



ISSN: 2230-9926

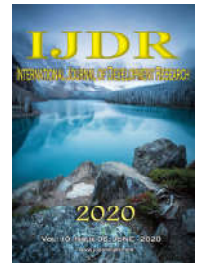
Available online at <http://www.journalijdr.com>

IJDR

International Journal of Development Research

Vol. 10, Issue, 06, pp. 36659-36668, June, 2020

<https://doi.org/10.37118/ijdr.19089.06.2020>



RESEARCH ARTICLE

OPEN ACCESS

UN MODELO PARA PREVISIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL ACERO SAE 1020

*¹José Luiz Fernandes, ²Marcelo de Jesus Rodrigues da Nóbrega and ³Andréa S. C. Fernandes

¹Post-Doctorado en el Ingeniería. Depart. de Ingeniería de Producción - CEFET / RJ, Río de Janeiro, RJ, Brasil; ²Post-Doctorado en el Ingeniería. Depart. de Ingeniería Civil - CEFET / RJ, UNIGAMA e USU, Río de Janeiro, RJ, Brasil; ³Maestría en Ciencias. Depart. de Ingeniería Civil - CEFET / RJ, Río de Janeiro, RJ, Brasil

ARTICLE INFO

Article History:

Received 03rd March, 2020

Received in revised form

07th April, 2020

Accepted 19th May, 2020

Published online 25th June, 2020

Key Words:

Modeling, Tensile and mechanical behavior of materials.

*Corresponding author: José Luiz Fernandes

ABSTRACT

The knowledge of the mechanical behavior and metallic materials when subjected to unconventional situations which involve shear rates is still largely unexplored in the literature in general. One reason for this lack of knowledge is, in fact, the difficulty of implementation and standardization of mechanical experiments with machines that are able to monitor and supervise their implementation throughout the trial, to obtain reliable properties and subsidies providing material correct modeling. This paper presents a method for applying a simplified and consistent mathematical model, based on the fundamental mechanical properties obtained in the Johnson-Cook tensile test. The modeling procedure is validated in experiments deformation traction control rates compared with traditional Johnson-Cook equation. The modeling procedure is valid from randomized controlled traction in SAE 1020 steel.

Copyright © 2020, José Luiz Fernandes et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Citation: José Luiz Fernandes, Marcelo de Jesus Rodrigues da Nóbrega and Andréa S. C. Fernandes. 2020. "Un modelo para previsión del comportamiento dinámico del acero sae 1020", International Journal of Development Research, 10, (06), 36659-36668.

INTRODUCTION

National Research Council publicó en 1978 un importante documento a respecto de la "respuesta de metales y estructuras metálicas a la carga dinámica", que trata de aspectos relevantes al comportamiento de materiales de ingeniería cuando son sometidos a cargas cíclicas de manera general y sus aplicaciones: altas tasas de deformación, respuesta de los materiales, aspectos metalúrgicos y similitud constitutiva. Entre las recomendaciones y conclusiones son las siguientes:

- Existen ecuaciones y datos disponibles, pero no confiables para predecir la respuesta de los materiales plásticos, especialmente en situaciones de descarga y recarga. Además, hay una fuerte necesidad de un análisis dinámico adicional para acompañar ensayos a altas tasas de deformación.
- El desarrollo de la estructura de la escala se ha aplicado debido a los costos y el tiempo de la prueba reducida. Sin embargo, el entendimiento de cómo las fallas ocurren, en función de la geometría y del material, aun es necesario. La dificultad en la obtención de la similitud completa se destaca, es

decir, la similitud geométrica, cinemática, dinámica y constitutiva. En algunos casos, el material en estudio puede tener una moderada alta resistencia y el análisis puede no ser limitado al periodo de comportamiento elástico lineal, puede ser extendido al tratamiento del comportamiento elasto-plástico.

- La estandarización de los métodos y pruebas para medir el comportamiento de la curva tensión versus deformación a altas tasas de deformación, se debe considerar antes de que los datos sean usados en la aplicación del proyecto.

Por lo tanto, existe una preocupación desde hace mucho tiempo en relación con el comportamiento mecánico del material en situaciones de impacto. Consecuentemente el estudio y modelaje del comportamiento mecánico del material tienen un papel clave para otros estudios y aplicaciones, tales como: simulaciones de estructuras, predecir cómo el material se comporta dinámicamente y sobre todo la previsión del comportamiento mecánico del material en relación a sus propiedades mecánicas. En varios estudios recientes sobre el impacto estructural, se utilizan diferentes modelos para describir de forma confiable, el comportamiento mecánico de estos sobre la condición de colisión, actualmente el modelo más utilizado es de JOHNSON-COOK, según JONES (1997)

y explorado en este trabajo, tanto en la naturaleza experimental funciona, como las empleadas en la simulación numérica, especialmente involucrando el método de elementos finitos (AVES FILHO, 2002). Para tener una idea de la potencia de sus aplicaciones se toma, por ejemplo, algunos estudios experimentales y de simulación desarrollados por CHEN et al (2004), que se refieren al comportamiento mecánico en una prueba de colisión (Crash Test), en que se fue comprobado que las tasas de deformación implicadas en una colisión vehicular varían en función de la posición (geometría del vehículo) y en el instante considerado de tiempo, alcanzando valores de 500 a 1000 s⁻¹. En las secciones centrales de un vehículo, las tasas de deformación son alrededor de 10 s⁻¹ orden mientras que las regiones traseras alcanzan aproximadamente 0,10 s⁻¹, y señaló también que las nuevas leyes de comportamiento mecánico del material deben ser desarrolladas para describir esta dependencia de la tasa de deformación. La Figura 1 muestra el comportamiento de la tensión sobre la deformación impuesta al material en diferentes tasas de deformación. Se nota un aumento de las propiedades mecánicas como la tensión de escapamento, tensión de resistencia y tensión de ruptura con mayores tasas de deformaciones. A pesar de que se puede realizar a tasas más altas, del orden de 300 s⁻¹, no se estableció un sistema para la selección de tasas de deformación, es decir, los valores no múltiplos entre sí, no fueron mostrados claramente, la relación entre ellas, como se discutirá más adelante en este artículo.

