



**PRIMA GIORNATA DI STUDIO DEL GRUPPO DI LAVORO AIAS "XTREMA"  
(MATERIALS AT EXTREMES)**



***COMPORAMENTO MECCANICO E MODELLAZIONE DEI POLIMERI AD ALTI STRAIN RATES***

**Mercoledì' 29 marzo 2023, Politecnico Di Milano**

***Caratterizzazione statica e dinamica del Policarbonato: aspetti chiave per la riproduzione del meccanismo di propagazione deformativa***

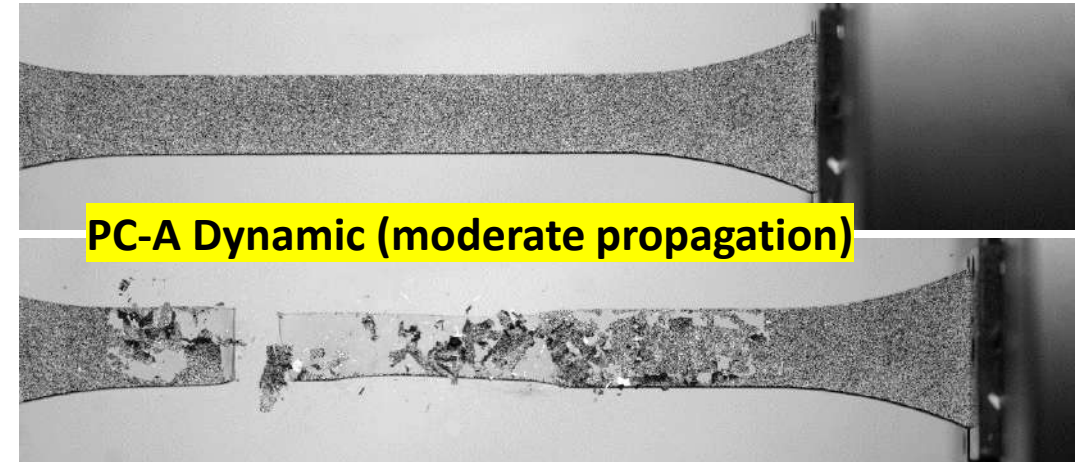
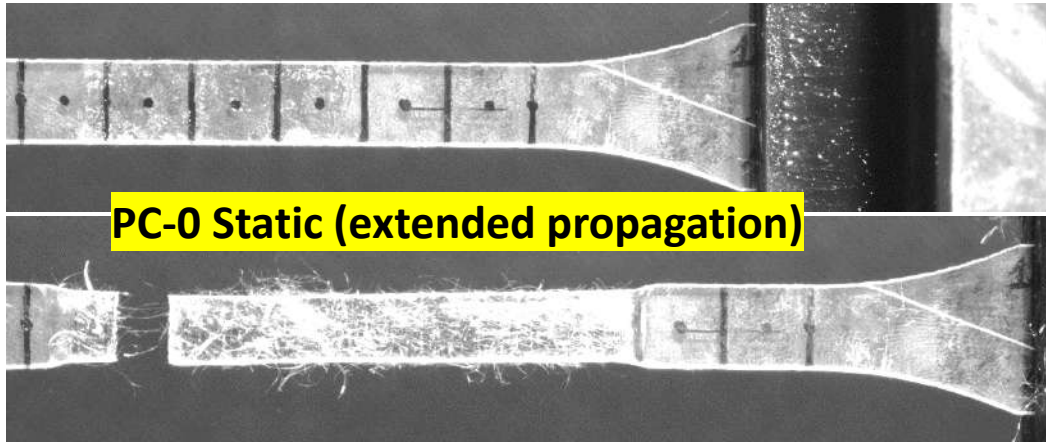
G. MIRONE , R. BARBAGALLO, G. BUA

University of Catania, DICAR – Department of Civil Engineering and Architecture, via SantaSofia 64 – 95125 – Catania

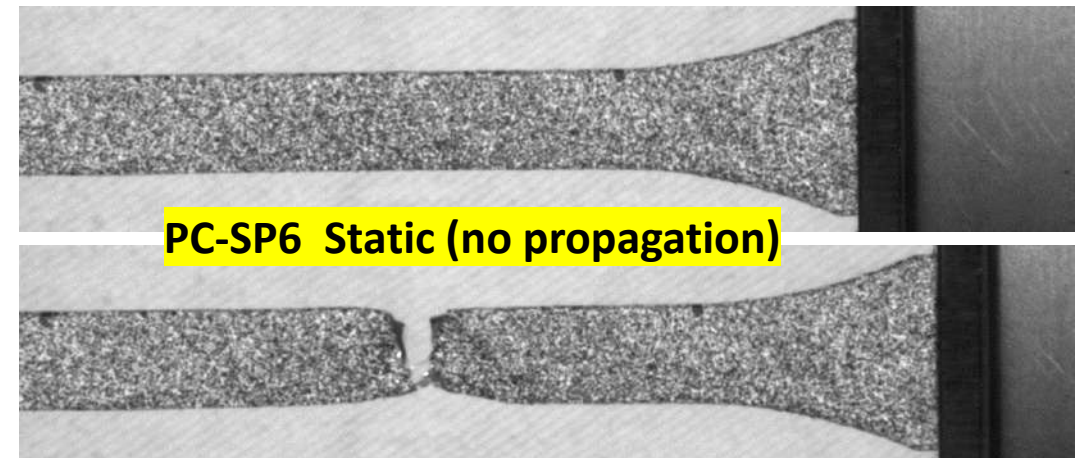
Email: [gmirone@dii.unict.it](mailto:gmirone@dii.unict.it)

# OVERVIEW

- Particolare meccanismo deformativo del PC (localizzazione / propagazione) :



- Cause / Effetti / Significato fisico
- Riproducibilità del fenomeno & Modellazione materiale
- Interazione Strain Propagation / Strain rate



# OVERVIEW

PROVE EFFETTUATE:	Lotto materiale	Aspect ratio provini w/t, L/w	Statica	Dinamica	Provini
	PC-0	2.5, 6	X		“Large” (4x10x75)
	PC-A	2.5, 6	X	X (7 s <sup>-1</sup> )	“Large” (4x10x75)
	PC-SP6	1.25, 7.5	X	X (15 s <sup>-1</sup> )	“Small” (4x6x50)

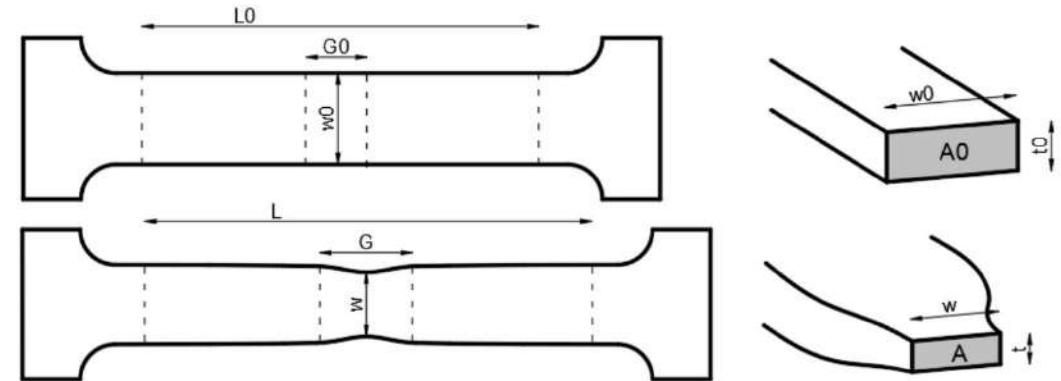
## DATI ACQUISITI:

- Evoluzione L diverse gage lengths (20, 40, 60 mm)
- Evoluzione w larghezza minima
- Carico

**ISOTROPIA:**

$$A \cdot L = A_0 \cdot L_0 \rightarrow A = A_0 \cdot \frac{L_0}{L} \rightarrow \text{SOLO PRE-NECK}$$

$$\frac{t}{w} = \frac{t_0}{w_0} \rightarrow A = w^2 \cdot \frac{t_0}{w_0} \rightarrow \text{SEMPRE}$$



## DATI CALCOLATI:

- Curva Strain / Stress true da Elongazione:  $\varepsilon_{True-L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right), \quad \sigma_{True-L} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{L}{L_0}$

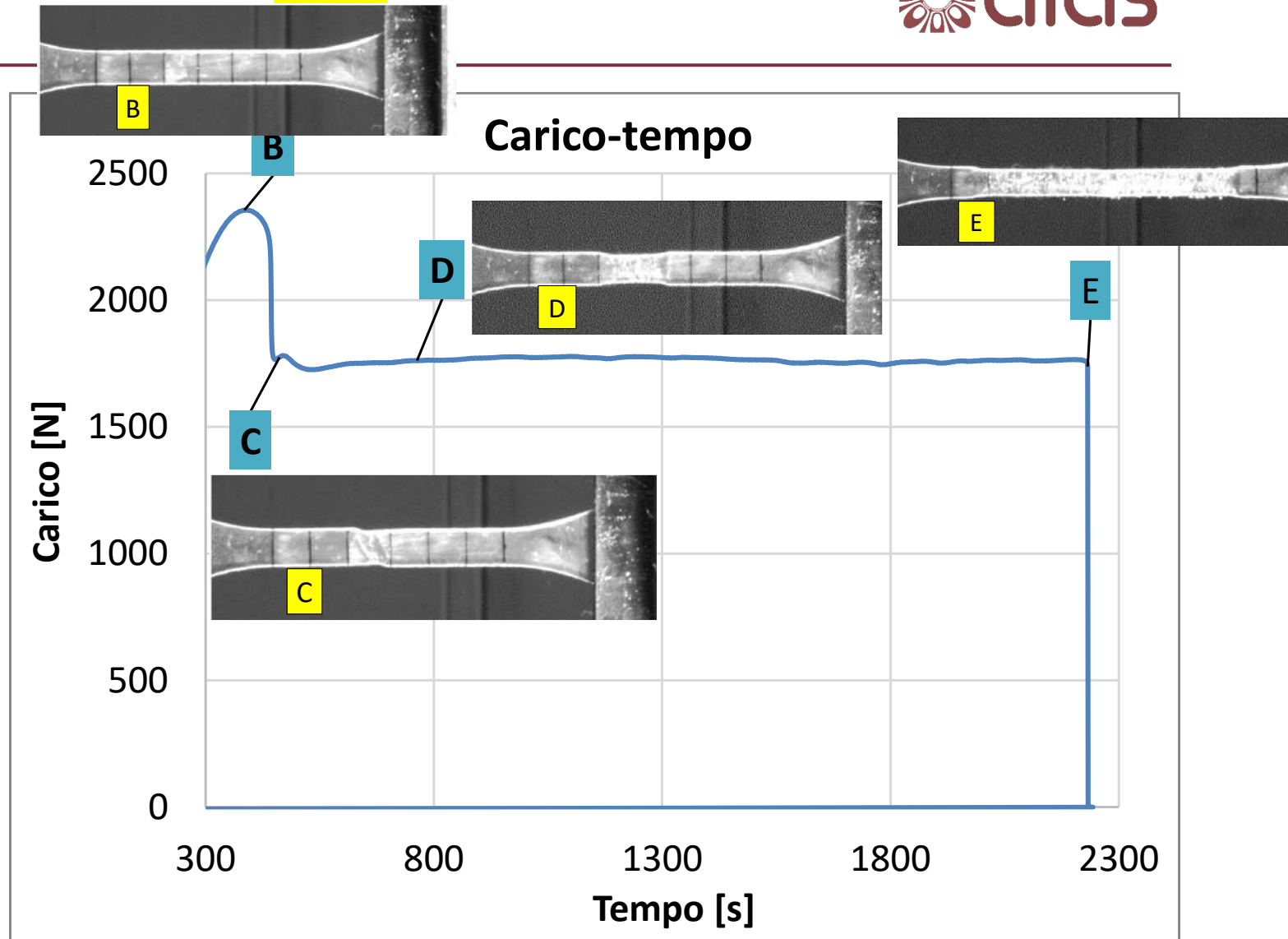
- Curva Strain / Stress true da Area:  $\varepsilon_{True} = 2 \cdot \ln\left(\frac{w_0}{w}\right), \quad \sigma_{True} = \frac{F}{w^2 \cdot \frac{t_0}{w_0}}$

