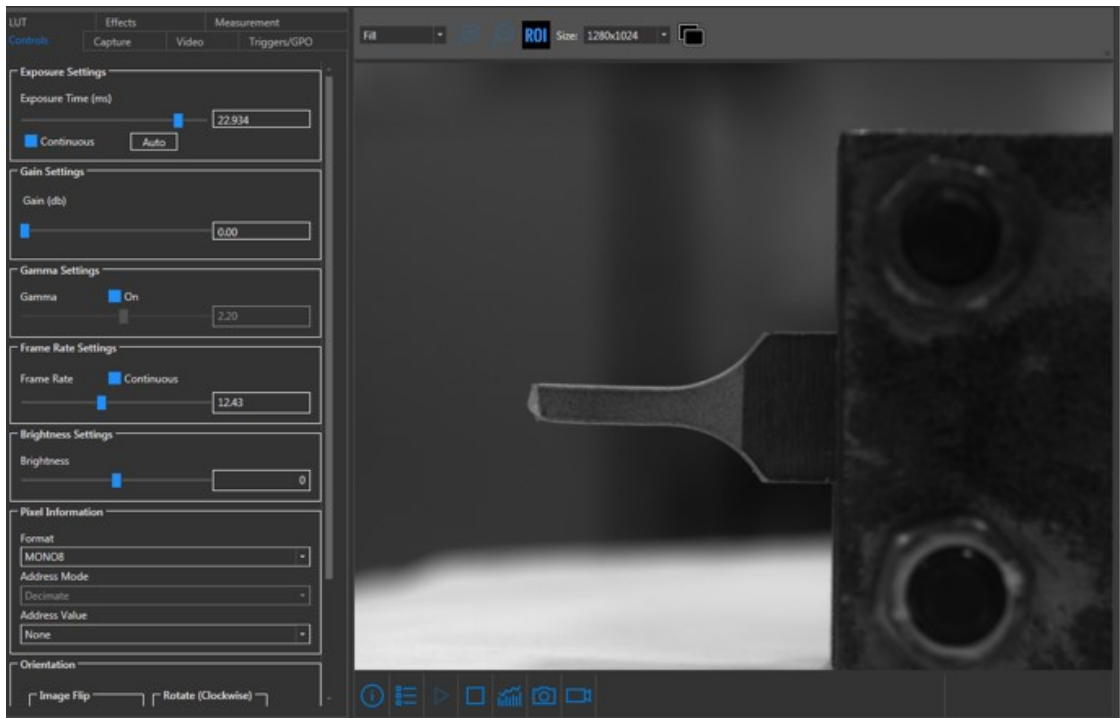


Fig. 4.6 Schermata del programma "Pixelink Capture", contenente l'immagine acquisita dalla telecamera a destra ed i comandi di regolazione a sinistra.

4.4 AVVIAMENTO DELLA PROVA.

Concluso il setting delle telecamere, si torna al setting della macchina per le prove di fatica, in modo tale che vengano effettuate le ultime operazioni necessarie, prima della messa in opera del sistema. Per esattezza, ricorrendo alla finestra “Test Control” vengono effettuati:

- Avviamento della macchina, realizzabile premendo prima il pulsante “pressure on” e successivamente il pulsante “play”.
- Impostazione del carico, espresso in **KN**, realizzabile attraverso l’apposita casella “Max”.
- Impostazione della frequenza di carico, espressa in **Hz**, ottenibile attraverso l’apposita casella “Frequency”.
- Impostazione della forma d’onda, ottenibile dall’apposita casella “Waveform”.

Infine, per realizzare l’arresto automatico della “Si-plan” a rottura avvenuta, si ricorre alla finestra di “Trips setup” all’interno della quale viene impostato il “Trip type” da garantire, il “When to check” ed il “Level”, rispettivamente:

- Load maxima: Lower limit.
- Running test.
- 0.50 KN.

Ciò significa che, se durante lo svolgimento della prova la sollecitazione misurata dalla cella di carico, posta al di sotto del provino, scende sotto un valore limite preimpostato (0.50KN), il sistema di controllo provvede automaticamente ad arrestare lo svolgimento della prova, figura 4.7.