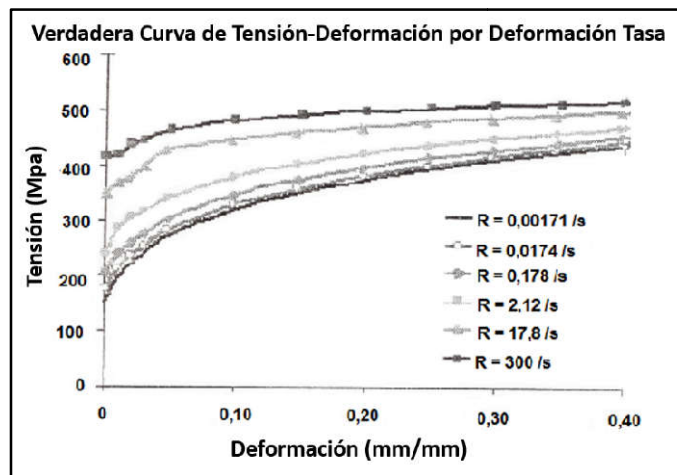


Figura 1. Curva real de tensión versus deformación para un acero de mediano carbono CHEN et al (2004)

EL ENSAYO UNIAXIAL DE TRACCIÓN

El material elegido: El material seleccionado para la preparación de las muestras fue el acero SAE 1020. Debido a las variaciones existentes en la composición química permitida por las normas y para comprobar la exactitud del material se realizó un análisis químico. La Tabla 1 muestra los valores medios de porcentaje obtenidos para los elementos principales, y se comparan con valores aceptables por norma.

Tabla 1. Valores medios de los principales elementos químicos (acero SAE 1020)

Elemento químico	C	S	Mn	Si	P
Valor obtenido	0,225	0,022	0,489	0,143	0,023
Patrón de valor	0,18 – 0,23	0,050 máximo	0,30 – 0,60	0,60 máximo	0,040 máximo

Fabricación de los cuerpos de prueba: El correcto entendimiento del comportamiento mecánico de un

determinado material depende sensiblemente del conocimiento de varios factores, tales como: aspecto de la microestructura presente, tratamiento térmico o termo-químico, secuencia del proceso de fabricación al cual fue sometido, composición química, estado de tensión y de deformaciones anteriores (histórico de carga), cargas debidas a las condiciones de funcionamiento (cargas alternas y / o constantes, gradientes de temperatura, etc.). Tomando esas consideraciones, los CP's fueron retirados de una misma barra, es decir, se trató de eliminar la influencia relacionada a la variación de la composición química del material, así como otros factores descritos anteriormente. Otro factor importante en la obtención de resultados confiables es la fabricación de cuerpos de prueba (CP), es necesario tener poca variación en sus dimensiones principales. Este trabajo la usina fue realizada por torno operado por control numérico computadorizado (CNC) que permitió variaciones geométricas del orden de 2%, teniendo así un total de 9 CP's con un promedio obtenido a partir de la ecuación [1] de 9,04 mm y el desvío - estándar obtenido a partir de la ecuación [2] de 0,12 mm, suponiendo un intervalo de confianza del 95% como MONTGOMERY, HUBELE y RUNGER (2004). Es de destacar que en el estudio se empleó sólo 3 CP's porque había problemas operacionales para la regulación y la ejecución de los ensayos más rápidos.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \dots\dots\dots(1)$$

\bar{X} - Valor medio (mm)
 X_i - Valor individual del diámetro de cada uno de los CPs (mm)
 n - Número de mediciones

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)}} \dots\dots\dots(2)$$

Los CP's fueron confeccionados geoméricamente a partir de los criterios establecidos por la normativa ASTM E 08-M. Sigue la continuación, en la Figura 2 las muestras de acuerdo con ASTM mencionados.

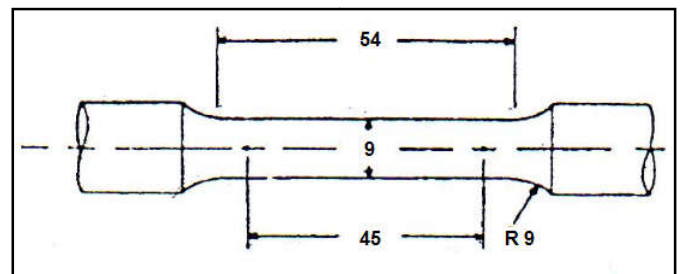


Figura 2. Cuerpo de prueba según la normativa ASTM

Estrategias de Control del Ensayo de Tracción

El material en estudio fue sometido a las siguientes estrategias de control (Figura 3):

- a. Tasa de deformación (expresada en %/s): obtenida por el control vía clip gage

- b. Velocidad del pistón (expresada en mm/s): controlando los movimientos del pistón

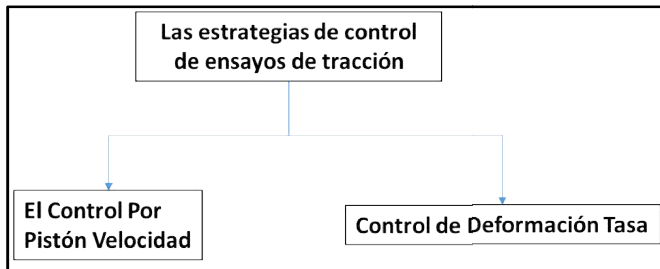


Figura 3. Estrategias de Control de los Ensayos de Tracción

La Figura 4 ilustra la máquina servo-hidráulica de ensayo de tracción instron 8504, el detalle del clip gage y el sistema computadorizado de control.

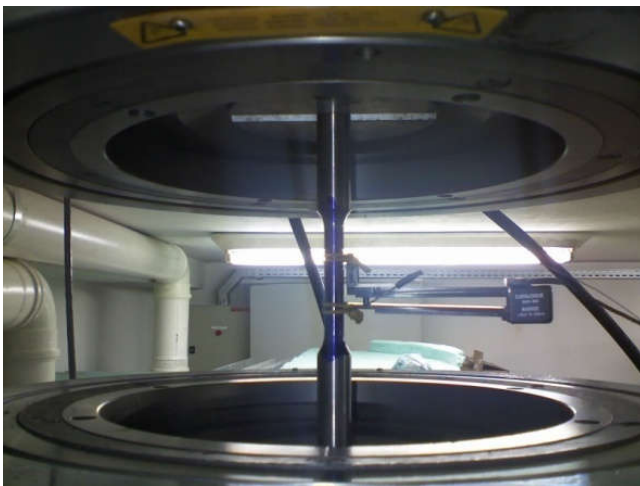
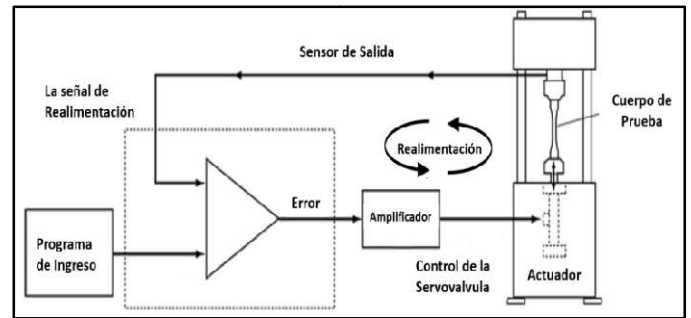


Figura 4. Máquina de prueba de Tracción – Modelo Instron 8504 y detalle del sistema clip gage. Laboratorio de Ensayos Mecánicos del Instituto Tecnológico de la Pontificia Universidad Católica do Rio de Janeiro (ITUC)

El sistema de control de la máquina de tracción tipo servo-hidráulica es presentado en la Figura 5, conforme ASM HANDBOOK (2000). A partir de los datos de entrada utilizados en el programa, la señal de control entra en una puerta que compara la señal de control con la señal de realimentación, generando de ese modo una señal de error que se amplifica a continuación, para ser la entrada en la servoválvula y de nuevo actúa enviando fluido al actuador. El

control se realiza a través del clip gage o la velocidad medida en el pistón.