# ANALISI PROVA-TIPO PROPAGAZIONE (PC-0)



## CARICO – TEMPO:

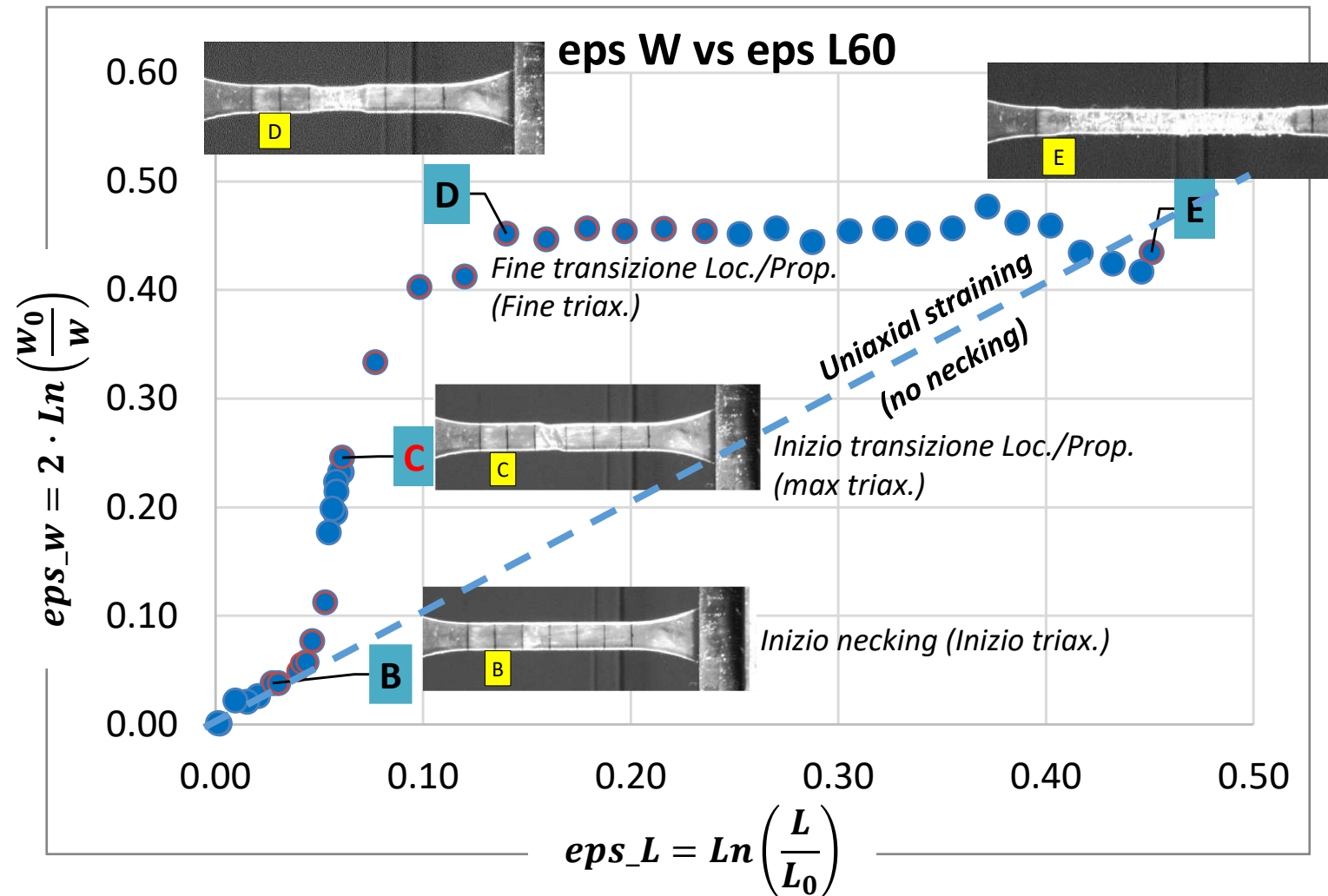
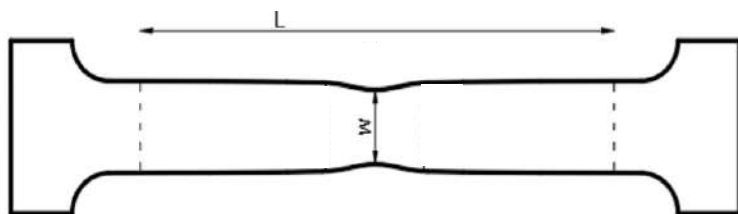
- 0-B: Strain uniforme;
- B-C: Strain localizza (strizione neck);
- C-D: Transizione Localizzaz. / Propagaz.;
- D-E: Propagazione;



# ANALISI PROVA-TIPO PROPAGAZIONE (PC-0)

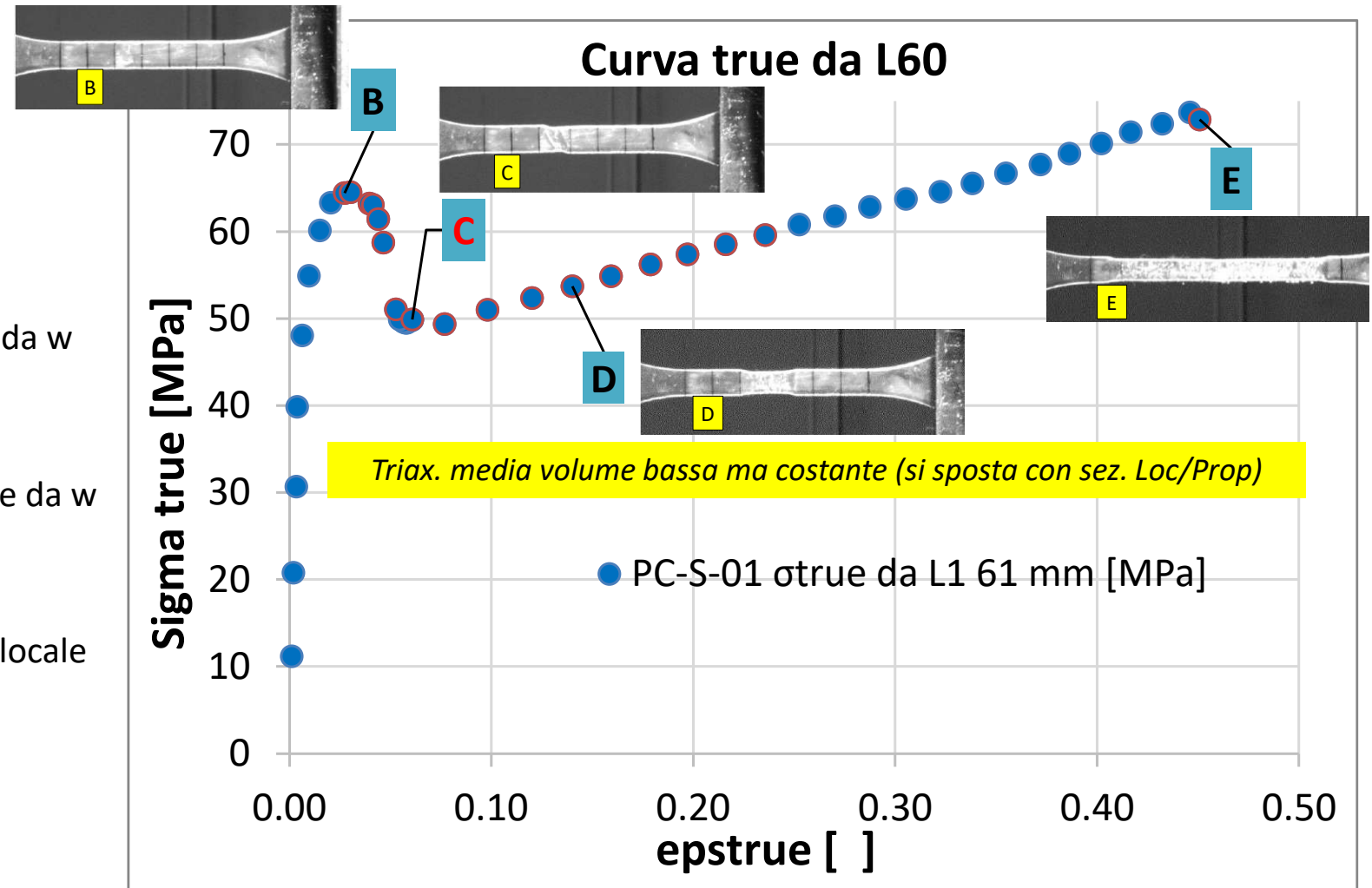
## STRIZIONE – ELONGAZIONE TOTALE:

- A-B: retta 45 deg. ( $\epsilon_w = \epsilon_L$ );
- B-C: strizione  $\gg$  elongazione;
- C-D: striz. rallenta & elongaz. Accelera;
- D-E: Elongazione  $\gg$  strizione;



## CURVA TRUE DA ELONGAZIONE:

- A-B: Curve true da L e da w identiche;
- B-C: strain apparente da L  $\ll$  strain effettivo da w (localizzazione);
- C-D: strain globale da L accelera e strain locale da w rallenta (trnasiz. Localiz. / propagaz.);
- D-E: strain globale da L cresce mentre strain locale da w quasi fermo