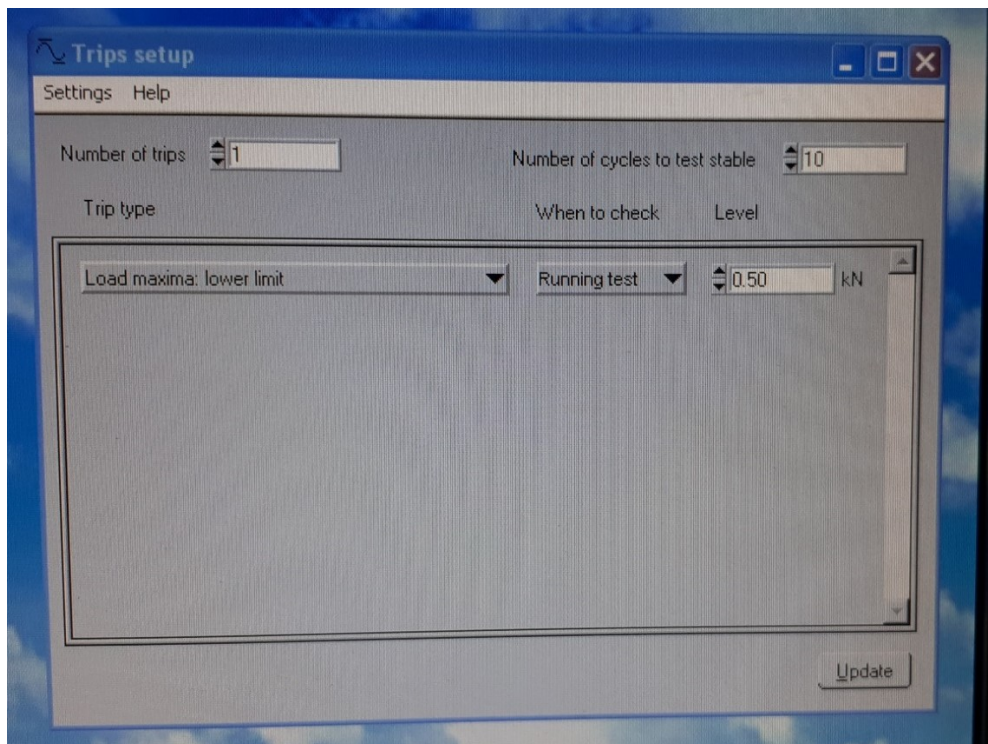
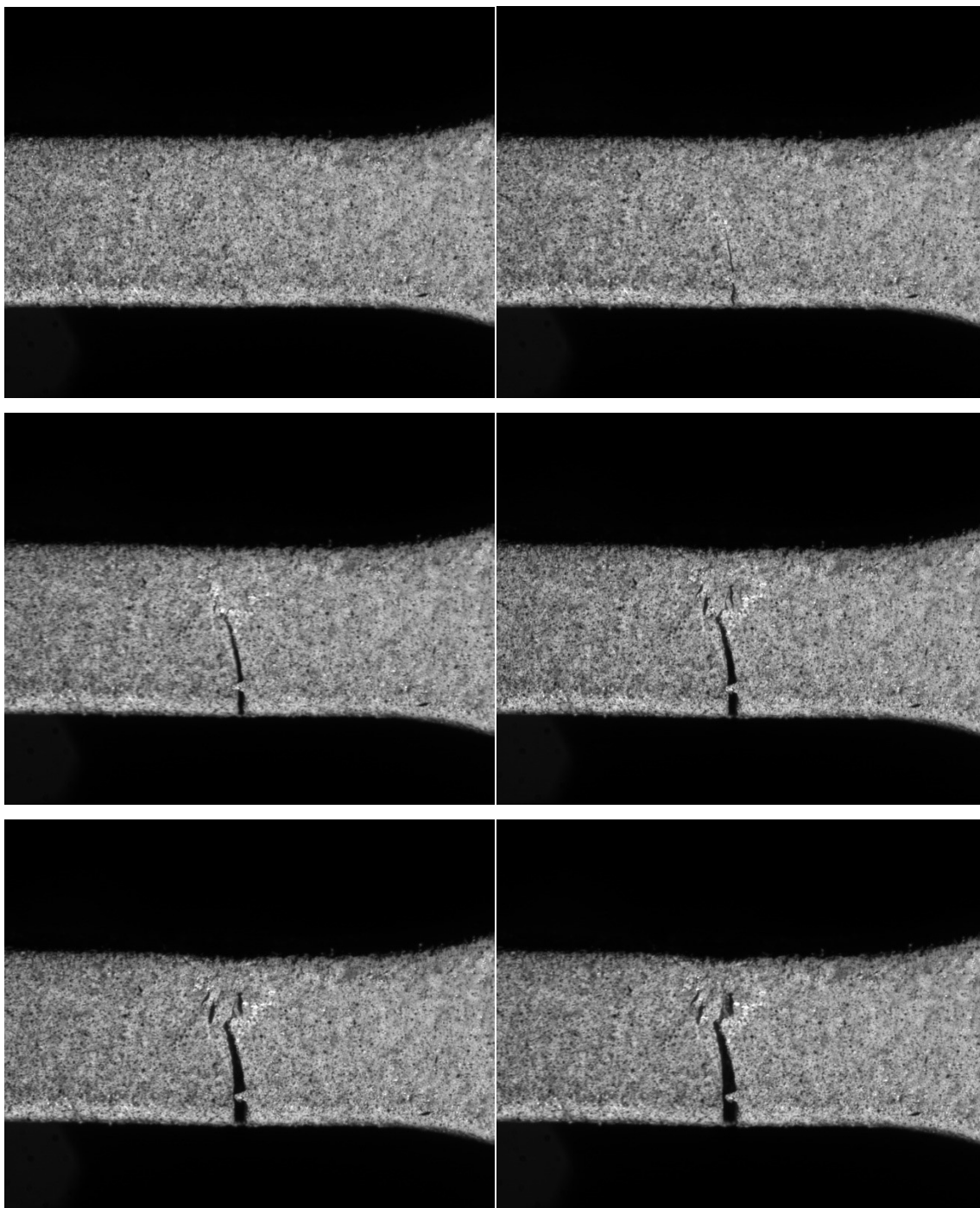