Fonte: Adaptado de ASM HANDBOOK (2000)

Figura 5. Esquema básico de control de una máquina servo-hidráulica

La Norma de la Asociación Brasileira de Normas técnicas (ABNT) NBR 6892 de 2002 establece criterios para la realización de ensayos de acuerdo con los siguientes parámetros: velocidad de tensionamiento que lleva en consideración el módulo de elasticidad (E) y la velocidad de la deformación que debe estar entre el rango establecido de 0,00025 e 0,0025 s⁻¹, siendo este último transcrito de la siguiente manera:

“Se solamente la tensión de escoamiento inferior este siendo determinada, la velocidad de deformación durante el escoamiento de la longitud paralela del cuerpo de prueba debe estar entre 0,00025/s y 0,0025/s. La velocidad de deformación de la longitud paralela debe ser mantenida lo más constante posible. Si esta velocidad no puede ser regulada directamente, ella deberá ser fijada regulando la velocidad de tensionamiento poco antes del inicio del escoamiento. Esta regulación no podrá ser alterada hasta que el escoamiento termine.” Fuente: Norma da ABNT (NBR 6892 de 2002)

Por lo tanto se torna obvia la no preocupación de la norma arriba descrita con relación al efecto de la tasa de deformación actuante en el CP (definida como $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$) que

nomenciona estrategias de control para este parámetro en el comportamiento mecánico de los materiales. La Tabla 2 muestra el rango de velocidad de tensionamiento en función del módulo de elasticidad del material (E).

Tabla 2. Velocidad de tensionamiento

Módulo de elasticidad (E) – N/mm ²	Velocidad de tensionamiento - N/mm ² .s ⁻¹	
	Mínimo	Máximo
E < 150.000	2	10
E ≥ 150.000	6	30

Fuente: NBR 6892 de 2002 da ABNT

El comportamiento de la deformación con el tiempo debe ser mantenido constante. En este caso es preservada la relación $\frac{d\epsilon}{dt}$ constante. Esta deformación representa esencialmente el comportamiento del CP e no del conjunto CP-máquina de prueba, conforme DIETER (1989). La tabla 3 presenta la descripción de los tipos de ensayos mecánicos en función de la tasa de deformación, que tiene una primera división en dos clases: tasas de deformación menores que 5 s⁻¹ y aquellas con tasas mayores que 5 s⁻¹. Para el primer caso las fuerzas de

inercias s3ndespreciadas. Sin embargo, para las mayores tasas, empieza a existir el efecto de las fuerzas inerciales debido al fenómeno de la propagaci3n de ondas. En altas tasas son comunes los ensayos de: anillos de expansi3n, barra de Hopkinson y el teste de Taylor. Para las tasas menores y/o intermediarias son comunes las pruebas en máquinas hidráulicas, servo-hidráulicas, neumáticas, conforme MEYERS (1994) donde es posible obtener mayores detalles sobre estas técnicas y los equipamientos disponibles.

tipo *Drop Wright* que resultó cerca de 600 J a una velocidad de 5,5 m/s, produciendo tasas de deformaciones realmente dinámicas. Recientes estudios desarrollados por Yuet al (2009) presentan un modelo constitutivo para describir el comportamiento mecánico de un material específico nombrado Acero Dual Phase 600 (DP600), que proporciona gran aplicaci3n en ambientes automotivos. Se realizaron experimentos en aparatos no padronizados para obtener curvas de tensi3n versus deformaci3n en tasas que varían de 10^{-2} hasta

Tabla 3. Clasificaci3n de las técnicas de prueba de acuerdo con la tasa de deformaci3n, adaptado de MEYERS (1994)

	MÉTODOS DE PRUEBAS COMUNES	CONSIDERACIONES DINÁMICAS	
TAXA DE DEFORMAÇÃO (s ⁻¹) 10 ⁷ 10 ⁶ 10 ⁵ 10 ⁴ 10 ³ 10 ² 10 ¹ 10 ⁰ 10 ⁻¹ 10 ⁻² 10 ⁻³ 10 ⁻⁴ 10 ⁻⁵ 10 ⁻⁶ 10 ⁻⁷ 10 ⁻⁸ 10 ⁻⁹	ALTA VELOCIDAD DE IMPACTO - Explosivos - Impacto de la placa normal - Laser pulsado - Chapa explotando	PROPAGACI3N DE ONDAS DE CHOQUE	FUERZAS INERCIALES SON IMPORTANTES
	DINAMICA ALTA - Teste de Taylor - Barra de Hopkinson - Anillo de Expansi3n	PROPAGACI3N DE ONDAS DE CISALLAMIENTO	
	DINAMICA BAJA - Máquinas de hidráulica o neumática de alta velocidad.	PROPAGACI3N DE ONDAS PLÁSTICAS	
	CASI ESTÁTICO - Máquinas hidráulicas, servo-hidráulicas o de tornillo.	LA RESONANCIA MECANICA EN EL CUERPO DE PRUEBA Y EN LA MAQUINA ES IMPORTANTE	LAS FUERZAS DE INERCIA NO SE CONSIDERAN
	FLUENCIA Y RELAJAMIENTO DE TENSIONES - Máquinas convencionales de prueba - Prueba de fluencia	TESTE COM VELOCIDADE DO TRAVESSÃO SUPERIOR CONSTANTE	
		RESPUESTA VISCO-PLASTICA DE LOS METALES	