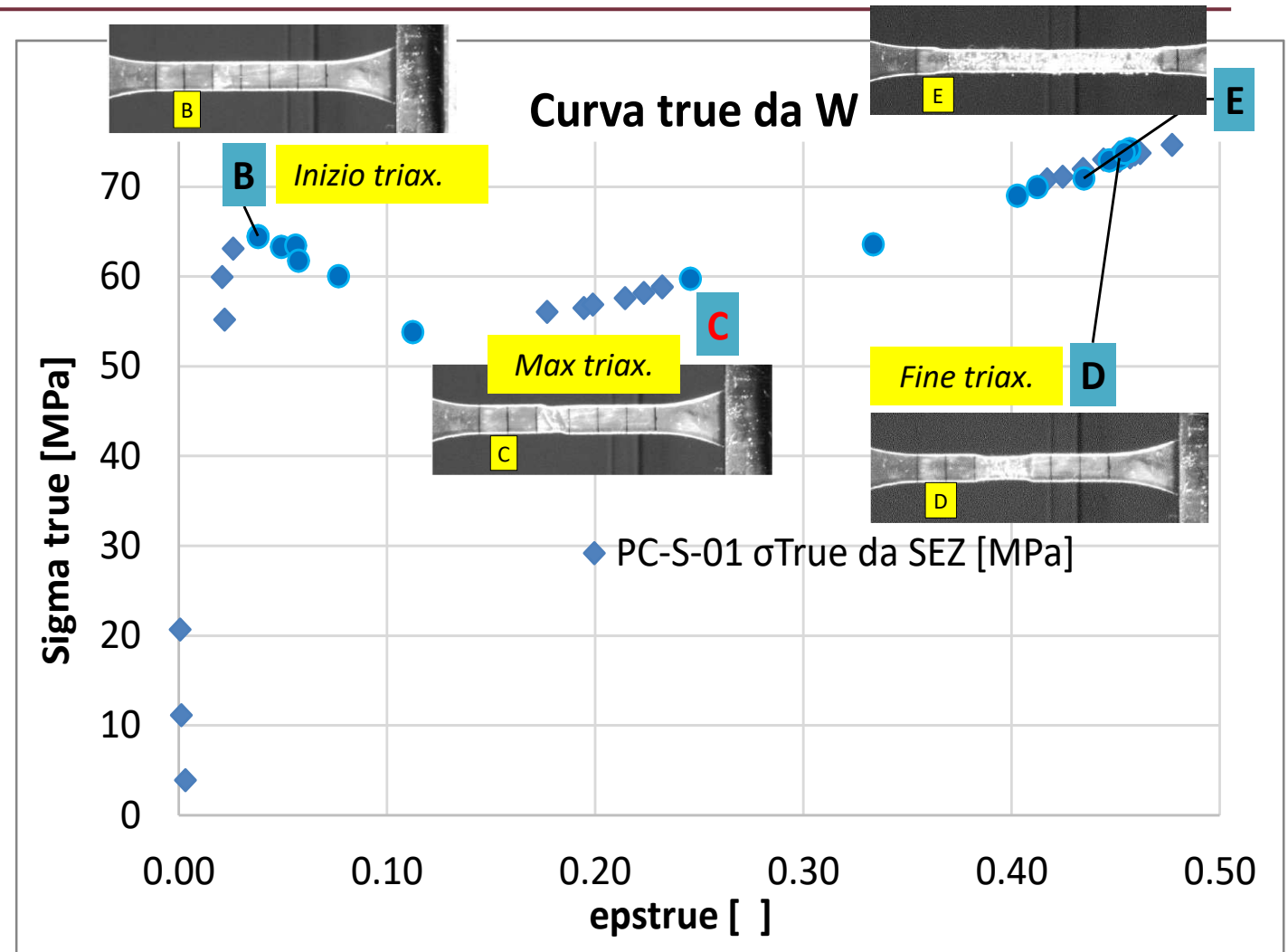


# ANALISI PROVA-TIPO PROPAGAZIONE (PC-0)



## CURVA TRUE DA AREA:

- A-B: tratto pre-neck  $\approx$  picco stress;
- B-C: fase softening + strain localiz. (triax. crescente);
- C-D: Transizione localizzaz. / propagaz. (triax. decrescente);
- D-E: Propagaz (strizione quasi ferma);



# ANALISI PROVA-TIPO PROPAGAZIONE (PC-0)



CURVE TRUE AREA / ELONGAZ. & CURVA MISES :

**Carico costante Post-Picco**  $\rightarrow \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = \sigma \rightarrow$   
 $\int \frac{\partial \sigma}{\sigma} = \int \partial \varepsilon \rightarrow \ln(\sigma) = C + \varepsilon \rightarrow \sigma = K \cdot e^\varepsilon$

Snervamento ad  $\varepsilon=0 \rightarrow K = \sigma_y$



**Curva True Post-Picco esponenziale:**

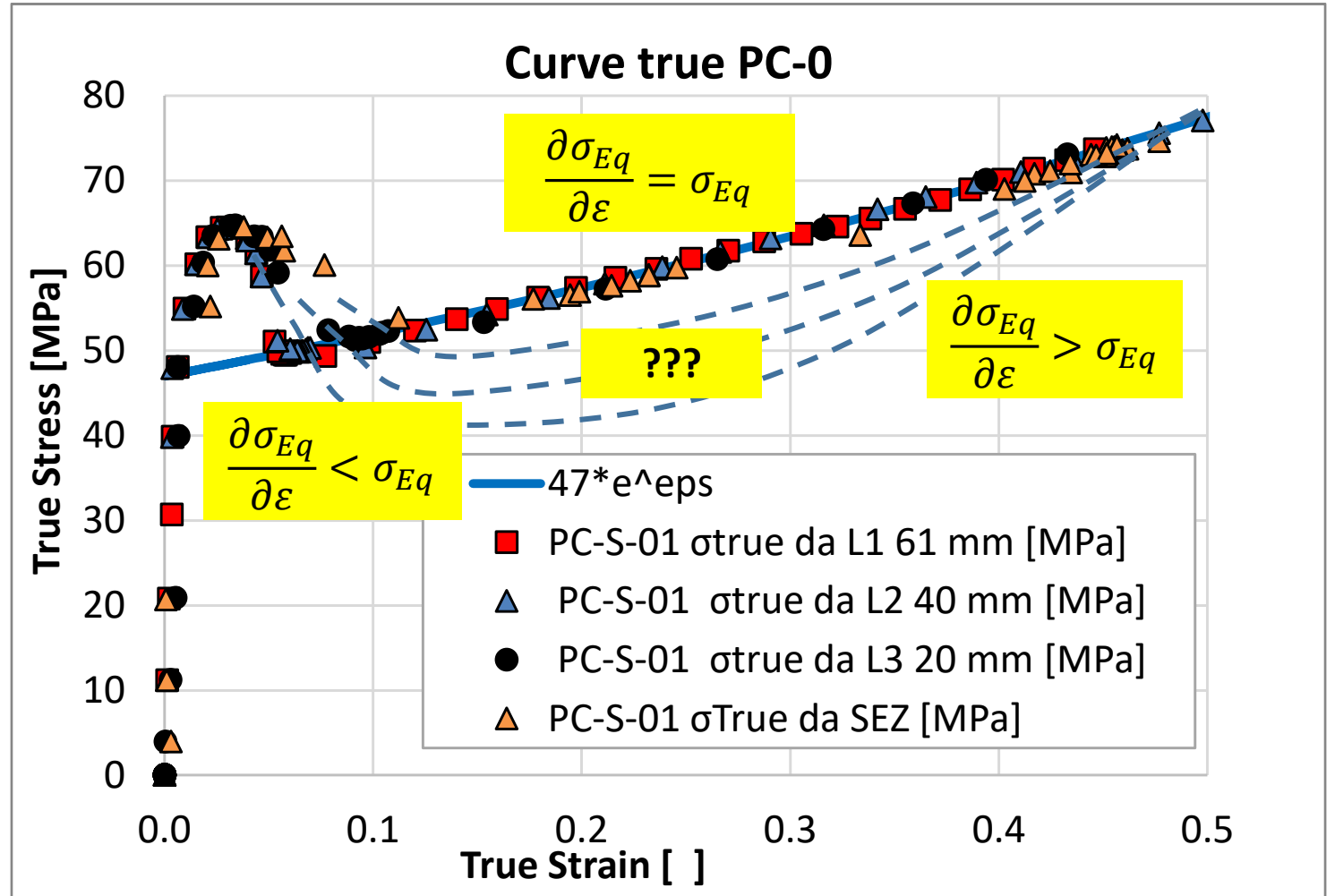
$$\sigma_{True} = \sigma_y \cdot e^\varepsilon$$

Geometria localizzazione  $\rightarrow$  Stress Triax



**Curva Mises  $\sigma_{Eq}(\varepsilon_{Eq})$  + bassa di true, "Vantaggio" derivata su funzione,**

$$\frac{\partial \sigma_{Eq}}{\partial \varepsilon} > \sigma_{Eq}$$





# ANALISI PROVA-TIPO PROPAGAZIONE (PC-0)



EQUILIBRIO FASI LOCALIZZ. / PROPAGAZ. :

*B-C:*  
 $\sigma \cdot A < \sigma_{Peak} \cdot A^* \rightarrow$  Localization

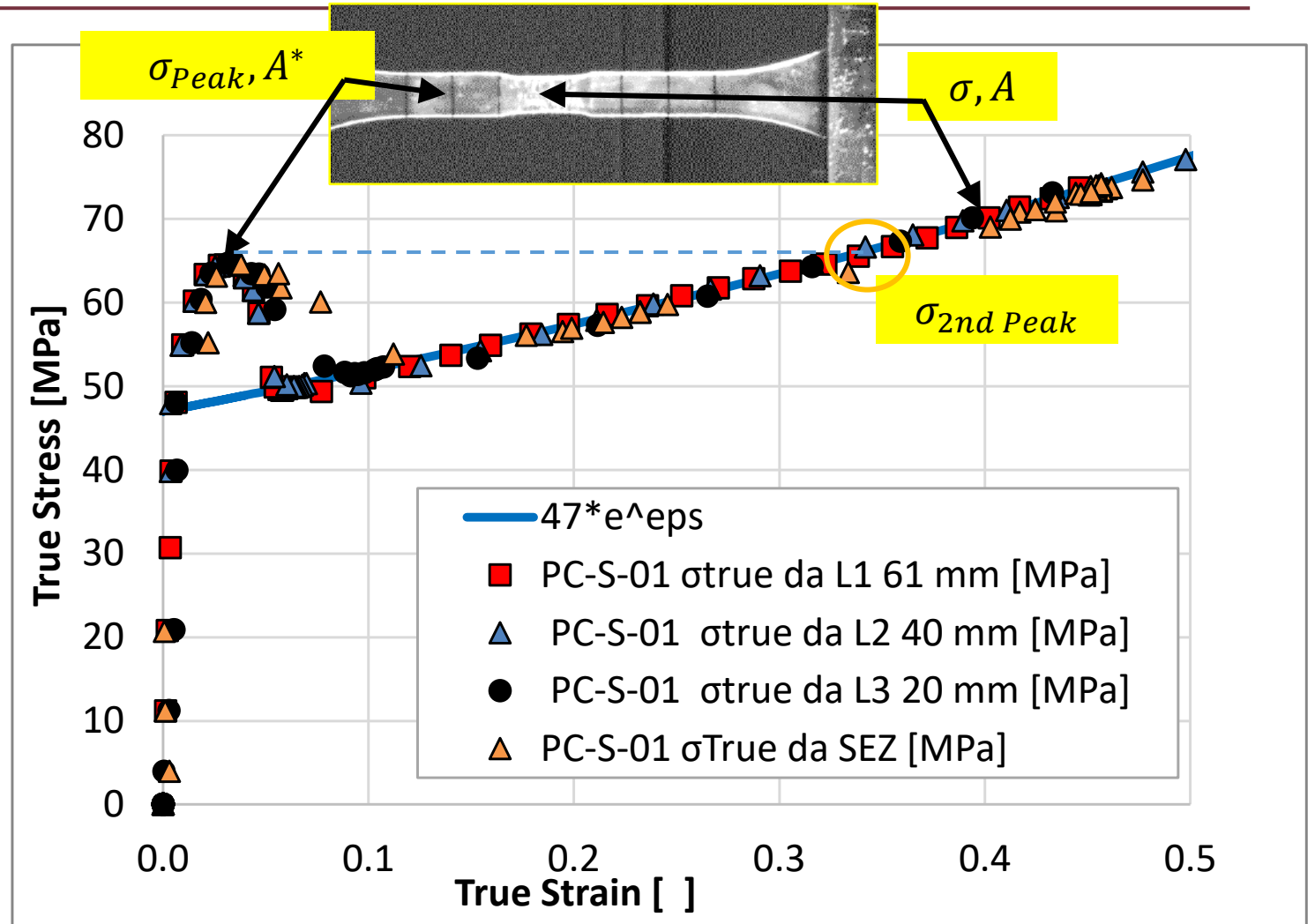
*C-D:*  
 $\sigma \cdot A \approx \sigma_{Peak} \cdot A^* \rightarrow$  Transition

*D-E:*  
 $\sigma \cdot A > \sigma_{Peak} \cdot A^* = F \rightarrow$  Propagation

(with  $A^* = A_0 \cdot e^{-\epsilon_{Peak}}$ )



*Materiale si "irrobustisce" progressivamente su zona localizzata fino a che "preferisce" propagare su zone poco deformate invece che incrementare strain e strizione locali*