Fig. 4.7 Finestra Trips setup, contenente i parametri necessari a garantire l’arresto post rottura.

Una volta conclusa la prova, il materiale ottenuto, considerando alcune delle immagini caratteristiche ottenute dalla telecamera anteriore destra:



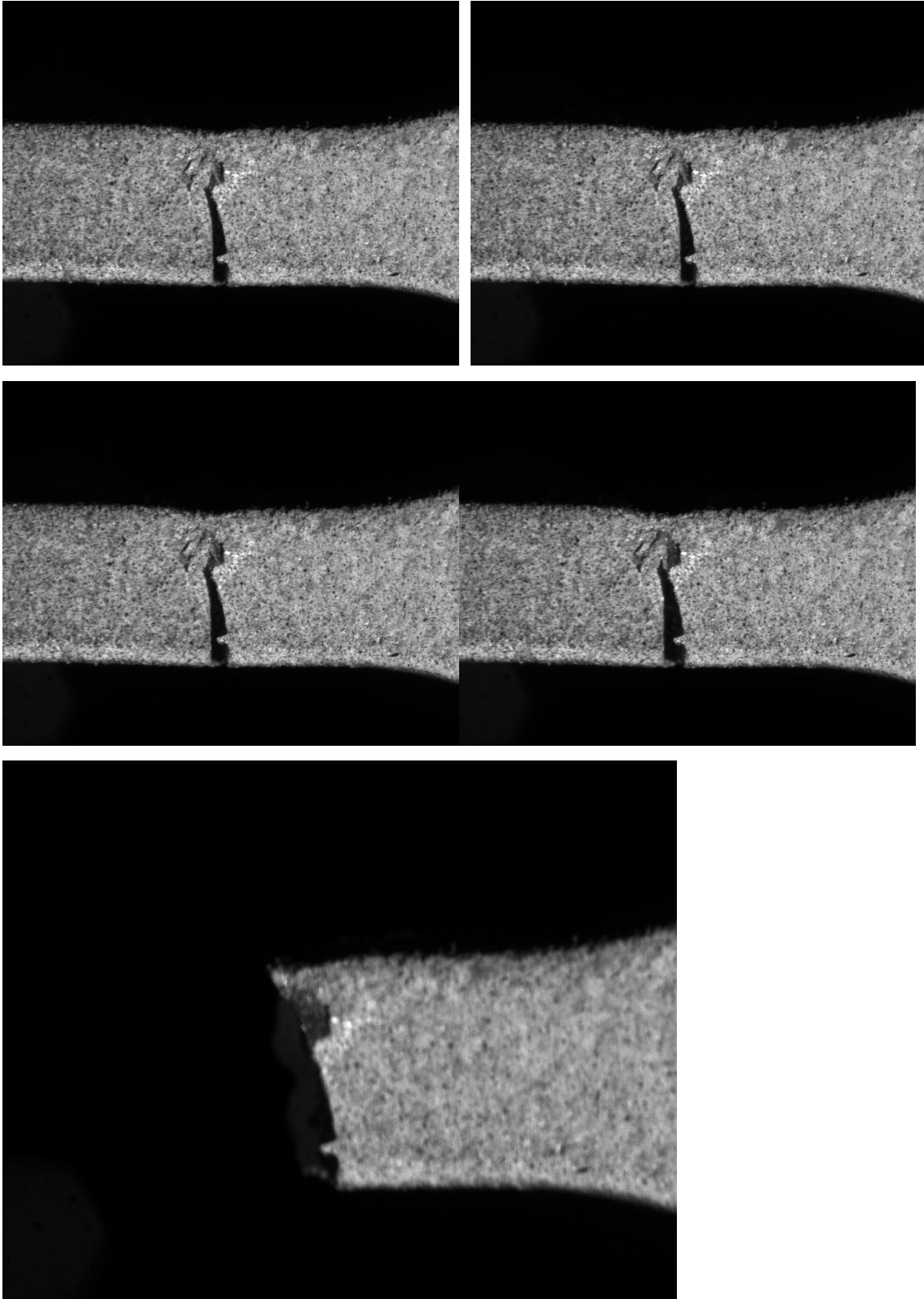


Fig. 4.8 Alcune delle immagini caratteristiche ottenute a seguito della prova.