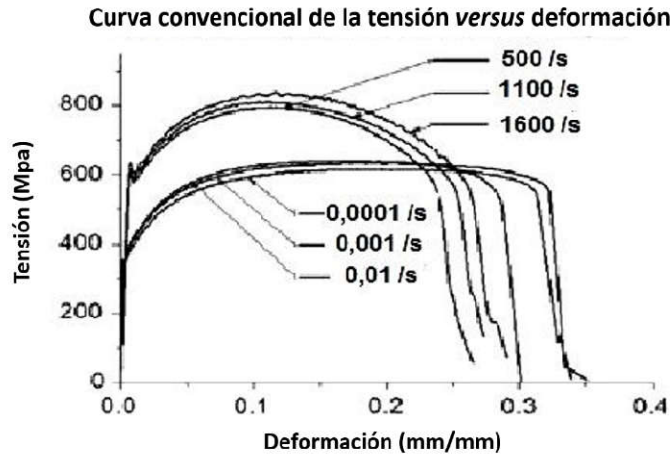
En YAMAKAMA (2007) se estudia la influencia de la tasa de carga en el comportamiento del flujo (escoamiento) y fractura de algunos plásticos tales como ABS (acrilonitrilo butadieno estireno). Como dice el texto del autor:

“La influencia de la velocidad de ensayos en las propiedades mecánicas en ensayos de tracci3n es un tema poco explorado, a pesar de su gran importancia en aplicaciones científicas y tecnológicas. Los ensayos de impacto sobre tracci3n, en otras palabras, sobre carga dinámica, se viene mostrando una importante herramienta en los estudios del aumento de la tenacidad, porque permite el estudio del comportamiento de los materiales a altísimas tasas de deformaci3n y su correlaci3n con ensayos casi-estáticos de tracci3n.”

Aún en este trabajo el autor utiliza un dispositivo de impacto que proporciona apenas 4j de energía y a una velocidad de 2,9 m/s. En NÓBREGA (2010) el dispositivo seleccionado fue del

1600 s⁻¹, como se ve en la Figura 6. Sin embargo, en estos trabajos son empleados cuerpos de prueba (CP's) de diferentes tamaños para estudiar el efecto de la tasa de deformaci3n y no estableciendo una variaci3n padr3n de la tasa de deformaci3n, además de considerarse la deformaci3n obteniendo como referencia la velocidad del desplazamiento. Conforme Silva y Mei (2006) debe ser empleado el mismo CP para la evaluaci3n correcta e las deformaciones y sus respectivas tasas.

Modelos Mecánicos De Materiales: La ecuaci3n [3] que modela el comportamiento mecánico dinámico de diversos materiales es normalmente utilizada como principal referencia en trabajos académicos y técnicos en estudios que comprenden el fenómeno del impacto estructural, entre ellos se puede citar: OSHIRO (2004), ALVES E JONES (2002) y otros. La ecuaci3n [3] tiene como parámetros principales las siguientes variables: la deformaci3n, a tasa de deformaci3n y la temperatura, siendo escrita a seguir.



Fuente: Adaptado de YU *et al* (2009)

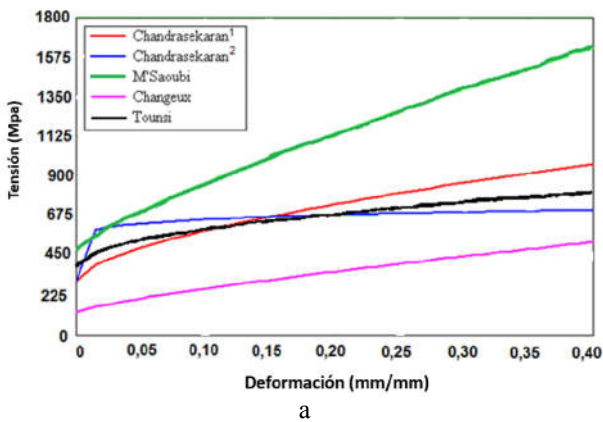
Figura 6. Curva convencional de latensiónversus deformación

Tabla 4. Acero AISI 316L constantes constitutivos y variaciones máximas

Referencia	A	B	C	n'	m	$\dot{\epsilon}_0$
Chandrasekaran <i>et al</i> ¹	305	1161	0,01	0,61	0,517	1
Chandrasekaran <i>et al</i> ²	305	441	0,057	0,1	1,041	1
M'Saoubi (1998)	301	301	0,09	0,807	0,623	0,001
Changeux (2001)	280	280	0,1	0,8	0,85	200
Tounsi (2002)	514	514	0,042	0,508	0,533	0,001
variación máxima	40 %	76%	58%	87%	50%	-

Fuente: Adaptado de OUTEIRO, UMBRELLO e SAOUBI (2007).

Curvas reales de la Tensión versus Deformación para los modelos en estudio



Diferencia entre los modelos M'Saoubi y Changeux

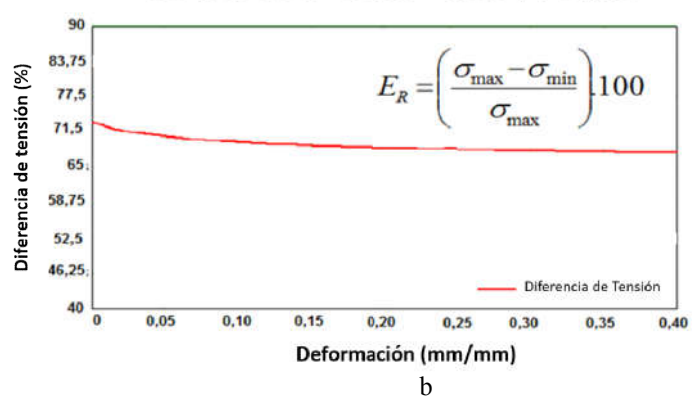


Figura 7. Curvas reales de la Tensiónversus Deformación para el acero AISI 316 L y la variación de propiedades a lo largo de la deformación

$$\sigma = (A + B \cdot \dot{\epsilon}^n) \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left[1 - (T^*)^m \right] \dots\dots\dots(3)$$

En la cual A , B , C , n' , m' son parámetros experimentales, T^* es la temperatura característica (que depende de la temperatura ambiente y de la temperatura de fusión del material) y $\dot{\epsilon}_0$ es una tasa de deformación de referencia. Recientemente OUTEIRO, UMBRELLO y SAOUBI (2007) estudiaron la influencia de las constantes constitutivas de la ecuación [3] del acero inoxidable AISI 316L para predecir las fuerzas de corte, tensiones residuales y temperatura en un tipo de usinaje do tipo torneamiento cilíndrico horizontal de acero. Las cinco constantes constituyentes del material (acero inoxidable AISI 316 L) se obtuvieron de otras referencias citadas en el cuerpo del artículo y mostrados en la Tabla 4.