# CURVA COSTITUTIVA -TIPO X PROPAGAZIONE (PC-0)



## IMPLEMENTAZIONE CURVE COSTITUTIVE X FEM

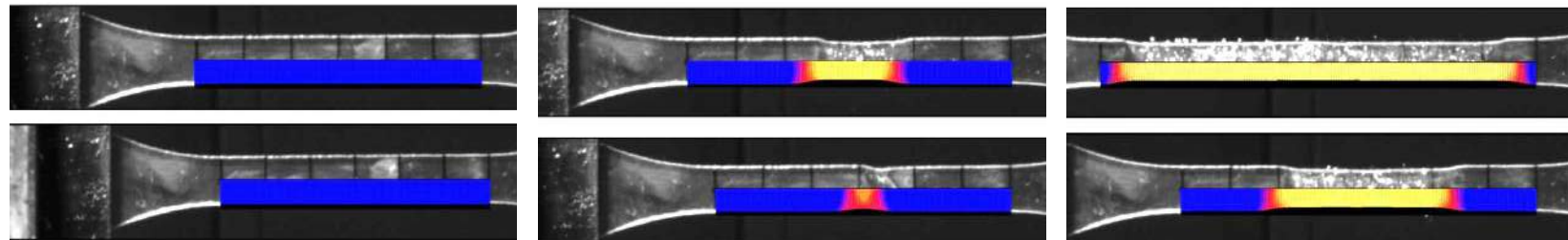
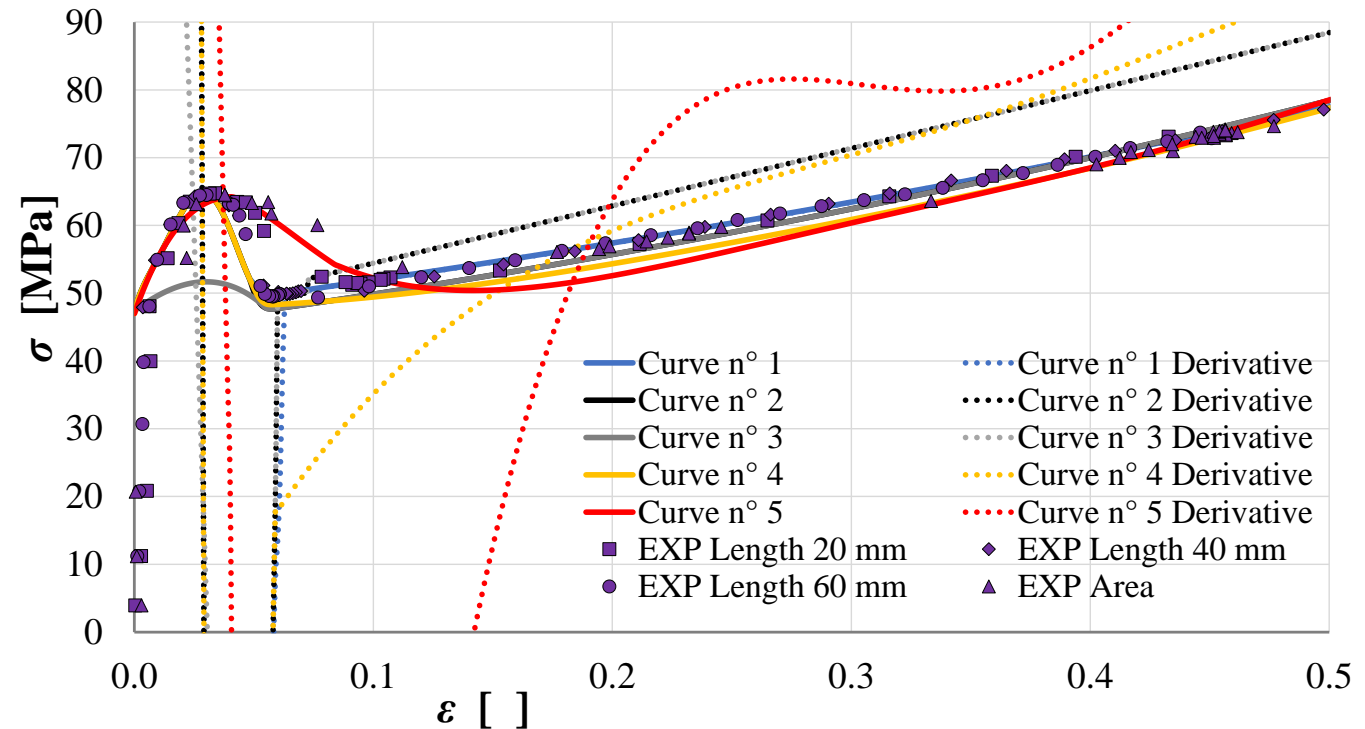
(non lineare - large displ - mesh full Hexa –additive decomp. -

Updated Lagrangian formul. etc. etc.)

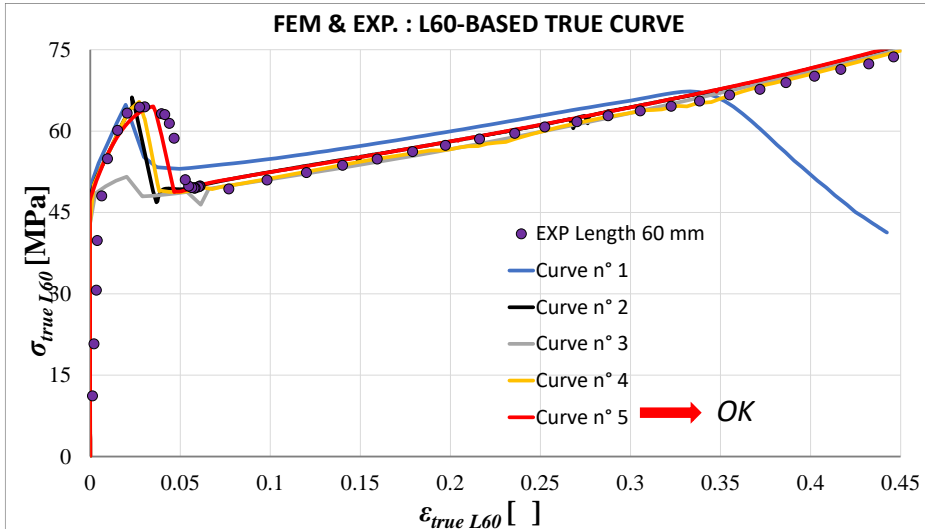
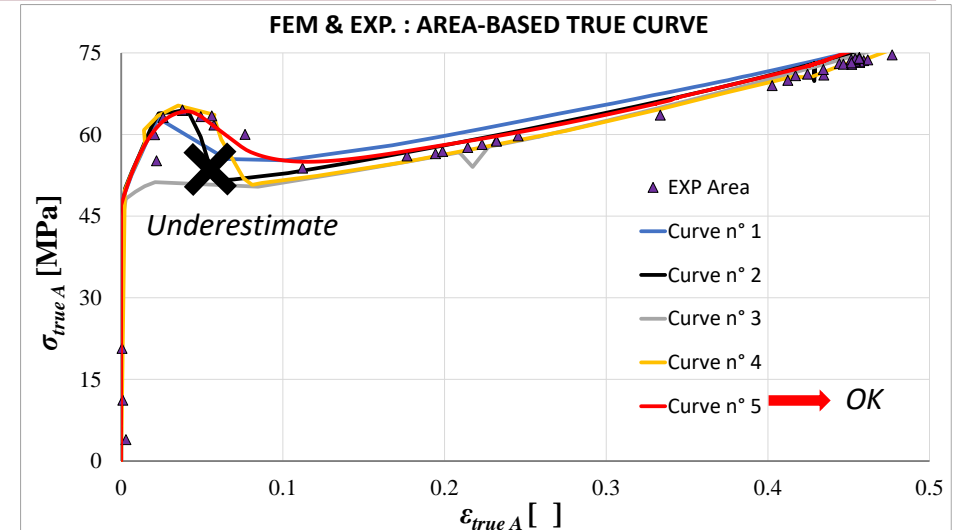
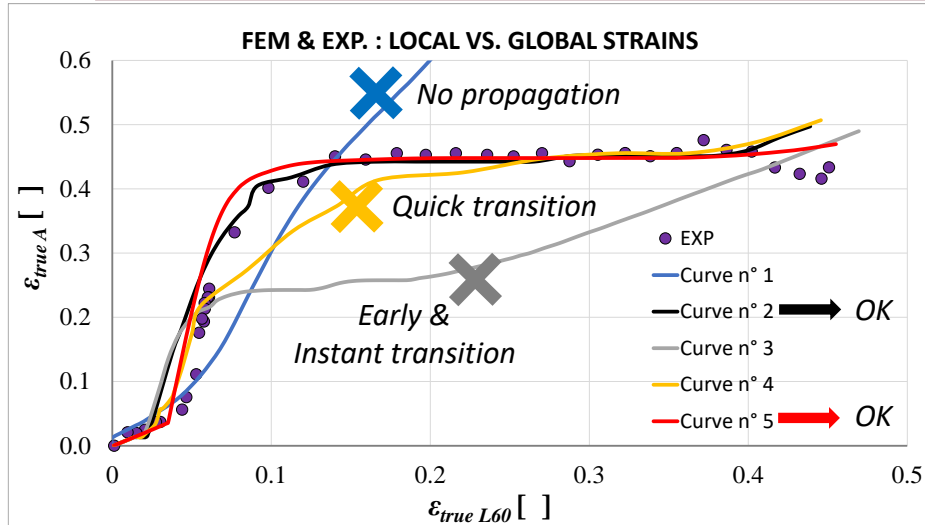
Curve costitutive testate :

- C1: True intera non corretta (picco da Area &  $\sigma_y \cdot e^\epsilon$ )
- C2: Picco Ristretto (L60) & post-picco pendenza<sup>+</sup>
- C3: Picco Ristretto (L60) & abbassato & postpicco pendenza<sup>+</sup>
- C4: Picco Ristretto (L60) & postpicco pendenza<sup>++</sup>
- C5: Picco true da area & postpicco pendenza<sup>+++</sup>

## IMPLEMENTED CONSTITUTIVE CURVES & SLOPES



# CURVA COSTITUTIVA -TIPO X PROPAGAZIONE (PC-0)



- Mises = True  $\rightarrow$  no propagazione ( $\sigma \cdot A = \sigma_{Peak} \cdot A^*$  until failure)
- Abbassare picco  $\sigma_{Peak}$   $\rightarrow$  anticipa transizione local. / propagaz.
- “stirare” maggiormente in basso centro Esponenz.  $\rightarrow$  aumenta “vantaggio”  $\frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} > \sigma$  (da strain  $\sigma_{2nd Peak}$ )  $\rightarrow$  accelera transizione local./ propagaz.
- Allargare discesa post-picco  $\rightarrow$  posticipa  $\frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} > \sigma$  a strain alti  $\rightarrow$  facilita localizzazione & rallenta transizione local./ propagaz.