CONCLUSIONI

Oggetto di questo studio è stato descrivere tutti i passaggi che hanno portato alla creazione di un sistema in grado di monitorare, istante per istante, l'avanzamento della cricca all'interno di un provino di alluminio 5754 H22 sottoposto a carichi ciclici pulsanti dallo zero.

Inizialmente, la prima cosa da fare è stata quella di comprendere tutti gli aspetti riguardanti un test di laboratorio di questa portata; difatti non si tratta di un normale test a fatica, ma combina al suo interno un livello di difficoltà ed attrezzature, in numero maggiore rispetto al semplice test. Al suo interno sono presenti aspetti riguardanti le prove di fatica, acquisizione ed analisi dati, nonché aspetti pratici di setting delle varie attrezzature utilizzate.

Come prima cosa si sono dovuti studiare entrambi i sistemi di acquisizione messi a disposizione dall'Università, con lo scopo di comprenderne le funzionalità e contemporaneamente le criticità. Questo percorso ha reso possibile l'individuazione del sistema ideale da cui partire per lo sviluppo del sistema di acquisizione "DUE PUNTI 3B", nel quale sono state aggiunte alcune funzionalità utili a rendere il sistema più efficace ed affidabile per lo svolgimento dei test.

In secondo luogo, si è provveduto a studiare tutti gli aspetti che caratterizzano l'esecuzione delle prove di fatica eseguite su provini di alluminio incruditi per laminazione. Prevalentemente sono stati analizzati gli aspetti pratici, non esposti durante i corsi di studio, partendo dall'installazione del provino fino ad arrivare al settaggio ed avviamento della macchina servo-pneumatica "Si-plan". Inoltre, è stata eseguita anche una prova di trazione statica, utile a definire i valori di carico necessari ad elaborare un test della durata giusta per lo scopo da raggiungere.

Tramite l'esperienza maturata in laboratorio è stato possibile apportare delle migliori chiavi per la buona riuscita del processo di acquisizione dati. Alcuni esempi sono l'introduzione della terza telecamera per le acquisizioni, il sistema di salvataggio di una ogni mille immagini eliminate, il meccanismo di interruzione automatico delle acquisizioni a seguito della rottura ed il perfezionamento della tecnica di verniciatura "Speckle" del provino, utile a garantire un miglior riferimento ottico durante il test.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Progetto e Costruzione di Macchine, Shigley, Nisbett, Budynas.
- 2) Manuale degli Organi delle Macchine, Niemann, Winter, Höhn,
- 3) Manuale di Meccanica, Caligaris, Fava, Tomasello.
- 4) Struttura e Proprietà dei Materiali Metallici, Cigada, Pastore.

SITOGRAFIA

- 1) Politecnico di Torino, “Comportamento meccanico dei materiali”,
corsiadistanza.polito.it/corsi/pdf/08AJRP/Esempio_prova_esame_risolta.pdf, 2006.
- 2) Wikipedia, “L'enciclopedia libera”.
[https://it.wikipedia.org/wiki/Fatica_\(scienza_dei_materiali\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Fatica_(scienza_dei_materiali))
- 3) G. Petrucci, “Lezioni di Costruzione di Macchine”.
- 4) M. Boniardi, A. Casaroli, C. Tagliabue, Politecnico di Milano, “Fenomeni di danneggiamento dei materiali metallici dovuti all'esercizio (Failure Analysis)”.
- 5) Francesco Perugini, Tesi in Ingegneria Aerospaziale, “Studio di un'attrezzatura per prove di ultrafatica”.
- 6) G. Petrucci, Università di Padova, “Curva del Wöhler e Limite di Fatica”,
www1.unipa.it/giovanni.petrucci/Disp/Fatica1.pdf
- 7) C. Cali, C. Napoli, Università degli studi di Salerno, “Appunti sulla Resistenza a Fatica”.
- 8) “Tecnologie e Materiali Aerospaziali”, “Cap. 57 - Meccanismi di danno nei Velivoli Atmosferici”.
- 9) D. Amodio, Università Politecnica delle Marche, Facoltà di Ingegneria Meccanica, “Dispense del corso di Costruzione di Macchine”,
<http://www.costruzionedimacchine.com/>
- 10) M. Lucesoli, Tesi in Ingegneria Meccanica, “Realizzazione di un setup ottico-sperimentale per l'acquisizione dell'avanzamento di cricche in prove di fatica ad alto numero di cicli”.
- 11) Tesi in Ingegneria Meccanica di Calcinaro.