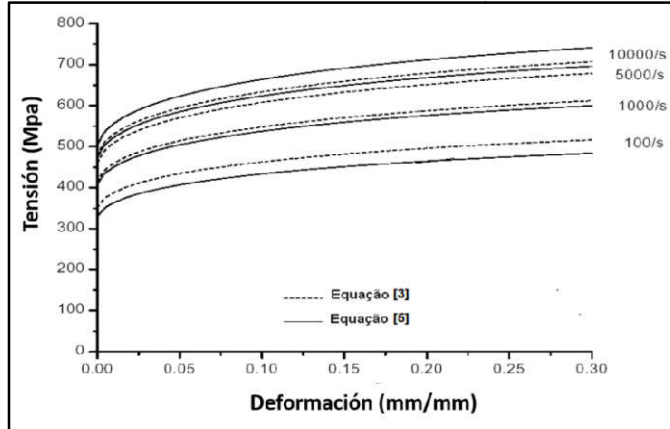
Analizando la tabla 3 se concluye que las constantes constitutivas tienen una variación del 40 al 87% en sus valores, lo que refuerza la necesidad de un procedimiento fiable y válido para realizar cualquier tipo de estudios relacionados con la obtención de propiedades mecánicas en situaciones dinámicas. En el modelo de Chandrasekharan se observó la presencia de un "codo" en la Figura 5, la tensión de aproximadamente 500 MPa, que no es típico del comportamiento mecánico del material y por lo tanto sería necesario hasta que una revisión de este modelo en otro estudio, que a su vez aumenta la necesidad de constantes del material que realmente describen el comportamiento mecánico. La Figura 7 (a) muestra la tensión versus deformación para cada uno de los modelos presentados en la Tabla 3, también se observaron inmensa variación en las propiedades mecánicas y que se calculó de acuerdo con la ecuación [4]. La Figura 7 (b) representa la variación de tensión

a lo largo de la deformación, en la que se nota una diferencia media de 67% teniendo en cuenta la diferencia entre los modelos M'Saoubi y Changeux. Así pues, se verifica una vez más que las constantes constituyentes influyen en gran parte el comportamiento mecánico del material en estudio, lo que impide cualquier estudio numérico más.

Según KANG et al (2004) un modelo modificado de la ecuación [3] fue propuesto para aplicaciones vehiculares en crashworthiness, es decir, los estudios de evaluación de la capacidad de absorción del material bajo condiciones de impacto como en ALVES (2009). También en Kang et al (2004), los autores afirman que el ajuste proporcionado por esta nueva ecuación [5] es más conveniente que la obtenida por la ecuación [3].

$$\sigma = (A + B \cdot \dot{\epsilon}^n) \cdot \left[1 + C_1 \cdot \ln \dot{\epsilon} + C_2 \cdot (\ln \dot{\epsilon})^2 \right] \cdot \left[1 - (T^*)^m \right] \dots (5)$$

Dado que las constantes de los materiales constitutivos se determinan de forma análoga a la ecuación [3] (Tabla 5). La Figura 8 muestra una comparación de los resultados obtenidos mediante el establecimiento de las dos ecuaciones, es decir, la ecuación original y su expresión modificada. Tenga en cuenta que en este estudio, los autores añaden una constante constitutiva del material (C₂), además de introducir otra no linealidad en la parte relacionada al logaritmo. Por lo tanto, es un modelo matemáticamente más complejo y difícil de configurar las constantes.



Fonte: Adaptado de KANG et al (2004).

Figura 8. Diagrama tensión versus deformación

Tabla 5. Constantes Constitutivas para los materiales ensayados

Constante	Material 1	Material 2	Material 3
A (MPa)	208	214	221
B (MPa)	350	433	483
n'	0,48	0,45	0,43
C	0,14	0,15	0,13
C ₁	0,08	0,09	0,07
C ₂	0,0065	0,0084	0,0072
m'	0,31	0,25	0,26

Particularidades da ecuación tradicional de johnson-cook

La ecuación [3] para una temperatura constante T durante toda la deformación de um escenario de impacto se convierte, por lo tanto, en una ecuación simplificada [6]:

$$\sigma = (A + B \cdot \dot{\epsilon}^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \dots (6)$$

Sin embargo, es muy común ser de interés en el impacto de estructuras tasas de deformación variando a lo largo del propio impacto, y esta variación es de modo temporal y también espacial. Estas variaciones dependerán de varios factores, tales como, principalmente: la energía de impacto, de masas de impacto, la geometría, los materiales y la velocidad de impacto. Por lo tanto, es interesante desde un punto de vista computacional e incluso algebraico tener una ecuación más compacta y "unificada" para el tratamiento del fenómeno de impacto. Fueron dibujadas las curvas de comportamiento mecánico de los materiales enumerados en la table 5, dependiendo de la deformación, tensión y de la tasa de deformación, de acuerdo con la ecuación [3] para evaluar cualitativamente en primer lugar su apariencia.

Tabla 6. Constantes constitutivas para materiales en estudio

Material	A(MPa)	B(MPa)	n'	C
Bronze	112	505	0,42	0,009
Níquel 200	163	648	0,33	0,006
AceroSAE 1006	350	275	0,36	0,022
Aluminio 2024-T351	265	426	0,34	0,015
Aluminio 7039	337	343	0,41	0,010
AceroSAE - 4340	792	510	0,26	0,014
Acero herramienta S-7	1539	477	0,18	0,012
Liga de tungstênio (0,07 Ni y 0,03 Fe)	1506	177	0,12	0,016

Analizando las figuras se puede concluir que existe un comportamiento bastante similar, aunque sean dependientes, en cada una de ellas, de 4 constantes constitutivas y el rango de deformación, tensión y tasas de deformación (Figura 9). Por lo tanto, se inició con la premisa de que existe un comportamiento "unificado" de los materiales. De acuerdo con ello se seleccionaron 8 materiales diferentes, sometidos a 6 tasas de deformación también diferentes, así (que van desde 0,00002 a 2 s-1), donde se ven muchos escenarios de impacto de manera general.

Procedimiento Desarrollado

El procedimiento desarrollado se llevó a cabo a partir de la suposición de que hay un comportamiento "unificado" de materiales metálicos en relación a la tasa de deformación. En general, es analizar si un modelo matemático puede describir el comportamiento mecánico del material a una determinada tasa de deformación (que dispone hasta sólo unos pocos ensayos de tracción con control de tasa de deformación) y levantarse las otras. Desde la primera ecuación ajustada, se puede estimar las demás por un factor de forma característico del material, como se discute en detalle en NÓBREGA (2010) y se ilustra esquemáticamente en la Figura 11. La implementación computacional se logró utilizando el programa comercial MathCad 13. (NITZ y GALGA, 2003). Inicialmente se seleccionaron ocho materiales de ingeniería, con grandes aplicaciones en diversos campos de la ciencia y de la tecnología actual, son: SAE 1006 acero; Acero SAE 4340; Acero para herramientas S7; latón; Aluminio 7239; Aluminio 2024 T351; De Liga de tungsteno (Ni 0,07 y 0,03 Fe) y níquel 200. Las tasas de deformación elegidas en este estudio (intervalo de 0,00002 a 2 s-1), o sea, 6 tasas de deformaciones equidistantes de 10 a 10, el mismo procedimiento es válido para otros rangos.