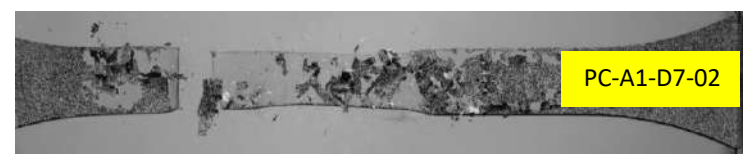
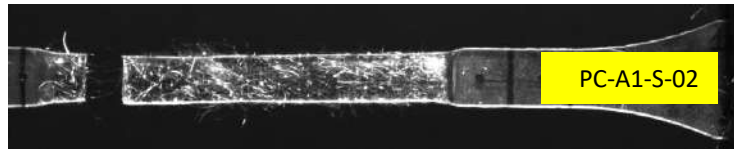
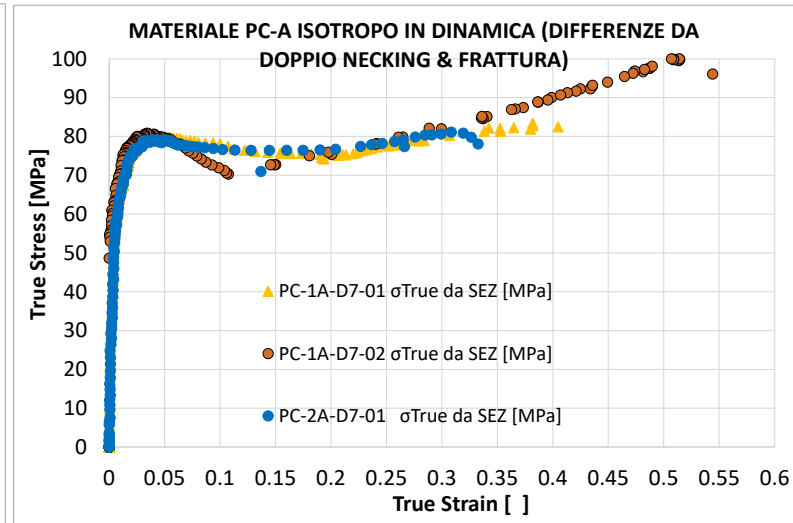
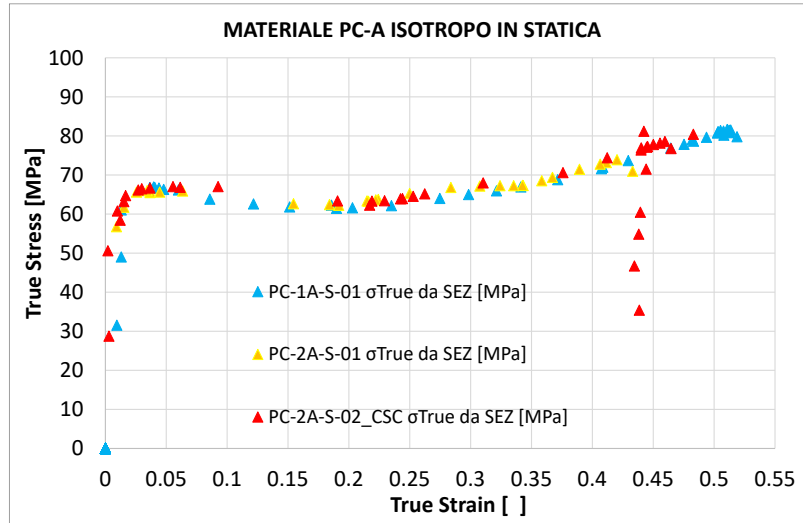
Lotto materiale	Aspect ratio provini w/t, L/w	Statica	Dinamica
PC-A	2.5, 6	$5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$	$7 \text{ s}^{-1}$

- PROVE IN DIREZIONI 1 – 2 → CHECK ISOTROPIA (STATICA & DINAMICA)
- CURVE TRUE STRESS-STRAIN AREA-BASED & ELONG.-BASED → CHECK TRUE ESPONENZIALE (STAT. & DYN.)
- CURVE STRAIN (RATE) AREA-BASED & ELONG.-BASED → TREND LOCALIZZAZIONE / PROPAGAZIONE (STAT. & DYN.)
- GEOMETRIA PROVINI DEFORMATI A VARI LIVELLI → STIMA DIFFERENZE TRUE / MISES

# VERIFICA SPERIMENTALE STATICA / DINAMICA MATERIALE "PC-A"



direzioni 1 / 2 x check anisotropia

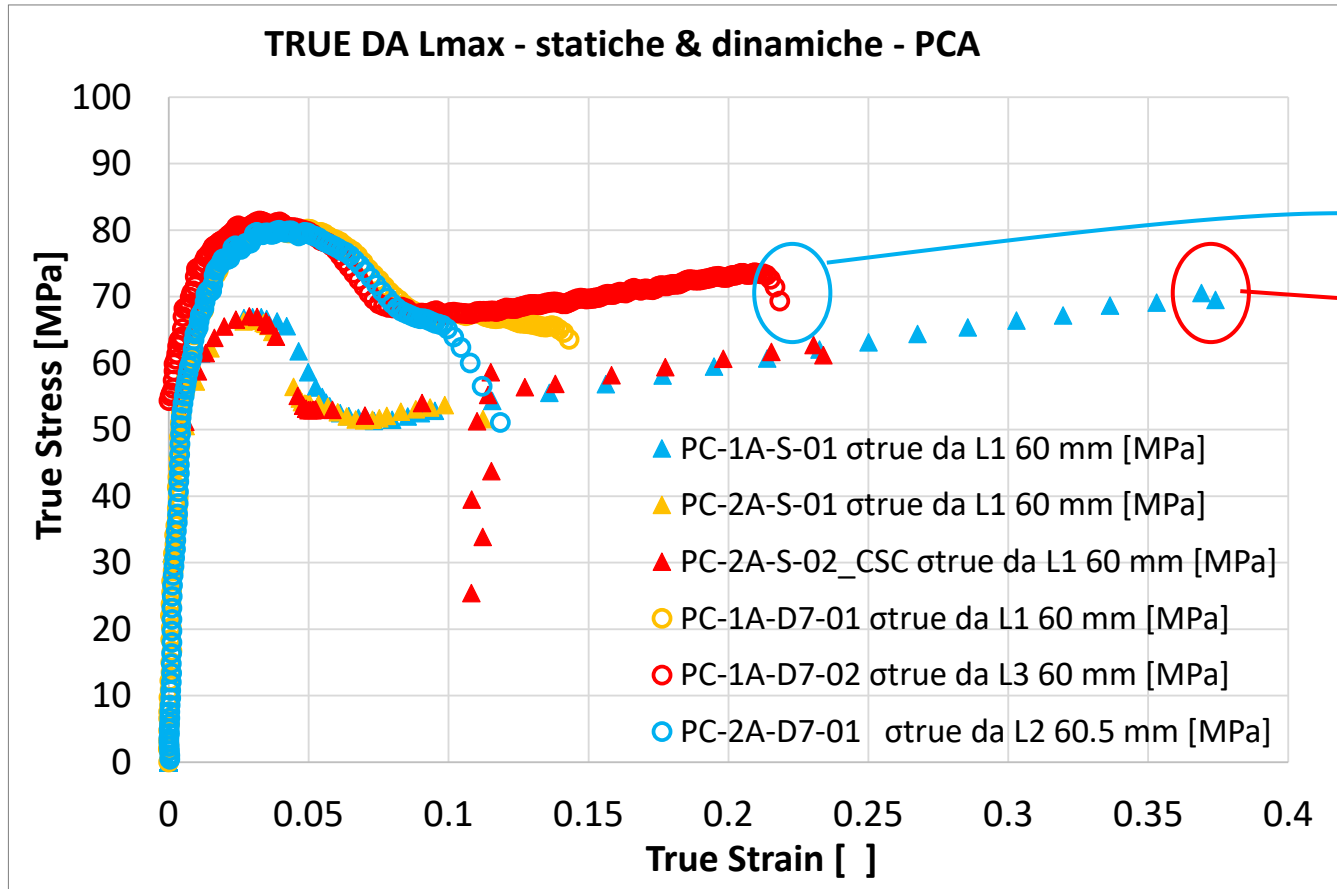


- Confronto direzioni 1 – 2 → PC-A Isotropo (statica & dinamica)
- A1-D-01 ed A2-D-01 risposta dinamica identica → differenza A1-D prove 01 e 02 da ( Maggiore triax / postpicco + alto / duttilità minore) dovuta a finitura – microgeom. provini
- Frattura su sezione passaggio Loc./Prop.

# VERIFICA SPERIMENTALE STATICA / DINAMICA MATERIALE "PC-A"



True Esponenziale da L x rates Statico ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) e Dinamico ( $7 \text{ s}^{-1}$ )



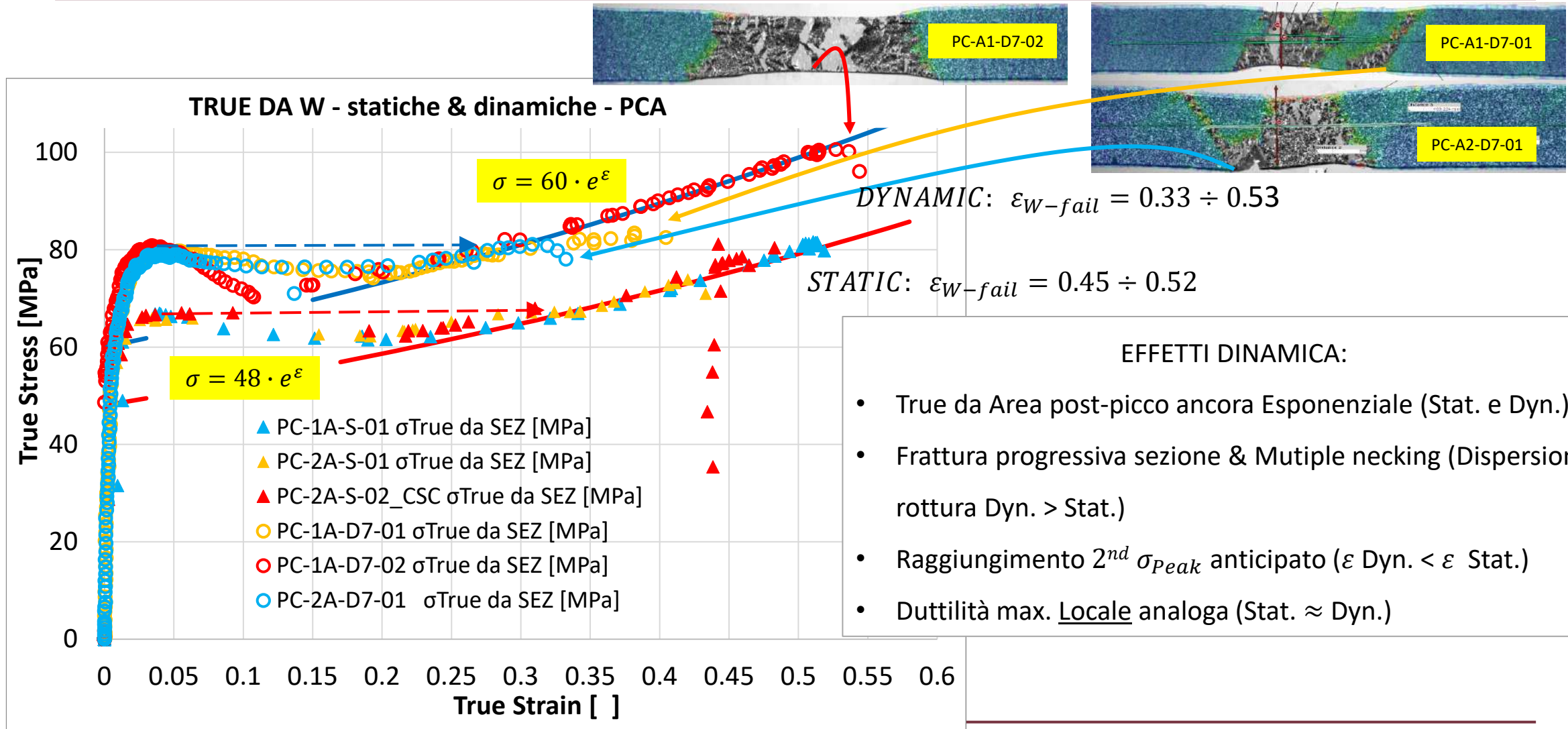
*DYNAMIC*:  $\varepsilon_{L-fail} = 0.1 \div 0.22$