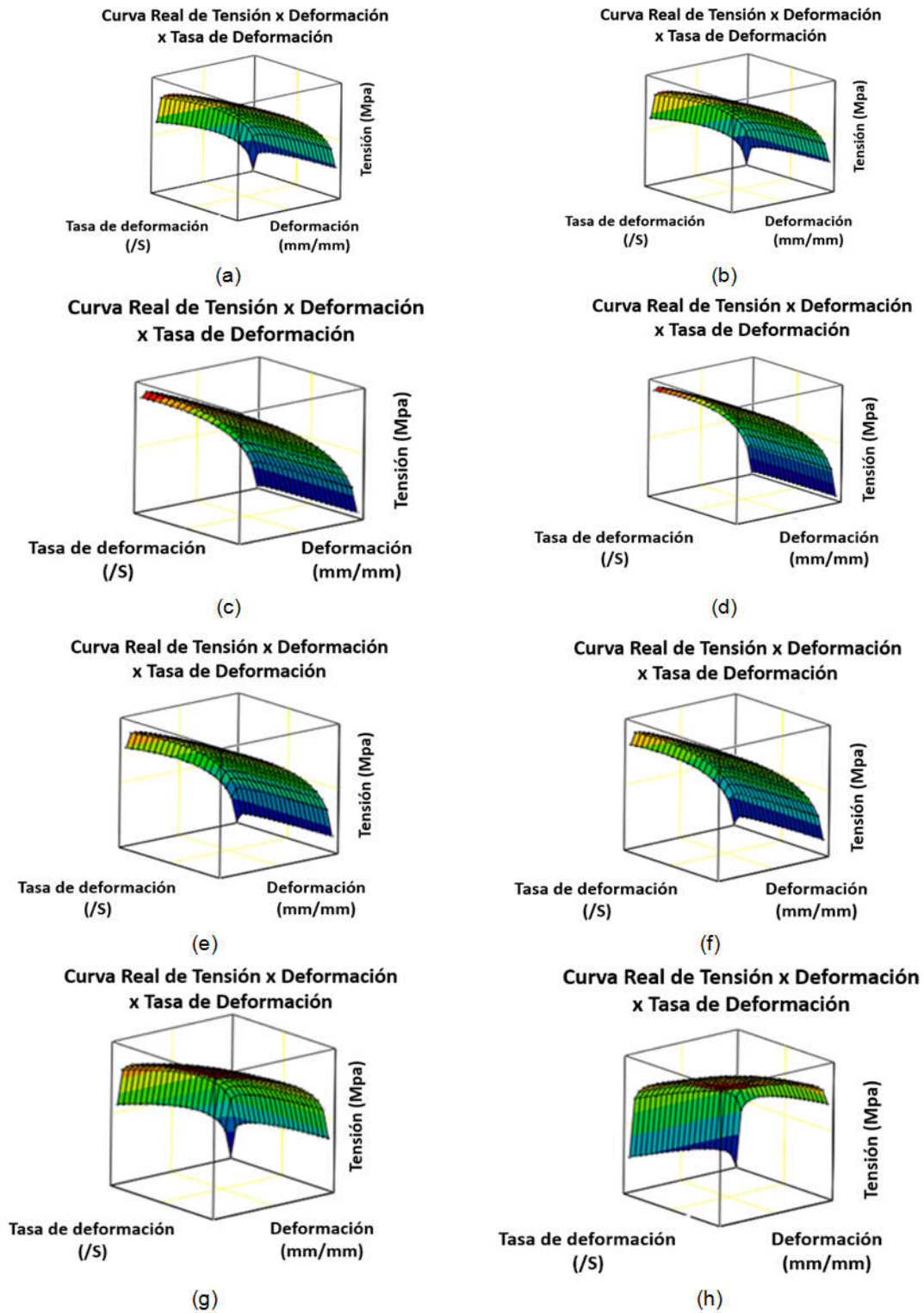


Figura 9. Interpretación del comportamiento mecánico de vários materiais, conforme JONES (1997). (a) Acero SAE 1006; (b) Acero SAE 4340; (c) Bronce; (d) Níquel; (e) Aluminio 2022; (f) Aluminio 7239; (g) Acero herramienta; (h) Liga de tungstênio

Los valores experimentales utilizados en este procedimiento fueron retirados de Jones (1997) y Tabla 6, y se utilizan ampliamente, por ejemplo, en la industria del automóvil, como Chen *et al* (2004). Los resultados se muestran para cada uno de los materiales empleados en el presente estudio, y al final de este tópico se muestra en una tabla de resumen. La secuencia de cálculo se muestra en la Figura 10.

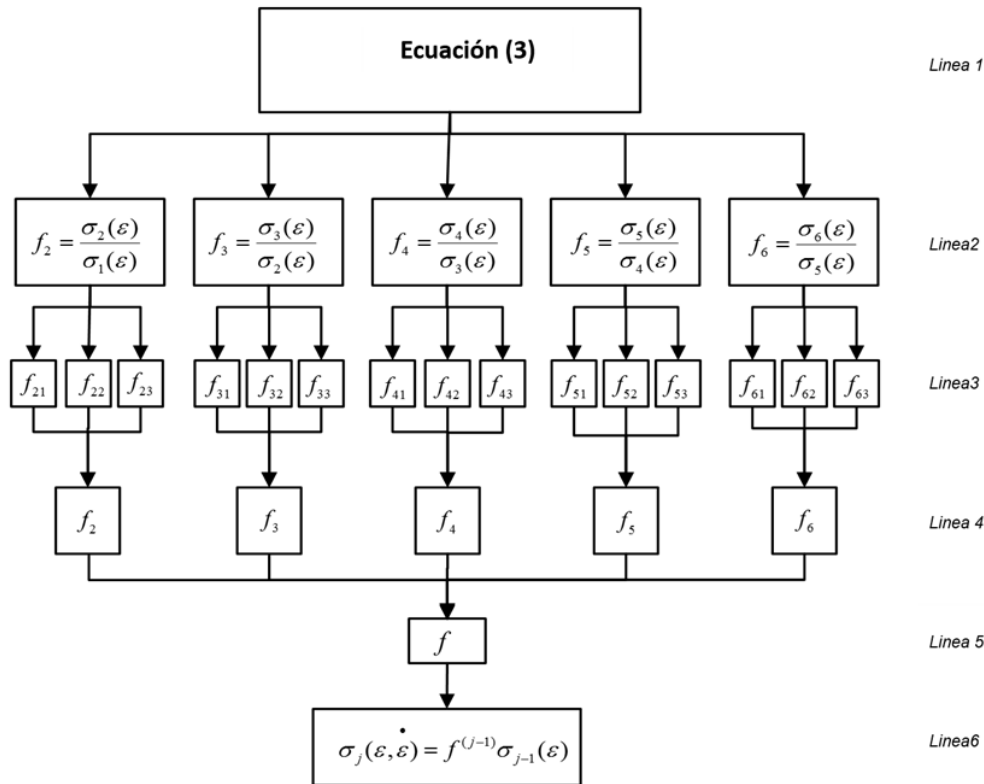
La primera operación en el diagrama de flujo es:

$$f_n = \frac{\sigma_{n+1}(\epsilon)}{\sigma_n(\epsilon)} \dots\dots\dots(7)$$

En la cual:

- $\sigma_j(\epsilon)$: Tensión obtenida a partir da la Tensión de referència (MPa)
- j : j-ésimo término da Tensión, variando de 2, 3...6
- i : n-ésimo término da Tensión, variando de 1, 3...6

Esta ecuación representa cual es el aumento de tensión (a una tasa $n + 1$) a respecto de la tasa n . En otras palabras, representa el aumento de tensión debido al aumento de la tasa de deformación.



Fonte: NOBREGA (2010)

Figura 10. Flujograma de secuencia de cálculos realizados no *Mathcad 13* para obtener la ecuación “unificada”

Se aprobaron 3 valores de tensión: $\varepsilon_{11} = 0,05$; $\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = 0,10$ y $0,15$, que representan los valores de deformación que se encuentran en la mayoría de los materiales estudiados, se muestran en la línea el cálculo de f decada tasa de deformación.

$$f_{n1} = \frac{\sigma_{n+1}(\varepsilon_1)}{\sigma_n(\varepsilon_1)} \quad f_{n2} = \frac{\sigma_{n+1}(\varepsilon_2)}{\sigma_n(\varepsilon_2)} \quad f_{n3} = \frac{\sigma_{n+1}(\varepsilon_3)}{\sigma_n(\varepsilon_3)} \quad (8)$$

Dado que el promedio calculado para cada línea 4, para cada tasa de deformación.

$$f_n = \sum_{m=1}^{n-3} \sum_{l=1}^{n-3} \frac{f_{nl}}{15} \quad (9)$$

A media final fue dada por [10] en la línea 5, representando a media de f para todas las seis tasas de deformación.

$$f_m = \sum_{n=2}^{n=6} \frac{f_n}{5} \quad (10)$$

En la línea 6 se obtiene por inducción matemática [11]:

$$\sigma_j(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = f^{(j-1)} \sigma_{j-1}(\varepsilon) \quad (11)$$

En la cual:

ε – deformación (m/m)

f – factor de forma para el material en estudio (adimensional)

Por lo tanto, la ecuación [11] es una ecuación "unificada" para todos los 8 materiales de ingeniería seleccionadas y e representa una manera simple y computacionalmente interesante para ser utilizada en las simulaciones que involucran impacto.

Tabla 7 muestra los valores de f para los materiales bajo estudio y su error máximo en el uso de esta ecuación. Se observa que el error máximo predicho por la metodología desarrollada es de 6% en el caso del aluminio 2024-T351 y del bronce, y el mínimo error de 0,8% para el caso da liga de tungsteno. El error del empleo de la ecuación [11] se hace con respecto a la ecuación [3] y se expresa por [12].

$$\gamma(\varepsilon) = 100 \frac{\left((A + B \cdot \varepsilon^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right) - f^{(j-1)} \sigma_1(\varepsilon) \right)}{(A + B \cdot \varepsilon^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right)} \quad (12)$$

En la cual:

$\gamma(\varepsilon)$: Error máximo de la ecuación [11] en relación a la ecuación [3]. (%)

Se concluye que para el grupo de materiales de la Tabla 7 en estudio, hay un factor de forma (f) y una ecuación "unificada" para describir el comportamiento mecánico dinámico de estos materiales, siendo posible su aplicación en una manera simple y confiable, y teniendo en vista el bajo error encontrado en cada uno de estos materiales para el rango de tasa de deformación en estudio, y su simplicidad matemática e inmediata aplicación computacional. Esta sistemática desarrollada para obtener el factor de forma (f) debe ser analizada para otros materiales de interés con el fin de obtener modelos seguros y conservativos. Es de destacar que en estos casos la ecuación [3] trabajó como una referencia, en lugar de los datos de prueba de tracción.

Tabla 7. Tabla de resumen de las Constantes constitutivas, factor de forma y error para cada material

Material	A (MPa)	B (MPa)	n'	C	Factor de forma f	Error máximo (%)
Bronze	112	505	0,42	0,009	1,042866	6,0
Níquel 200	163	648	0,33	0,006	1,030304	4,0
Acero SAE 1006	350	275	0,36	0,022	1,076373	5,5
Aluminio 2024-T351	265	426	0,34	0,015	1,063120	6,0
Aluminio 7039	337	343	0,41	0,010	1,031499	2,0
Acero SAE - 4340	792	510	0,26	0,014	1,046051	3,0
Aceroherramienta S-7	1539	477	0,18	0,012	1,035667	1,0
Liga de tungstênio (0,07 Ni e 0,03 Fe)	1506	177	0,12	0,016	1,044549	0,8

Fuente: Desarrollada en NÓBREGA (2010) ($0,00002 \leq \dot{\epsilon} \leq 2 \text{ s}^{-1}$).