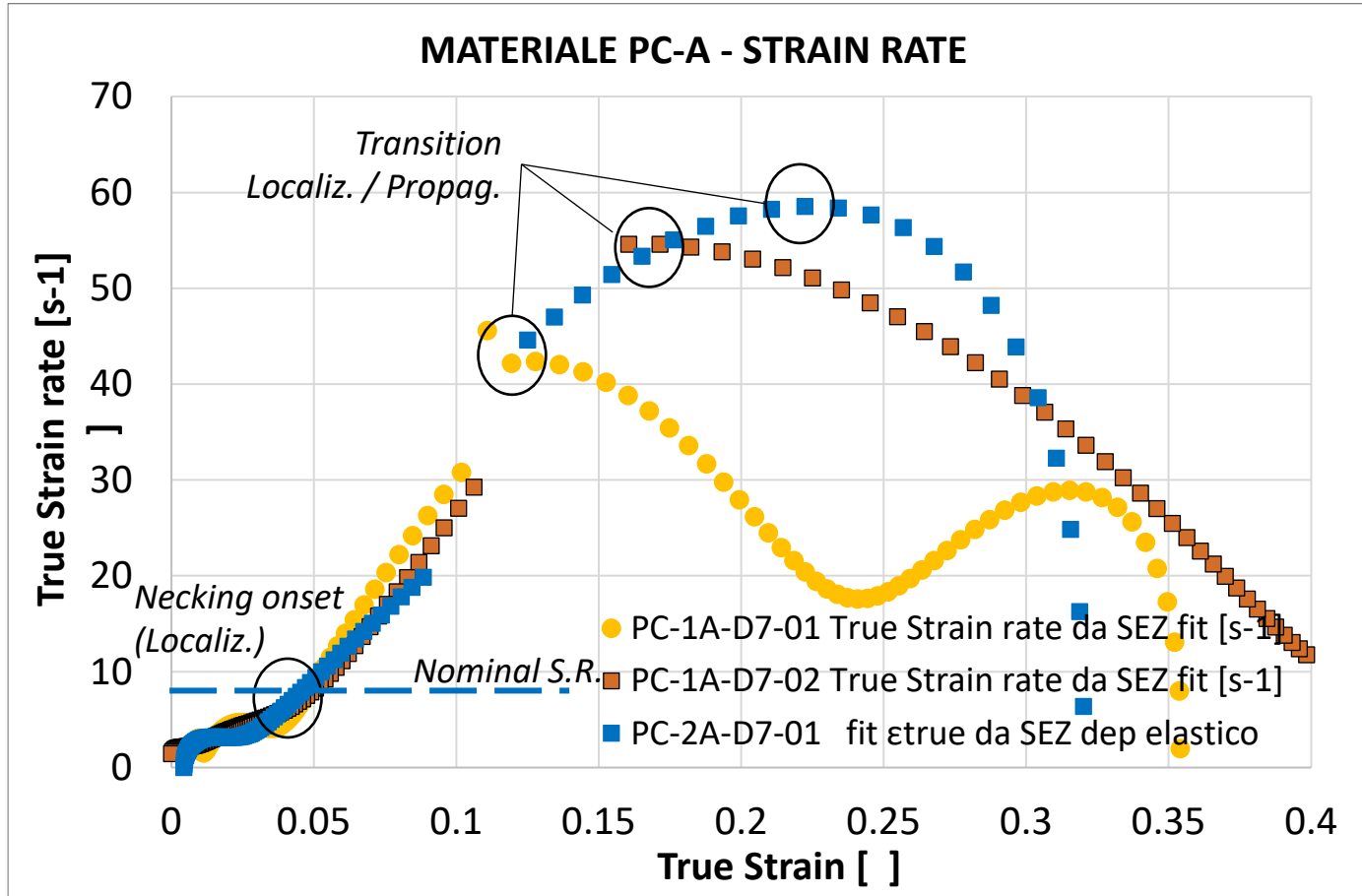
*STATIC*:  $\varepsilon_{L-fail} = 0.1 \div 0.38$

- Marcato Strain rate effect
- Dispersione rottura molto elevata ?????
- Duttibilità Dinamica << duttilità Statica ?????

# VERIFICA SPERIMENTALE STATICA / DINAMICA MATERIALE "PC-A"

True Esponenziale da W @ rates Statico ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) e Dinamico ( $7 \text{ s}^{-1}$ )





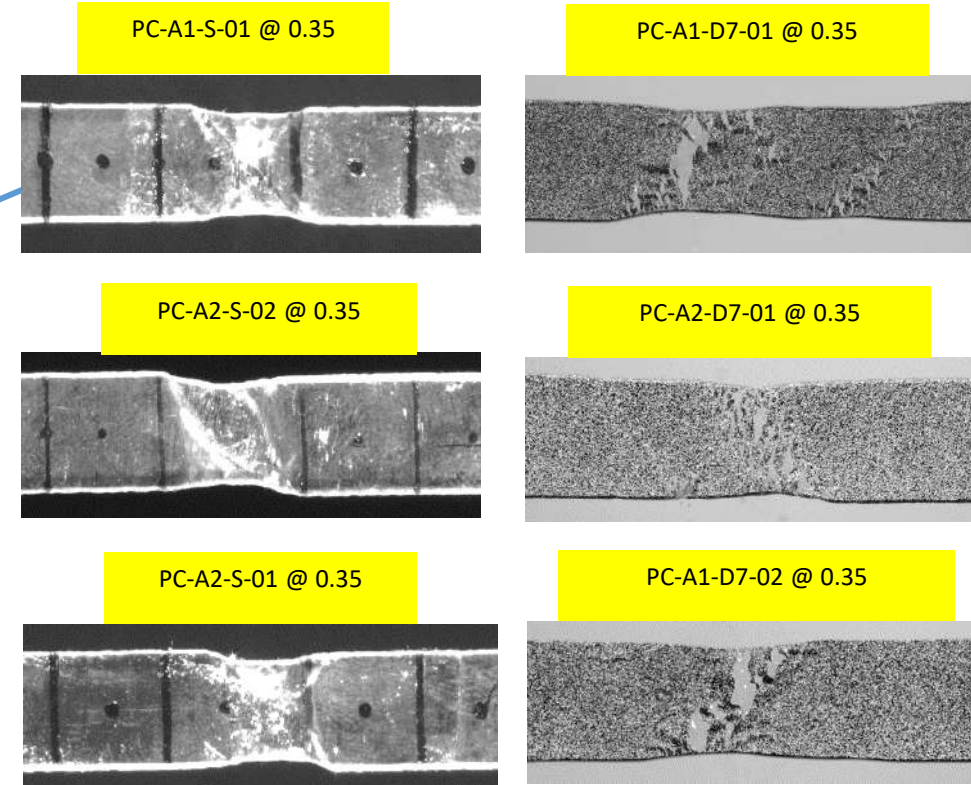
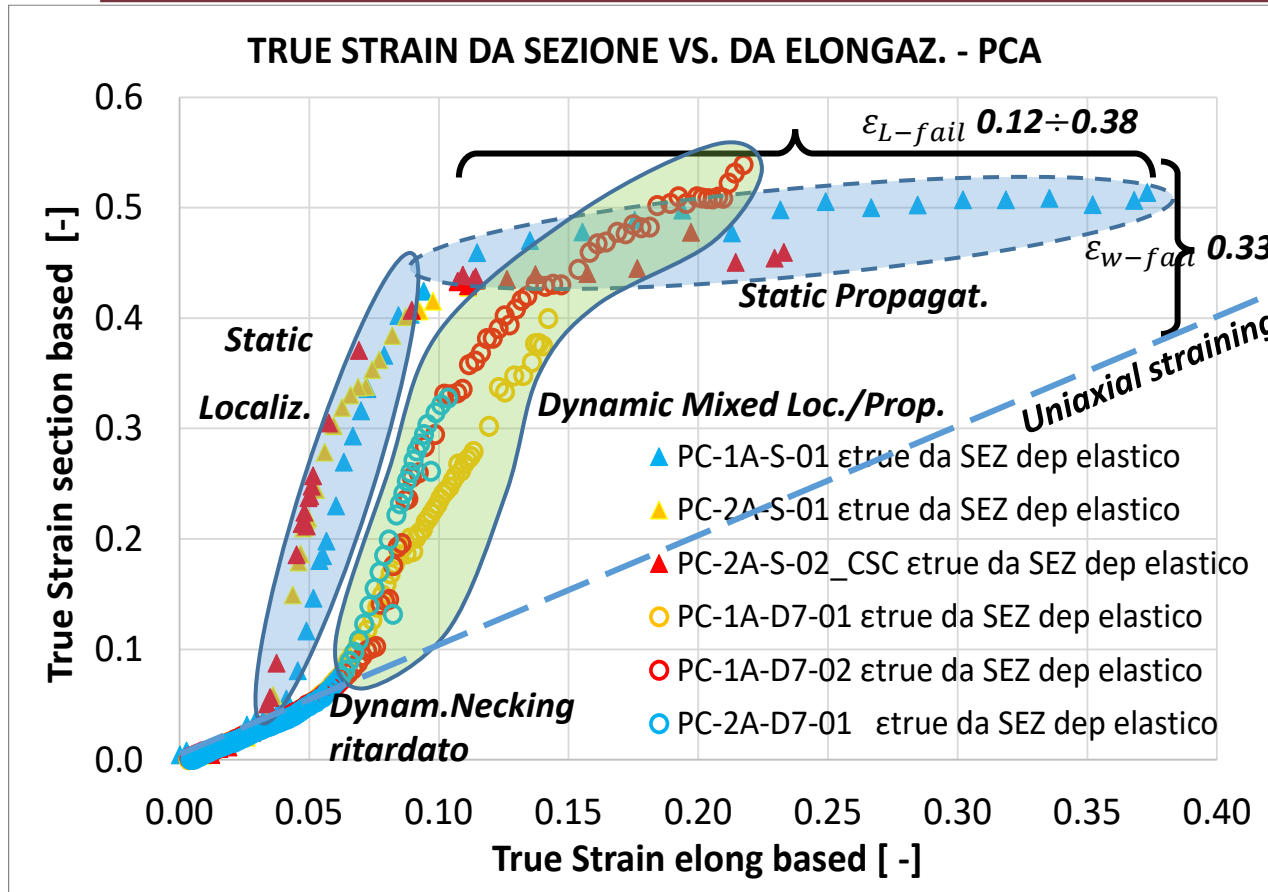
Prove Dinamiche:

- Fase di localizzazione "pura" (solo necking) → aumenta lo strain rate
- Transizione rallenta / Propagazione blocca strain rate locale