Validación Del Modelo

Elegimos el acero SAE 1020 para la validación del modelo matemático, por ser un material sensible a la tasa de deformación a temperatura ambiente. Los datos de los ensayos de tracción se representaron gráficamente y presentaron los resultados ajustados por el modelo propuesto por NÓBREGA (2010). A partir de estos valores se calculó el comportamiento mecánico del material para tasas de 500 s⁻¹, siendo estos valores de especial interés en algunos escenarios de impacto estructural. También fue representada gráficamente la ecuación [3] para evaluar la calidad de ajuste. La figura 11 ilustra la buena calidad del ajuste obtenido para cada tipo de interés, combinado con la simplicidad del modelo propuesto por NÓBREGA (2010). Fue seleccionado el acero SAE 1020 para la validación del modelo matemático propuesto, por ser este material bien sensible a una tasa de deformación en temperatura ambiente. Los datos de los tests de tracción fueron simulados, y presentado los resultados ajustados por el modelo, propuesto por NÓBREGA (2010). A partir de estos valores fue estimado el comportamiento mecánico del material para tasas de 500 s⁻¹, siendo este valor de especiales intereses en algunos escenarios de impacto estructural. También fue simulada la ecuación [3] para ser evaluar la cualidad de ajuste. A figura 11 ilustra la buena calidad del ajuste obtenido para cada tasa de intereses, aliada a la simplicidad del modelo propuesto por NÓBREGA (2010).

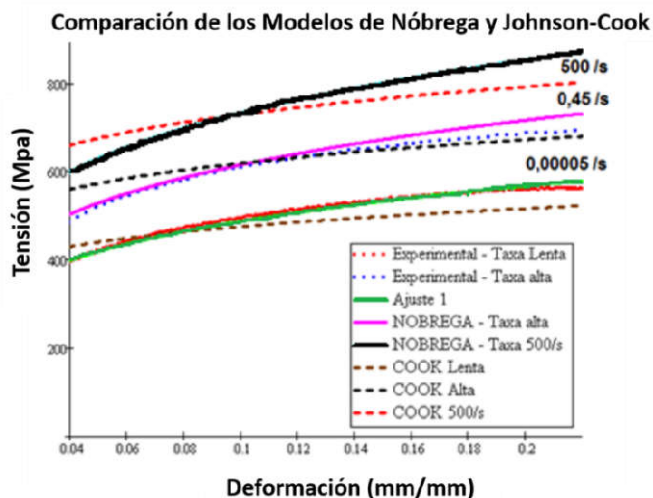


Figura 11. Ecuación de NÓBREGA (2010) y ecuación [3] para ensayos con control de tasa de deformación

Conclusión Y Trabajos Futuros

- Fue posible simular matemáticamente un material susceptible a la tasa de deformación a partir de

Tabla 6.

- El modelo de Johnson-Cook tiene buena calidad en el ajuste a los datos experimentales obtenidos por el control de la tasa de deformación, destacando la necesidad de 4 constantes constitutivas para este modelo.
- El modelo presentado por NÓBREGA (2010), que tiene sólo tres constantes constitutivas, es de fácil implementación computacional en Mathcad o Matlab, lo que permite simulaciones más rápidas y confiables. Es de destacar que el ajuste obtenido también es bueno para el material en estudio.
- El modelo desarrollado por NÓBREGA (2010) permite, desde unos pocos ensayos de tracción controlados por tasas de deformación, la predicción de comportamiento mecánico del material en condiciones aplicación práctica difícil y es extremadamente importante en el contexto de simulaciones que involucran el comportamiento mecánico dinámico de materiales de metálicos. De esta manera cumple con las expectativas de YAMAKAMA (2007) del *National Research Council* (1978).
- El trabajo futuro debe simular numéricamente una estructura (por ejemplo, un pórtico) para comparar los resultados finales de desplazamiento de los modelos basado en tasas de deformación, en lugar de los modelos obtenidos por la velocidad controlada del pistón.
- Otro trabajo a realizar y de gran interés es la simulación de estructuras similares, teniendo en cuenta los efectos de la tasa de deformación, con la aplicación de similitud no directa.

REFERENCIAS

- ABNT. *NBR 6892: Los materiales metálicos - Ensayo de tracción a temperatura ambiente*. Asociación Brasileña de Normas Técnicas. 2002.
- Alves Filho, A. *Elementos Finitos - La base de la tecnología CAE*, Sao Paulo, Editora Érica 2002.
- ALVES M., JONES, N., Failure of beams using damage mechanics: Part II - application. *International Journal of Impact Engineering*, 2002.
- ALVES, G.T., Avaliação da absorção de energia de impacto. Uma abordagem baseada em testes em estruturas similares, Dissertação de Mestrado. PUC-Rio. 2009.
- ASM HANDBOOK.2000. ASM Handbook Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation Editor: H. Kuhn and D. Medlin. Hardcover, 2000.

- Chen, Y.; Craig, R.; Tyan, T.; Laya, J. y Cheng, J., *Finite Element Modeling of the frame for body on frame vehicles. Part II. Full Vehicle Crash* in: Advances in Modeling of Materials and Structures for Crash Applications. SAE International, USA, 2004. Number 2004-01-0689, pages 57-60.
- KANG, W.J.; CHO, S.S; HUH, H.; CHUNG, D.T. Modified Johnson-Cook model for vehicle body crashworthiness simulation. *International Journal of Vehicle Design*, Volume 21, Numbers 4-5, 21 October 2004, pp. 424-435.
- MEYERS, M.A., *Dynamic Behavior of Materials*. J. Wiley, 1994.
- Montgomery, D.C.; Hubele, N.F. y Runger, G.C. *Estatística Aplicada A Engenharia*. Editoria LTC. 2004.
- Nitz, M. y Galha, Jr., *Calcule com o Mathcad, Versão 11*, Editoria Érica, São Paulo, 2003.
- Nobrega, M.J.R., *Uma Contribuição para Modelagem do Comportamento Mecânico de Materiais Submetidos a Taxas de Deformações Dinâmicas, aplicados a Reconstituição de Acidentes Veiculares*. Tese de Doutorado. PUC-Rio. 2010.
- OSHIRO, R.E., *Leis de Similaridade Aplicadas a Estruturas sob Impacto*. Dissertação de Mestrado. USP, 2004.
- OUTEIRO J.C., UMBRELLO, D., SAOUBI, R.M., Experimental and Numerical Modeling of the Residual Stresses Induced in Orthogonal Cutting of AISI 316L Steel, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 1786-1794, 2007.
- Silva, A.L.C. y Mei, P.R., *Aços e ligas especiais*. 2ª edição. Editoria Edgard Blucher. 2006. *similares*, Dissertação de Mestrado. PUC-Rio. 2009.
- YAMAKAMA, R.S., CORREA, C.A.F., JÚNIOR, E.H., A influência da taxa de carregamento no comportamento de escoamento e de fratura em ABS/SAN. 5º CBPo1, Águas de Lindóia, Anais, p. 502, 2007.
- YU, H., GUO Y., ZHANG K., LAI X., Constitutive model on the description of plastic behavior of DP600 steel at strain rate from 10⁻⁴ to 10³s⁻¹. *Computational Materials Science*. 2009, pages 36-41.