# VERIFICA SPERIMENTALE STATICA / DINAMICA MATERIALE "PC-A"

Curve  $\varepsilon_W / \varepsilon_L$  Statica e Dinamica

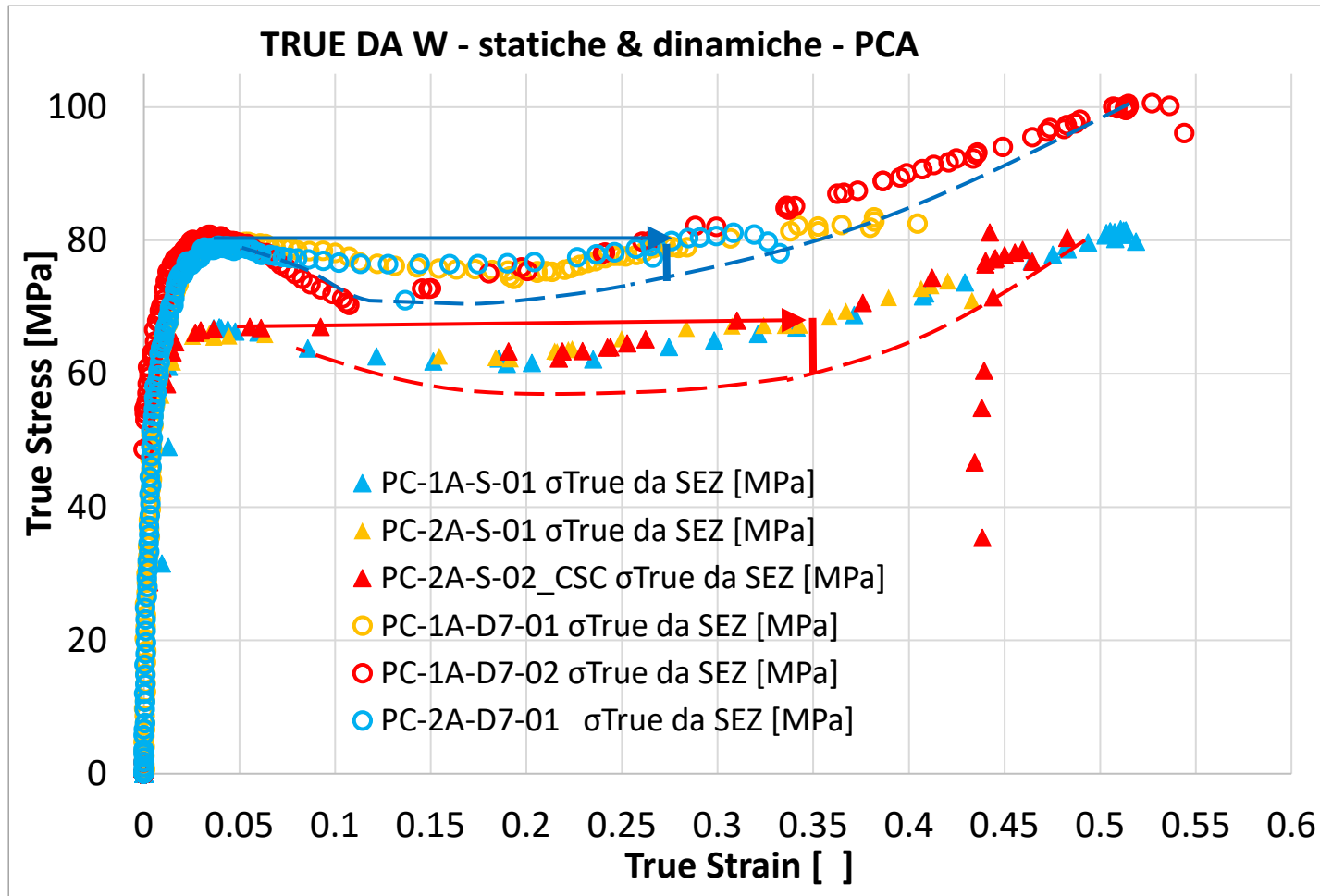


- Dati W-based: estesi fino a strain rottura locale → reale
- Dati L-based: dipendono da propagazione → duttilità sottostim. !!

- Strain rate ritarda necking onset → forma provino + regolare  
 → Triassialità + bassa → Curva Mises + vicina a true Expon.  
 → propagazione + lenta / impedita

# VERIFICA SPERIMENTALE STATICA / DINAMICA MATERIALE "PC-A"

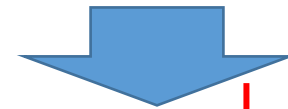
Curve True – Mises & Propagazione in Statica - Dinamica



- **Dinamica** → Ritarda Necking diffuso → forma provino + regolare → Triassialità bassa



- Curva Mises + vicina a Curva True Esponenz. Din.



| < |



- "Vantaggio"  $\frac{\partial \sigma_{Eq}}{\partial \epsilon} > \sigma_{Eq}$  + basso



- **Propagazione ridotta (Assente se fratt. progressiva)**

Lotto materiale	Aspect ratio provini w/t, L/w	Statica	Dinamica
PC-SP6	1.25, 7.5	$(5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1})$	$(15 \text{ s}^{-1})$

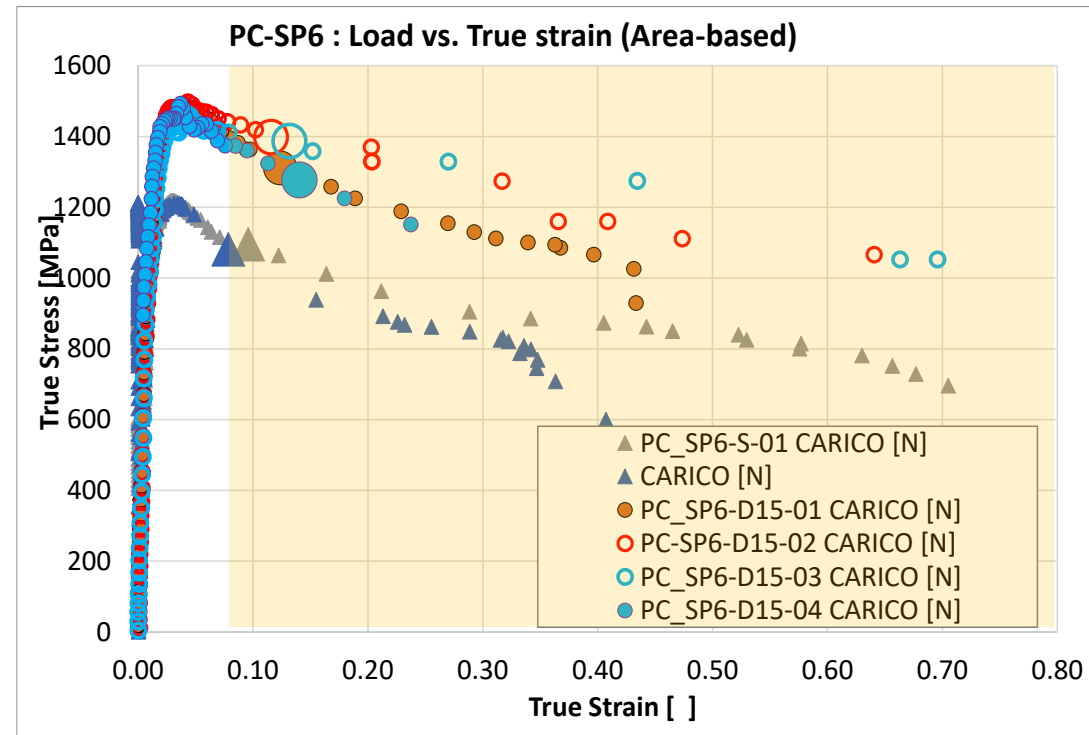
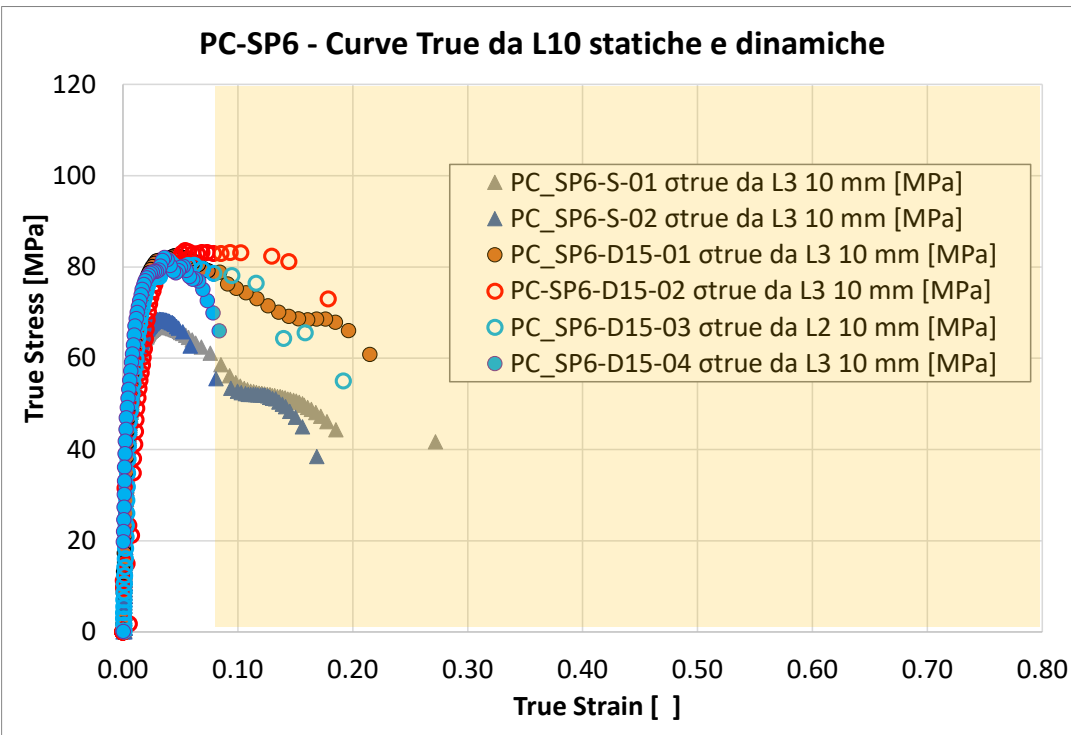
## INDICAZIONI PRELIMINARI DI COMPORTAMENTO FRAGILE :

- GEOM PROVINI. X “UNIASSIALITA’ ESTESA” (SEZ. QUASI QUADRATE & SNELLEZZA) → X ALLUNGARE VITA PROVINO ??
- PROVE STATICHE & DINAMICHE
- STRESS – STRAIN AREA-BASED & LENGTH-BASED X CHECK CARICO COSTANTE – CURVA TRUE ESPONENZIALE
- ANDAMENTI STRAIN AREA-VS-LENGTH PER CHECK LOCALIZZAZIONE - PROPAGAZIONE

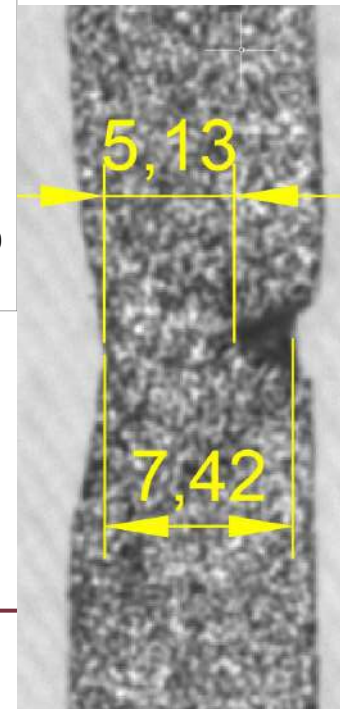
# VERIFICA SPERIMENTALE STATICA E DINAMICA MATERIALE “PC-SP6”



- “PC-Sp6” Length-based true cruves (Stat. & Dyn.)



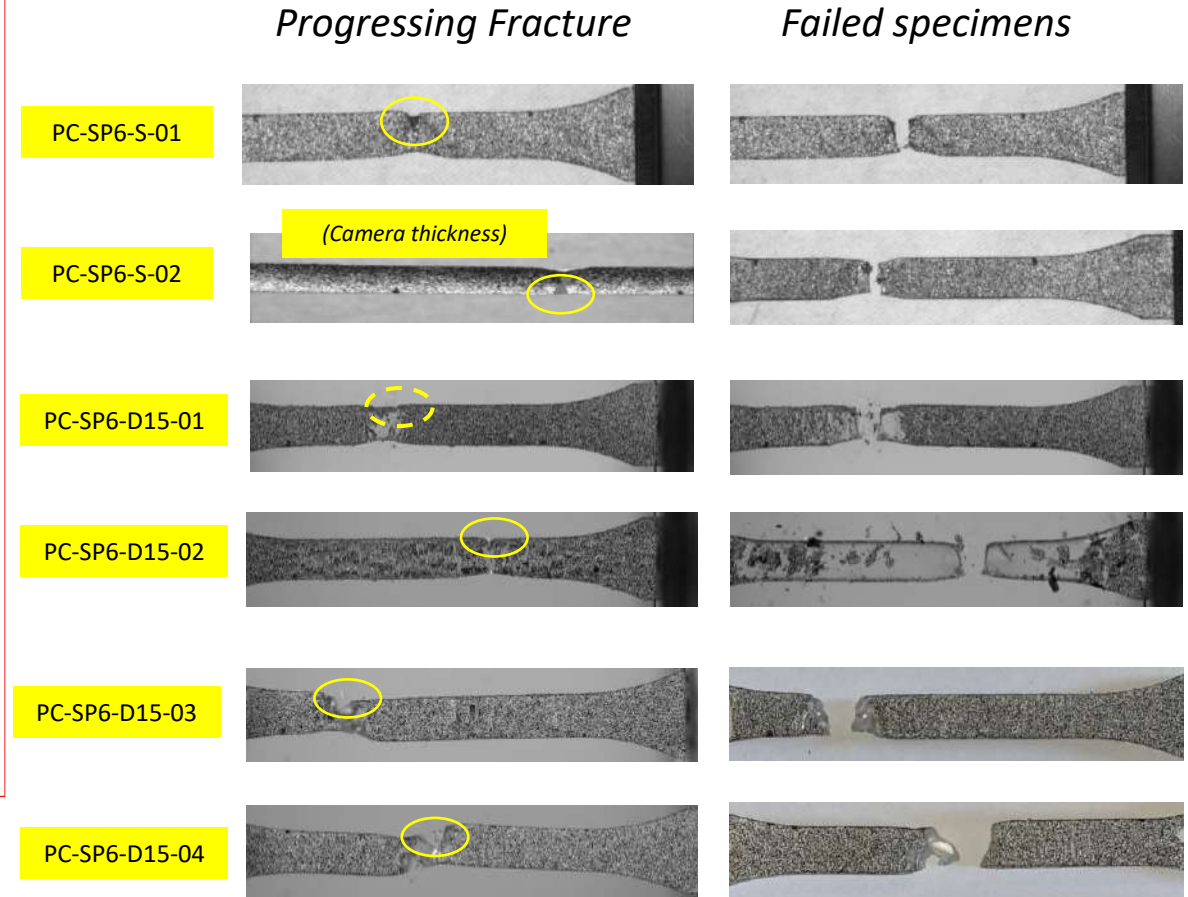
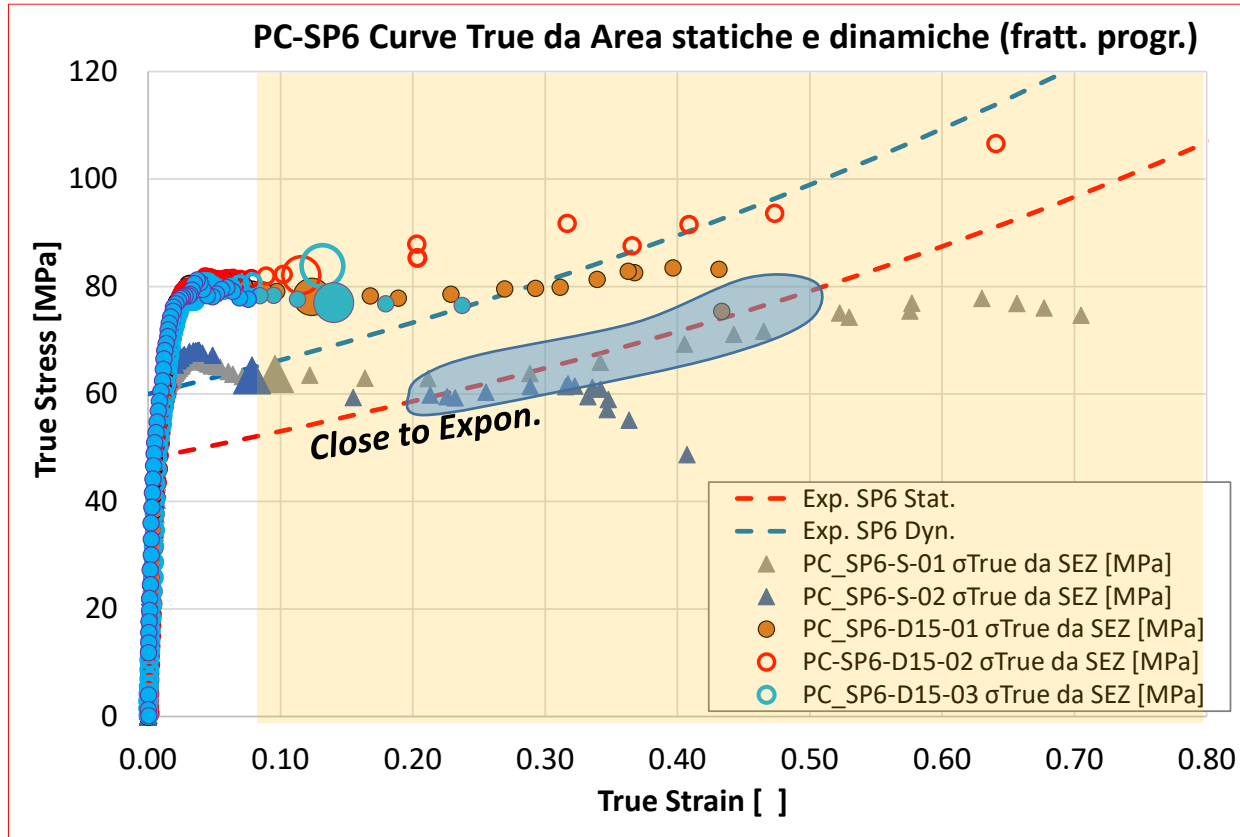
Frattura locale progressiva → carico non rimane costante (decrece) → Curva true non Esponenziale → stress - strain area-based: sottostimati “lordi” & sovrastimati “dentro cricca”:



# VERIFICA SPERIMENTALE STATICA E DINAMICA MATERIALE “PC-SP6”

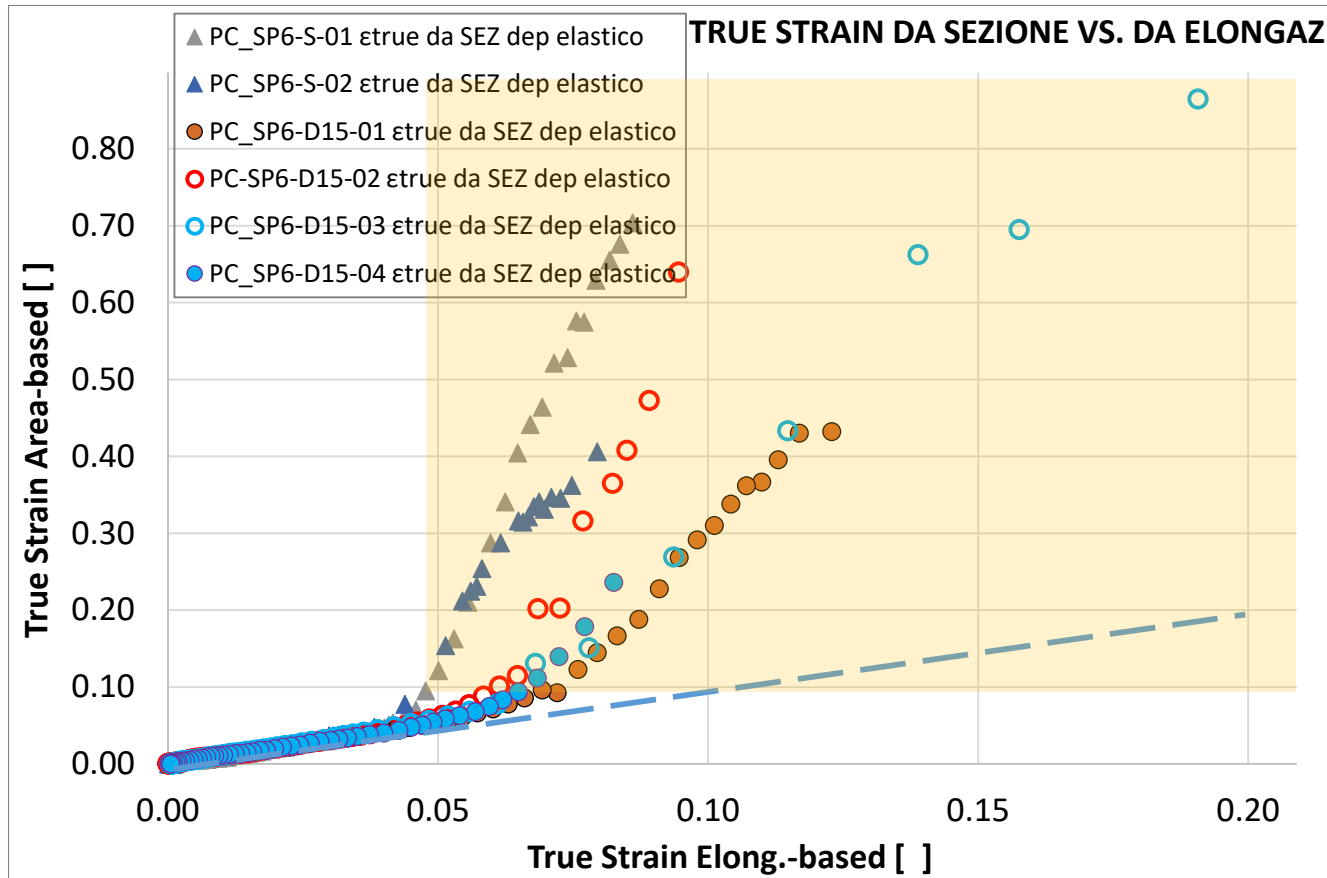


- “PC-Sp6” Area-based true cruves (Stat. & Dyn.)



- Frattura progressiva (Camera front / side solo x statiche)
- Propagazione ridotta → **No True Expon.** (causa frattura progressiva ???)

- "...



- Frattura progressiva → impossibilità misure stress & strain
- meccanismo localizzazione / propagazione manca per via della frattura locale oppure è caratteristica del singolo lotto di materiale ???
- Provini molto flat ( $w/t > 5$ ) dovrebbe ulteriormente anticipare ulteriorm. frattura, check ???

# CONCLUSIONI



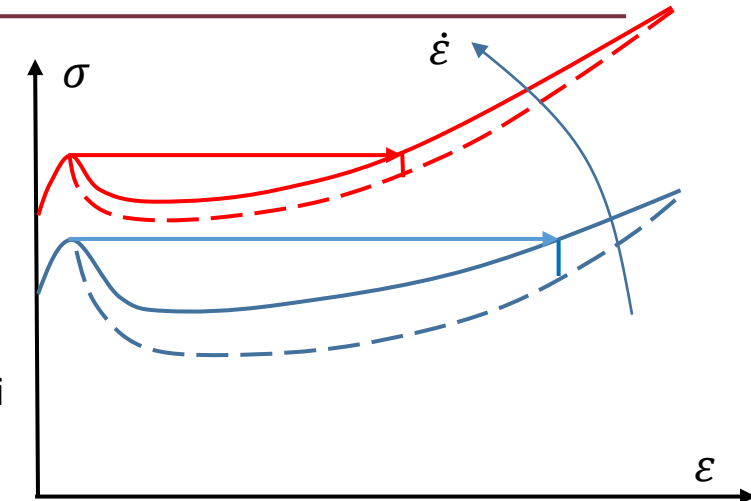
1) Curve True = Picco postyield & Esponenziale  $\sigma_{Peak} = \sigma_{yield} \cdot e^{\varepsilon_{True}}$  ( genera  $\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = \sigma$  )

2) Curva Mises = True “abbassata” tra picco e rottura x triassialità (Reverse Eng. ??)

3) Abbassamento Mises –True genera  $\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} > \sigma$  e permette propagazione da dopo  $2^{nd}$   $\sigma_{Peak}$  in poi

4) Strain rate anticipa  $2^{nd}$   $\sigma_{Peak}$  e reduce vantaggio  $\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} > \sigma \rightarrow$  anticipa transiz. ma rallenta / impedisce progresso della propagaz.

5) Lotto mater. PC-Sp6 ha frattura fragile interrompe meccanismo propagazione / carico costante / curva true Esponenziale etc. etc.



## NEXT STEP

Conversione Mises –True : determinazione one-shot invece che iterativa ??

Identificazione modello danno & frattura